

*Gyarmati József – Hegedűs Ernő –
Gávay György*

A 3D-nyomtatás kutatásának eredményei az NKE HHK Haditechnikai Tanszéken

A tanulmány bemutatja a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztisképző Kar Katonai Logisztikai Intézet (NKE HHK KLI) Haditechnikai Tanszékének 3D nyomtató laboratóriumaiban elért, additív gyártástechnológiához kapcsolódó kutatási eredményeket, amelyek elsősorban a katonai logisztika tudományterületéhez köthetők. Az NKE HHK KLI Haditechnikai Tanszék kutatásainak célja az additív gyártástechnológia alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata a katonai logisztikában, az iparban és a katonai-műszaki felsőfokú képzésben. A kutatás során vizsgálták a fémek, a műanyagok, a szálerősítéses kompozitanyagok 3D-nyomtatásának, valamint az Atomic Diffusion Additive Manufacturing, azaz atomi diffúziós additív gyártás (ADAM) fémnyomtatási technológia alkalmazásának lehetőségeit. A vizsgálatok kiterjedtek a 3D-nyomtatás alkalmazhatóságára gépjárművek és UAV-k alkatrészeinek – tartók, fogaskerekek, bolygómművek – gyártására és pótlására. A főként a robotikában alkalmazott hullámhajtómű tervezése és 3D-nyomtatása, valamint a robotjárművek összeállítása szintén a kutatás részét képezte. A tanszék bevezette az Autodesk Fusion 360 alapú 3D modellezés oktatását, valamint két 3D nyomtató laboratóriumban megvalósította a nyomtatás gyakorlati oktatását az NKE HHK-n zajló katonai-műszaki felsőfokú képzésben a BSc-hallgatók, a PhD- és Erasmus-kutatók, valamint a Horizon Europe-pályázók számára. A kutatási tapasztalatokat az European Defence Agency (EDA) munkaülésén is megvitatták a kutatók.

Kulcsszavak: Haditechnikai Tanszék, 3D-nyomtatás, additív gyártástechnológia, katonai logisztika, katonai-műszaki felsőfokú képzés

Bevezetés

A tanulmány ismerteti az NKE HHK KLI Haditechnikai Tanszékén (a továbbiakban: Haditechnikai Tanszék) zajló kutatásokat, amelyek az additív gyártástechnológia (AM-technológia) alkalmazási lehetőségeinek feltárása érdekében folynak 2022 óta. A kutatók célja az innovatív additív gyártástechnológiáknak, a fémek, műanyagok és kompozitanyagok 3D-nyomtatása alkalmazási lehetőségeinek a vizsgálata a katonai logisztikában és a katonai-műszaki felsőfokú képzésben (VÉGVÁRI 2022).

A tanulmány továbbá egyes korszerű AM-technológiák részletes bemutatására és azok alkalmazási lehetőségeinek, tapasztalatainak ismertetésére vállalkozik. Bemutatja az ADAM-technológiájú 3D fémnyomtatást, annak alkalmazási lehetőségeit, a zárt belső szerkezetek, cellák előállításának lehetőségét és előnyeit, valamint a magas olvadáspontú fémek nyomtathatóságát. Ismerteti a kombinált – vágott rövid szálú, emellett folyamatos szálfektetésű – szálerősítéses kompozit műanyag alkatrészek nyomtatásának egyes lehetőségeit. Kitér a fém alkatrészek szálerősítéses kompozitra cserélhetőségének kérdésére is.

A tanulmány bemutatja a Haditechnikai Tanszék 3D nyomtató laboratóriumai-ban elért, AM-technológiához kapcsolódó kutatási eredményeket. A kutatásokhoz kapcsolódóan a Haditechnikai Tanszéken kialakított laboratóriumok lehetővé tették az AM-technológiához kötődő 3D-modellezés oktatásának bevezetését, valamint két 3D nyomtató laboratóriumban gyakorlati nyomtatási tevékenységek kutatási célú megvalósítását az NKE HHK-n zajló katonai-műszaki felsőfokú képzésben, a BSc-hallgatók, a PhD- és Erasmus-kutatók, valamint a Horizon Europe-pályázók számára.

Az NKE HHK 2022-ben több különféle technológiájú, köztük fém-, valamint szálerősítéses kompozit nyomtatására alkalmas 3D nyomtatót szerzett be. Ennek oka, hogy a 3D-nyomtatás napjainkban találja meg a helyét a katonai logisztika és az üzemeltetés területén, valamint a katonai felsőoktatásban (CLEMENS 2022; *European Military Additive Manufacturing Symposium* 2021). Az ADAM-technológiájú nyomtatás – a Markforged Metal X fémnyomtató – az amerikai haderő katonai logisztikai eszköztárban 2018-ban jelent meg (MOLITCH-HOU 2020). A Haditechnikai Tanszék 2022-ben kezdte meg kutatásait a Markforged Metal X fémnyomtatóval. A nyomtató által alkalmazott ADAM-technológia lehetővé teszi a magas olvadáspontú fémek nyomtathatóságát, ezáltal olyan fémek jelennek meg ezen a területen, amelyeknek egyértelmű hatása van a haditechnika fejlődésére. Lehetőség nyílik már a zárt belső szerkezetű anyagok (zárt cellák) előállítására.

Egyes alkatrészek 3D-nyomtatott alkatelemmel való pótlása esetében a mechanikai terhelés mértéke vagy az adódó hőterhelések, élettartam-követelmények egyértelműen megkövetelik a fém alkatrészek alkalmazását. A tanszék részére beszerzett fémnyomtató a fent említett technológiát alkalmazza, és a Haditechnikai Tanszék két év alatt mintegy 200 különféle gépelem és próbatest 3D-nyomtatását végezte el a Metal X típusú fémnyomtatóval.

Napjainkban egyes fejlett 3D műanyagnyomtatók már képesek folyamatos üvegszál-, szénszál- vagy kevlar-szál-erősítést beépíteni a nyomtatott termékekbe, amelynek alapanyagát emellett vágott szénszálerősítéssel is elláthatják.

A szálerősítéses műanyagok a 3D-nyomtatásban – a vágott és/vagy folyamatos szálerősítésű kompozit műanyagok nyomtatásának terjedése a 3D műanyag-nyomtatásban – olyan új alapanyagot jelentenek, amelyek szilárdsága megközelítheti egyes könnyűfémekét. Egy ilyen AM-technológiával legyártott, folyamatos szálerősítéssel és vágott szálerősítéssel egyaránt erősített kompozit műanyag gépelem szilárdságtani mutatói kedvezők – elsősorban a szálerősítés által egyetlen síkban szilárdabbá tett, egy irányban adódó terhelések esetében. Az NKE HHK által beszerzett 3D nyomtatók egyike egy szálerősítéses műanyag technológiájú, MarkForged Onyx Pro típusú kompozit nyomtató. Az e nyomtatónál alkalmazott korszerű alapanyag-technológia és az AM-technológia együttes alkalmazása már lehetővé teszi egyrészt akár a fém gépjárműalkatrészek pótlását kisebb fajlagos tömegű műanyagokkal, másrészt a pótalkatrészek rugalmas előállítását.

Mindezek figyelembevételével feltételezhető, hogy létezik a járműalkatrészeknek olyan halmaza, amelyek esetében – a pótalkatrész additív gyártása során – lehetséges a fém műanyaggal való helyettesítése, és az AM-technológia alkalmazása lehetővé teszi a fém gépjárműalkatrészek pótlását kisebb fajlagos tömegű műanyagokkal. Célszerű tehát megvizsgálni a fém alkatrészek műanyag 3D-nyomtatott alkatrésszel történő pótlásának lehetőségét az alábbi előnyök miatt: kisebb szerkezeti tömeg, alacsonyabb gyártási költség, a fém alkatrész 3D-nyomtatásához képest csekélyebb gyártási idő, valamint kedvező korrózióval szembeni ellenálló képesség utólagos felületkezelés nélkül is.

A Haditechnikai Tanszék két év alatt mintegy 100 különféle gépelem 3D-nyomtatását végezte el a MarkForged Onyx Pro típusú szálerősítéses kompozit nyomtatóval. A tapasztalatokat a European Defence Agency (EDA) 3D-nyomtatás munkacsoportban való részvételünk során megvitattuk. 2024 őszén az NKE HHK képviselte magát az EDA a 3D-nyomtatás katonai logisztikai alkalmazását vizsgáló munkacsoportjában (Additive Manufacturing for Logistic Support Project Working Group, AMLS).

Napjainkra az AM-technológia széles tárháza áll rendelkezésre 3D-nyomtatott alkatrészek előállításához (BADIRU–VALENCIA–LIU 2020: 948). Az AM-technológia több alapvető technológiája, például a 3D-nyomtatás valójában nem új, hanem mintegy három évtizedre tekint vissza, és elkerülhetetlenné vált az AM-technológiák katonai alkalmazása.

A katonai logisztikában alkalmazható AM-technológiák jelentősége

Az alapanyagok széles spektrumának köszönhetően a jelentősebb európai haderők már számos olyan alkatrészt tudnak előállítani, amelyek beszerzése hosszadalmas és körülményes lenne. Az AM-technológiák alkalmazásával új lehetőségek nyíltak az alkalmazó állomány igényein alapuló saját fejlesztésekre és a technikai eszközök alkatrészeinek pótlására, azok továbbfejlesztésére. A technológia katonai területen való térnyerése egyértelműen új igényként jelentkezik a katonai logisztikában, mivel szükség van képzésekre, eszközökre, alapanyagokra, szoftverekre. Ezt a gondolatmenetet folytatva a beszerzés és a logisztikai ellátási láncok aktualizálása, fejlesztése, fizikai és kibervédelme is felmerül új követelményrendszerként.

A katonai logisztika fejlesztésének igényével foglalkozik az EDA AMLS panelje. A szervezetnek több munkaülésein, valamint más rendezvényen is sikerült eredményes munkával megfogalmaznia a területet érintő problémákat, és olyan folyamatot elindítania, amelynek előrehaladtával megteremthető a jól megfogalmazott követelményrendszer, valamint a nemzetek közötti együttműködés alapjai. Az EDA AMLS foglalkozik saját munkacsoportjainak működésirányításával, az AM-technológiákkal, a logisztikai ellátási lánc működésével, törvényi keretekkel és szabályzókkal, minőségirányítással, humán erőforrással és képzéssel, valamint információmenedzsmenttel és IT-vel (3rd European Military Additive Manufacturing Symposium 2025).

A 3D-nyomtatás dinamikusan terjed az iparban, valamint a katonai logisztika területén is. Az AM-technológiák számos irányát alkalmazzák már a katonai célokra, és a felhasználási területek igényei határozzák meg azok megfelelőségét (DARUKA et al. 2024b; 2024a). Ezek közé tartozik az oktatás, a kutatás és a fejlesztés, a prototípusgyártás és a modellezés, valamint az egyedi gyártás, a sorozatgyártás (kis, közepes, nagy sorozat) vagy a tömeggyártás.

A tudományos probléma megfogalmazása

A megoldandó tudományos probléma a katonai logisztika területén elsősorban ott adódik, hogy napjaink NATO-ajánlása szerint a járművek alkatrészeit még távoli térségekben, missziókban is biztosítani kell a műveleti alkalmazás során, valamint a rendszerben tartás ideje alatt. Azonban az alkatrészek biztosítása nem minden

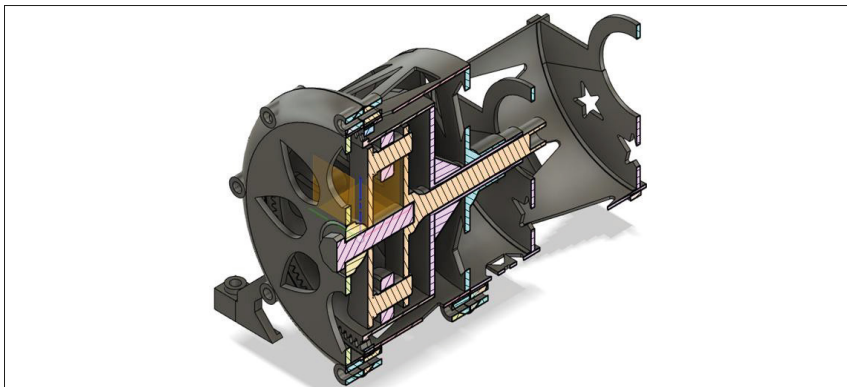
esetben oldható meg a missziós területre telepített szakanyagraktár készleteiből. Emellett békeidőszakban, a haderő hazai területen végzett tevékenysége során sem minden esetben garantálható az alkatrészellátás – különösen több évtizede rendszerben álló technikai eszközök esetében. Ezekben a helyzetekben egyes NATO-tagállamok – elsősorban az Egyesült Államok és Németország – haderői az AM-technológiával, 3D-nyomtatással előállítható pótalkatrészek – köztük fém és műanyag alkatrészek – szükség szerinti egyedi gyártását kezdték meg az utóbbi években.

Magyarország 2021. évi Nemzeti Katonai Stratégiája kimondta, hogy egyes új technológiák, például a 3D-nyomtatás katonai alkalmazása alapjaiban változtatja meg a jelenlegi hadviselés szabályait és eljárásrendjét [1393/2021. (VI. 24.) Korm. határozat]. A 3D-nyomtatás a Magyar Honvédségben bevezetendő technológia. Konkrét felhasználási területeit tekintve vizsgálat tárgyát képezte a katonai logisztikában alkalmazott gépjárművek alkatrészpótlása 3D-nyomtatási technológia alkalmazásával, valamint a kiképzési célú eszközök és anyagok 3D-nyomtatási lehetőségei is.

Gyakorlati alkalmazások

A járműtechnika tekintetében fémből és kompozit anyagból egyaránt 3D-nyomtatják a hűtőrendszer egyes elemeit – hűtőfolyadékcsövek és azok tartói –, amelyek beépítési próbái is lezajlottak (VÉGVÁRI–HEGEDŰS–ZENTAY 2022). A katonai egyenruhának és a gépjárműtechnikai eszközöknek is fontos műanyag elemét képezik a bepattanó kötések, amelyek kutatását és 3D-nyomtatását szintén elvégezték (VÉG et al. 2024). A gépjárműlámpatestek additív gyártásának egyik lehetősége a litofántechnológia, amelynek kutatása hallgatói munka keretében zajlott.

Az egyetemi képzés, oktatás támogatása területén is jól hasznosítható az AM-technológia. Ilyen terület a sebességváltó-modell kialakítása 3D-nyomtatással oktatási célból, amelynél az automata sebességváltóban alkalmazott Wilson-rendszerű kapcsolt bolygóművet valósították meg (GYARMATI et al. 2022). Emellett 3D modellezés tárgyát képezte a lánc talpas jármű kormányzása is (GYARMATI 2023). Oktatási célú modell kialakítására került sor 3D-nyomtatási technológiával a forgó dugattyús befecskendezőszivattyú tehermentesítő szelepe esetében is. Számos oktatási bolygóművet is nyomtattak – nem egyet hallgatói tudományos diákköri pályamunka keretében. Hallgatói munka a nagy áttételi viszonyú – főként a robotikában alkalmazott – hullámhajtómű tervezése és nyomtatása is (4.1. ábra).



4.1. ábra. A hullámhajtómű tervezése
és nyomtatása hallgatói munka
Forrás: a szerzők szerkesztése

Az AM-technológia anyagtudományi oldalának megismerésére és alkalmazására adott lehetőséget a fémnyomtatás esetében a rendelkezésre álló ADAM-technológiájú nyomtató, amellyel – más fém alapanyagok mellett – hőálló Inconel különleges fémötvözet és alacsony olvadáspontú réz egyaránt nyomtatható. Komplex geometriákat, zárt belső cellákat, összetett belső üregeket, valamint a konvencionálístól eltérő fogprofilú és anyagú fogaskerékpárokat, bolygóműveket – köztük réz bolygóművet – is nyomtattak. Innovatív és távlati, a kutatás-fejlesztés szempontjából perspektivikus 3D-nyomtatási eredmény az UGV-járműfejlesztés kutatása és e területen az alkatrészek nyomtatása, a komplett robotjárművek összeállítása.

Az AM-technológia szempontjából kiemelkedően fontos területként képezték vizsgálat tárgyát a 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai (RÁKOSI 2023). Távlati kutatás volt a 4D nyomtatás és az okosanyagok alkalmazása lehetőségeinek vizsgálata (VÉG 2023). Vizsgálat tárgyát képezte általában a 3D-nyomtatás alkalmazása a repülő-szakterületen és az UAV-k gyártásában és pótalkatrész-ellátásában, valamint a 3D fémnyomtatással gazdaságosan gyártható könnyített szerkezetű alkatrészek alkalmazhatóságának vizsgálata. A jövő lehetősége az optikai elemek 3D-nyomtatással történő előállítására, amely területen kísérleteket folytattak le (VÉGVÁRI 2024). Az AM-technológia részeként, a 3D modellezéshez kapcsolódóan vizsgálták a topológiai optimalizálás, a generatív tervezés és a 3D-nyomtatás kapcsolatát, amelybe az Autodesk Fusion 360 szoftver ismereteire oktató hallgatók is bekapcsolódtak (HEGEDŰS et al. 2024).

A katonai szempontból alkalmazható 3D-nyomtatási technológiák általános ismertetése

Általános technológiák

FDM/FFF-technológia

Az FDM/FFF (*fused deposition modelling/fused filament fabrication*) szálhúzásos nyomtatási eljárás során egy vagy több nyomtatófej a tekercsben lévő, hőre lágyuló anyagszálat olvasztja meg, majd rétegről rétegre rakja le, és az egyes rétegek mindig hozzátapadnak az előző réteghez. Ez az eljárás alapvetően műanyag, valamint kompozit anyagok felhasználását teszi lehetővé.

ADAM-eljárás

Az ADAM-eljárás első fázisa szintén ugyanezen az elven működik, azonban ez esetben viasz hordozóanyagba ágyazott fémszemcséből építi fel a munkadarabot a nyomtató. A kinyomtatott előgyártmány a mosási folyamatot követően szinterkemencében kapja meg végső minőségi mutatóit, valamint méretét.

SLA-technológia

Az SLA (*stereolithography*) 3D nyomtatók a tárgyak elkészítéséhez folyékony műgyanta alapanyagot használnak, amelyet az építési területen rétegről rétegre lefektetnek, majd egy lézer segítségével összekötnek, és megkeményítenek.

SLM-technológia

Az SLM (*selective laser melting*), a fémporok szelektív lézerolvasztása elvén működő eljárás során a nyomtató nagy energiájú lézersugarat használ fel a fémpor megolvasztáshoz, amely szinte bármilyen összetételű lehet. Lehetőség nyílik ezáltal gépjárművek, munkagépek vagy repülő eszközök fém alkatrészeinek előállítására is. Szükség esetén tábori körülmények között is alkalmazható. A fémek lézerporágyas fúziós technológiája esetén a felület minősége gyakran

nem felel meg a felhasználási követelményeknek, ezért a termék előállításakor szükséges a csatlakozófelületek megmunkálása forgácsolással, anyagleválasztó technológiával.

További technológiák

Az SLS- (*selective laser sintering*) technológia alapján működő 3D nyomtatók porállagú alapanyagot (műanyag, fém) használnak az építésre, amelyet a nyomtatófej a nyomtatókamra tálcájára a kívánt rétegvastagságban elterít, majd egy lézer felolvasztja az egyes rétegeket, amelyek összeolvadnak egymással (HATOS et al. 2024).

A Polyjet nyomtatók a nyomtatás során folyékony fotopolimer cseppeket kötnek össze UV (ultraviola) -fényforrás segítségével. A Binder Jetting nyomtatási eljárás során a rétegenként lefektetett finomszemcsés poros alapanyagra kötőanyagot permeteznek, amely megszilárdul. A DLP (*digital light processing*) nyomtatók fotopolimer alapanyagot használnak fel a tárgyak felépítésére. Egyszerre egész rétegeket keményítenek meg egy fényforrás és egy digitális tükör felhasználásával.

Alapanyagok

Műanyagok

Az alkalmazható műanyagok széles spektruma magában foglalja az ABS (acrylonitrile butadiene styrene) erős, kopásálló és strapabíró műanyagot, a nylon erős, kopásálló és könnyű műanyagot kiváló mechanikai tulajdonságokkal, az ASA (acrylonitrile styrene acrylate) hőre lágyuló műanyagot jó UV-állósággal, kedvező mechanikai és esztétikai tulajdonságokkal. A további alapanyagok közé tartozik a DIRAN tartós és szívós, nylonalapú hőre lágyuló műanyag, a PLA (polylactic acid) jó UV-állósággal és rétegtapadással, ugyanakkor alacsony nedvességállósággal rendelkező merev és erős műanyag. A PETG (polyethylene terephthalate glycol-modified) erős, tartós, kopásálló és hőálló anyag jó mechanikai tulajdonságokkal, a TPU (thermoplastic polyurethane) rugalmas műanyag jó ütésállósággal és kopásállósággal. A PC (polikarbonát) magas szakító- és hajlítószilárdsággal rendelkező erős műanyag, a HIPS (high-impact polystyrene) nagy tartósságú és ütésállóságú polisztirol.

Fémek

A fém alapanyagok közé tartoznak a bronzötvözetek, a rézötvözetek, a szerszám- és martenzites acélok, a rozsdamentes acélok, az alumíniumötvözetek, a titán és a titánötvözetek, valamint a nemesfémek (arany, platina, ezüst).

Kompozitok

A kompozit anyagok kategóriájába sorolhatók a műanyag- és fémporkeverékek, a műanyagok és más, nem fém porok keverékei (például farost, gipsz, kőpor), a műanyag- és mikroszálkeverékek, valamint a folyamatos szálerősítés (szénszál, üvegszál, kevlar).

Az ADAM 3D fémnyomtatási technológia részletes ismertetése

Alkalmazható alapanyagok és képességek

Az ADAM-technológiánál alkalmazható alapanyagok közé tartoznak a szerszám-acélok, a rozsdamentes acél, a hőálló inconel (például Inconel 625 vagy 718), valamint a réz. Az ADAM fémnyomtatási eljárás alkalmas komplex geometriák, például zárt cellás belső szerkezetű gépelem gyártására (például giroid kitöltéssel, összetett furatokkal), magas olvadáspontú fémek (például inconel–nikkel tartalmú hőálló ötvözet) nyomtatására (például turbinalapát, kipufogószelep, hőcserélő), alacsony olvadáspontú fémek (például réz) nyomtatására, valamint az alapanyagok gyors cseréjére. A fentiekre más fémnyomtatási technológiák nem, vagy csak kevésbé alkalmasak.

A technológiai folyamat

Az ADAM 3D fémnyomtatási eljárás három lépésben valósul meg: nyomtatás, mosás, szinterezés. Ennek megfelelően lett berendezve a Haditechnikai Tanszék laboratóriuma is (4.2. ábra). Az ADAM-technológiájú MarkForged Metal X 3D fémnyomtató polimermátrixba kötött fémporokat extrudál, a műanyag 3D-nyomtatáshoz



4.2. ábra. ADAM-technológiájú 3D fémnyomató laboratórium: nyomtató, mosó és szinterkemence, háttérben a gázellátó rendszer

Forrás: a szerzők felvétele

hasonló, hagyományos olvasztott szál leválasztásos módszerrel. A nyomtató második feje vékony kerámia elválasztóréteget nyomtat, amely a gyártmány megtámasztása érdekében felépített támasztékok leválasztására szolgál. Az ADAM fémnyomtatási technológia alkalmazása során a nyomtató – az Eiger szoftver alkalmazásával – a nyomtatott tárgyakat az FFF-technológiának megfelelően rétegről rétegre, hőre lágyuló polimerrel és viasszal kötött fémporból gyártja le.

A mosási folyamat és annak jelentősége

A nyomtatás után a viasz kötőanyag eltávolítása következik mosással. A kinyomtatott zöld alkatrészt kötőanyag-mentesítő alkatrészmosó állomásba helyezik. A kötőanyagot ekkor kivonják a munkadarabból olyan módon, hogy gépi úton, melegített (50–54 °C hőmérsékletű) és 12–23 órán keresztül áramoltatott oldószerben kimossák belőle a viaszt. Az Eiger szoftver szelekteléskor az alkatrész vastagságával összefüggően kiszámítja a várható mosási időt. Az Eiger szoftver által – a leírt alkatrésztömeg megadását követően – számított időtartamú mosás megfelelőségét a modell tömegcsökkenésének mérésével ellenőrzik.

A nyomtatás után tömegmérés következik, majd a mosási idő letelte után újabb tömegmérést végeznek. Ezeket az adatokat a szoftverben rögzítik. Amennyiben a tömegvesztés nem éri el a kívánt mértéket, további mosási ciklusokat kell

alkalmazni a megfelelő viasztartalom-csökkenés eléréséig. A nem megfelelő időtartamú mosás a kemence viaszos eltömődését okozhatja, amely jelentős üzemeltetési problémákhoz vezethet.

A mosást addig kell folytatni, amíg az Eiger szoftver által számított megfelelő tömegcsökkenés be nem következik. A mosási fázisban a zöld alkatrészből az oldószeres fürdés során kizárólag a viasztartalom oldódik ki, míg a megmaradó polimertartalom összefogja az alkatrészt a szinterezési folyamatig, létrehozva a barna alkatrészt.

A szinterezési folyamat és annak paraméterei

Az alkatrész a hőkezelő kemencében történő szinterezés során éri el az öntvényminőséget. A folyamat során az immár barna mosott alkatrészek kerülnek a szinterező kemencébe, amely 22–27 órán keresztül és maximum 1482 °C hőmérsékleten szinterezi a fém alkatrészeket. A modellt argon védőgázban hevítik a fém olvadáspontjáig egy kamrában, hogy megkapják a végleges alkatrészt.

A technológia jellegzetessége, hogy a kamrás hevítés (szinterezés) során az elkészített modell térfogata csökken, bizonyos geometriák mellett esetleg deformálódhat is. Az 1 : 6 alap-magasság alkatrészarány felett fokozódik a deformáció veszélye. A technológia alkalmazása során a nyomtatvány – például D2 szerszámacél alapanyag esetén – az eredeti méretéhez képest akár 10%-os zsugorodást is elszenvedhet, amelyet az alkalmazott Eiger tervezőprogram számított nyomtatásiméret-ráhagyással kompenzál.

Opcionálisan a kemence nemcsak a szinterezést, hanem argonhűtésű hőkezelést is végezhet. A szinterezési idő így 37 órára növekszik, viszont az anyagtulajdonság javítására vonatkozó lehetőségek bővülnek. Az alkatrész hőkezelése igény szerint természetesen külön hőkezelő kemencében is megoldható.

A szinterezés utolsó fázisa és az anyagtulajdonságok

A szinterezési folyamat során minden nem fémes adalékanyag kiég a modellből a szinterező kemencében, amely argon védőgázzal védi meg a fémeket az oxigénnel való reakciótól. A szinterezés utolsó fázisában 2,4% hidrogéntartalmú argon gázkeveréket alkalmaznak a kemencében. A távozó gázokkal együtt távozik a szinterezett alkatrészből kiégő maradék műanyagtartalom is.



4.3. ábra. Különféle próbatestek nyomtatás utáni hőkezelése a szinterkemencében
Forrás: a szerzők felvétele

A mosott 3D-nyomtatott alkatrészek a kemencében fémformátumú alkatrésszé alakulnak át, majd lehűlés közben zsugorodnak. Mivel a zsugorodás mértékével a nyomtatást vezérlő szoftver (Eiger) a tervezési fázisban számol, és korrekciókat végez, a késztermék a kívánt (tervezett) méretben állítható elő.

Tervezési irányelvek és korlátok

Tervezési segédlet ad támpontot például ahhoz, hogy az 1 : 6 átmérő-magasság arány felett figyelembe kell venni a függőleges tájolású szinterezés esetleges deformáló hatását. Az ADAM-technológia elnevezése arra a fontos jellemzőre utal, amely szerint a nyomtatás fémportartalmú filament segítségével rétegenként történik. Ezek a rétegek azonban a szinterezés során homogén anyagú termékévé olvadnak össze, lényegében minden irányban azonos szilárdsági jellemzőket garantálva (4.3. ábra).

Vizsgálták az ezzel a technológiával előállított alkatrészek méretpontosságát és felületi minőségét, valamint szilárdságát is. Összességében a technológia korlátai és lehetőségei egyaránt dokumentáltak, jellemzői ismertek. Az ADAM-technológiával készült alkatrészek alkalmasak további gépi megmunkálásra, felületkezelésre vagy akár hőkezeléssel történő szilárdságnövelésre is.

Alkalmazási területek és perspektívák

Az ADAM-technológiájú 3D fémnyomtatás alkalmazása jelenleg és a jövőben is előnyös az olyan hőálló, nehezen önthető és nehezen megmunkálható ötvözetek esetében, amelyek 700 °C-ig hőállóak és szilárd keménységűek (22 HRC, 237 HB, 280 HV). Ilyen fém például az inconel, amelynek az alkalmazása gázturbinák és turbófeltöltők turbinaalkatrészeinél egyaránt fontos.

Az inconel csak vákuumban önthető, mivel egyébként a fém olvadási hőmérsékleténél a Ni és a Cr alkotóelem és ötvöző kiégne. A 3D fémnyomtatás – különösen a magas olvadáspontú anyagok nyomtatására alkalmas ADAM-technológia – fejlődésének egyik kulcsterülete a nyomtatható fém alapanyagok anyagtudományi szempontból történő fejlesztése és a paletta bővítése.

A magas olvadáspontú fémek jelentős szerepet játszanak a turbinalapátok, a gázturbina-gázsebességfokozók és -gázsugárkormányok, a rakétahajtóművek, a kipufogószelepek, a hőcserélők gyártásában. Emellett rozsdamentes acél, alumínium, szerszámacélok, titán, továbbá réz is nyomtatható ADAM-technológiával, amelyhez jelenleg zajlik az alapanyag-paletta bővítése és fejlesztése.

A szálerősítéses kompozit anyag 3D-nyomtatási technológiájának részletes ismertetése

A technológia alapjai és fejlődése

Napjainkban a műanyagnyomtatás területén a szálhúzásos vagy a szálolvasztásos technológia tekinthető alapvetően elterjedtnek (*fused filament fabrication*, FFF). A műanyag 3D-nyomtatásánál megkülönböztetünk homogén műanyag és szálerősítésű műanyag termékeket. Az FFF-technológiához készített filamentek – a PET-, PETG-, ASA-, ABS- és nylonpolimerek esetében – széles körben alkalmaznak például rövidre vágott karbonszálakat a polimerek adalékaként 15–20% körüli mennyiségben.

Rövidre vágott szálak – üvegszál vagy szénszál – ilyen mértékű adagolásával a hajlítószilárdság kétszeres-háromszoros értékűre növelhető a 3D-nyomtatott szerkezeti elemnél. Újabb lehetőség az AM-technológiában a műanyagok folyamatos szálerősítése, mivel napjainkban már nemcsak az alapanyagba kevert mikroméretű szálak, hanem emellett további, az építési rétegekbe helyezett folyamatos szálerősítés is elkészíthető, tovább javítva ezzel a szilárdsági mutatókat.

A kombinált erősítési technológia előnyei

A szálerősítéses műanyagok 3D-nyomtatása – a vágott vagy folyamatos szálerősítésű kompozit műanyagok nyomtatásának terjedése a 3D műanyag-nyomtatásban – olyan új alapanyagot jelent, amelynek a szilárdsága megközelítheti egyes könnyűfémekét. A 70-es évek óta ismert, hogy a 30% üvegszálkitöltéssel erősített poliamid sűrűsége mindössze 20%-kal növekszik, miközben fajlagos szakítószilárdsága több mint a kétszeresére nő (HILDEBRAND 1977).

Napjainkra már széles körben vizsgálták a különféle szálak mechanikai tulajdonságait a 3D-nyomtatott műanyag kompozit szerkezetekben, és egyebek mellett előnyösnek találták az üvegszál hajlítószilárdságra gyakorolt hatását (TÓTH–KOVÁCS 2020: 5). Az is ismert, hogy a 20% rövid szénszállal erősített poliamidminták a nyírószilárdság 50%-os javulását mutatják, emellett jobb tapadást mutatnak a nyomtatott rétegek között (RADZUAN et al. 2023).

Kézenfekvő a két technológia – a rövidre vágott szénszál-, illetve a folyamatos szálerősítés – kombinálása a nyomtatott poliamidtermékben. Napjainkban egyes fejlett 3D műanyagnyomtatók már képesek folyamatos üvegszál-, szénszál- vagy kevlaraszál-erősítést beépíteni a nyomtatott termékbe, amelynek alapanyagát emellett vágott szénszálerősítéssel is elláthatják.

A Markforged Onyx Pro technológia jellemzői

A Haditechnikai Tanszék kompozitnyomtatásra Markforged Onyx Pro nyomtatót alkalmaz. Technológiáját tekintve a Markforged Onyx Pro nyomtató szálhúzásos (FFF) típusú, adagolója dupla fogaskerekes, kopásálló, kompozitra felkészített konstrukció. Képes folyamatos szálerősítéses munkadarabok nyomtatására és zárt cellák létrehozására különféle kitöltésekkel.

A nyomtató munkatere $320 \times 130 \times 160$ mm, a létrehozott rétegvastagság 100–200 μm . A teljesítmény maximuma 350 W. Az ajánlott nyomtatófej-hőmérséklet 210–220°C, míg a nyomtatótálca-hőmérséklet 60°C. Az eszköz képes folyamatos szálerősítéses – üvegszál-erősítésű – munkadarabok nyomtatására. Jelenleg a Markforged által forgalmazott legnagyobb, szálerősítéses Onyx (poliamid) nyomtatására alkalmas műanyagkompozit-nyomtató az FX-20, amelynek munkatere $525 \times 400 \times 400$ mm méretű, amely már alkalmas lehet egyes ipari szintű alkatrészgyártási igények kiszolgálására is.

Az Onyx kompozit anyag tulajdonságai

Az alkalmazott PA6 Onyx kompozit nyomtatószál kis méretű, rövid szénuszálakat tartalmaz, ezáltal jelentős terhelhetőség és alkatrésztartósság is elérhető, miközben az alkatrész hőmérséklettűrése 130–140 °C fölé is növelhető. A PA alapanyag ezáltal alkalmas a gépjárművek motorterében elhelyezett alkatrészek és tartók gyártására.

Az Onyx mátrixanyag jellemzői: nylon (PA6 poliamid), rövid (vágott) szálú szénszálerősítéssel (szakítószilárdság: 40 MPa; hajlítószilárdsága: 90 MPa). Ebben helyezik el a folyamatos szálerősítést, kizárólag az x–y síkban. Az üvegszál szakítószilárdsága 240 MPa. A mátrixszál kompozit szerkezet, maximális szilárdsága üvegszállal erősített alapanyaggal 200 MPa, míg nagy szilárdságú HSHT (*high strength high temperature*) üvegszál esetében 400 MPa. A fejlettebb Markforged nyomtatók folyamatos szénszál-erősítésű Onyx alapanyaggal 550 MPa szilárdságot érnek el.

Gyakorlati alkalmazási lehetőségek

A Markforged Onyx Pro nyomtató képes folyamatos szálerősítéssel zárt cellák egyidejű létrehozására is. Összességében a szálerősítésű 3D-nyomtatás alkalmazásával felmerülhet új alkatrészek tervezése más műanyagnyomtatási technológiákhoz képest kisebb tömegű és nagyobb szilárdságú kivitelben. A rövid és folyamatos szálerősítéssel rendelkező, különféle kitöltésekkel legyártott kompozit szerkezetű 3D-nyomtatott Onyx-alkatrészek szilárdságát szakirodalmi adatok alapján még tovább lehet növelni topológiai optimalizálással (SZEDERKÉNYI et al. 2022: 82; KOVÁCS et al. 2024: 29–48).

A járművek alkatrészpótlásának lehetőségeire, illetve a meghibásodott alkatrész pótlásával egyidőben kivitelezett fejlesztésre az FFF-eljárások nagyon jó lehetőséget nyújtanak. Az ilyen jellegű tevékenység alapja a *reverse engineering*, amikor egy sérült vagy hiányzó alkatrészt kell a rendelkezésre álló adatokból újramodellezni az elérhető technikai eszközökkel. A technikai eszközök a kézi mérőműszerektől a 3D szkennerekig terjedhetnek.

A 3D-modellezés és -nyomtatás helye a katonai oktatásban és az NKE-n jelenleg kutatott technológiák

Az AM-technológiák integrációja a katonai logisztikába

Az AM-technológiák alkalmazásának beillesztése a katonai logisztikába már megkezdődött. A szövetségi környezet előnye a kutatási eredmények és az erőforrások megosztása, valamint a standardizálás lehetősége. A nemzeteknek lehetősége van olyan tiszteket és szakembereket képezni, akik alkalmasak lesznek az AM-technológiák menedzselésére akár saját nemzeti, akár szövetséges környezetben.

A jól felkészült technikai tisztek képzéséhez a jövőben elengedhetlenné válik az AM-technológiákkal való megismerkedés. Szükségessé vált a katonai területen alkalmazható AM-technológiák meghatározásának és kiválasztásának képessége, valamint azok logisztikai igényeinek pontos meghatározása.

Az NKE HHK kutatási tevékenysége

Az NKE HHK három tanszéke is aktívan foglalkozik a 3D-nyomtatás katonai felhasználásának kutatásával. A Haditechnikai Tanszék a képzésébe is beépítette a szakrajz- és géprajztémájú tantárgyak tananyagába a 3D modellezés (CAD) alapjait, illetve a hallgatókat ösztönzi a tudományos versenymunkák 3D-modellezés- és -nyomtatás-alapú kivitelezésére és elkészítésére. Ennek a tevékenységnek jó alapot biztosít a tanszékek többéves pályázatokon alapuló eddigi kutatási munkája. A 3D modell elkészítése, az anyagválasztás és a szeletelőprogram beállítása olyan ismereteket igényel, amelyek oktatását a diákoknak a tanszék megkezdte.

Technológiai portfólió és kutatási fókusz

Az NKE HHK-n jelenleg három tanszék kutatja az AM-technológiák felhasználási lehetőségeit, a kutatási igényeknek megfelelő mértékben kooperálva. A Haditechnikai Tanszék rendelkezik a legszélesebb portfólióval, mivel FDM- (műanyag és kompozit) és ADAM-technológiájú fémnyomtatási képességekkel egyaránt rendelkezik.

Az FDM-alapú műanyag- és kompozitnyomtatási lehetőségek kutatása azok elterjedtsége és az esetleges alkalmazáskor relatív alacsony infrastrukturális igénye miatt mondható ideálisnak. A kadétek gyorsan elsajátíthatják a szükséges műszaki alapokat, pedagógiai szempontból kifejezetten előnyös, hogy rövid idő alatt lehet pozitív tapasztalatokat szerezni, és a tervezési, előkészítési, illetve nyomtatási folyamatok problémás területei jól detektálhatók.

Biztonsági szempontok és technológiaválasztás

A fém alapanyagú 3D-nyomtatás kutatása és oktatása olyan technológiát követel meg, amely esetében a biztonság nagyobb hangsúlyt kell hogy kapjon. Az ADAM- és az SLS-technológiát ezért célszerű volt összevetni.

Az ADAM-technológia az alkalmazott Markforged Metal X rendszerrel ki-küszöböl több olyan tényezőt, amely a már említett előkészítési és nyomtatási folyamatokban játszik szerepet. A nyomtatási paramétereket felhőalapú rendszerben határozzák meg, és ezáltal a munkadarab struktúrája, anyagának homogenitása stabilabb lesz.

Oktatási alkalmazások

Kiemelt figyelmet kapott a 3D-nyomtatás oktatásban betölthető szerepe, mivel a kadétek bevonásával az oktatást segítő eszközök nyomtatására is lehetőség van. A Haditechnikai Tanszék AM-technológiát célzó kutatási tevékenysége során nagy hangsúlyt fektet a műveleti területen alkalmazható nyomtatási eljárásokra (Kovács et al. 2024).

Eredmények és következtetések

Az ADAM-technológia főbb megállapításai

Az ADAM fémnyomtatási eljárás képes komplex geometriák és zárt cellás belső szerkezetű gépelemek gyártására, magas és alacsony olvadáspontú fémek nyomtatására, valamint az alapanyagok gyors cseréjére. Az ADAM-technológia szinterezési

fázisa során a nyomtatott rétegek homogén anyagú termékévé olvadnak össze, lényegében minden irányban azonos szilárdsági jellemzőket garantálva.

A kompozit technológia előnyei

A kombinált – vágott rövidszálú, emellett folyamatos szálfektetésű – szálerősítéses kompozit műanyag-alkatrészek nyomtatása lehetőséget teremt egyes fém alkatrészek szálerősítéses kompozitra cserélésére. Az alkatrészek műanyag 3D-nyomtatott alkatrésszel történő pótlása előnyös a kisebb szerkezeti tömeg, az alacsonyabb gyártási költség, a fém alkatrész 3D-nyomtatásához képest csekélyebb gyártási idő, illetve a kedvező korrózióval szembeni ellenálló képesség miatt.

Gyakorlati alkalmazási eredmények

A 3D-nyomtatott, folyamatos üvegszál-, illetve rövidre vágott szénuszál-erősítéses, nagy szilárdságú, hőálló Onyx poliamid kompozit alkatrész – gépjármű-hűtőrendszerbe kísérletileg beépített hűtőfolyadékcső – hő- és vegyi anyag-állósága, hőterheléssel és rezonanciával szembeni ellenálló képessége alkalmassá tette a fém hűtőcső pótlására. Az alkatrésszellátást még távoli térségekben, missziókban is biztosítani lehet a műveleti alkalmazás során, illetve a rendszerben tartás ideje alatt 3D-nyomtatással.

A gyakorlati megvalósítás eredményei

Az NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszéken a gépelemek 3D-nyomtatásának végrehajtása során különböző fém alapanyagok felhasználásával elkészített legfontosabb alkatrészek a következők voltak: 220 darab fém próbatest, köztük 33 darab 17-4PH Stainless Steel V1 anyagú kocka, fém fogaskerékpár (D2 szerszámacél), valamint különféle fém tartó- és csatlóelemek (17-4PH Stainless Steel V1 anyagból, üreges kitöltéssel nyomtatva).

Több mint 200 darab próbatest készült el. Elmélyült kompetencia alakult ki a Markforged Eiger szoftverének kezelésében, valamint az ADAM nyomtatási technológia alkalmazásában. Vizsgálták a topológiai optimalizálás és a generatív tervezés lehetőségeit.

Összegzés

A tanulmány egyes korszerű AM-technológiák és alkalmazási lehetőségeik, tapasztalataik vizsgálatára vállalkozott a logisztika területén. A kutatás során megállapították, hogy mind az ADAM fémnyomtatási technológia, mind a folyamatos szálerősítéses kompozit nyomtatása jelentős potenciállal rendelkezik a katonai alkalmazások területén.

Az ADAM-technológia különösen alkalmas komplex geometriájú, hőálló fém alkatrészek gyártására, míg a kompozit technológia lehetőséget teremt költség-hatékony, könnyű alternatívák előállítására. Mindkét technológia hozzájárulhat a katonai logisztika hatékonyságának növeléséhez, különösen távoli műveleti területeken történő alkalmazás esetén.

A katonai oktatásban betölthető szerep szintén jelentős, mivel ezek a technológiák új kompetenciák elsajátítását teszik lehetővé a jövő katonai szakemberei számára. Az NKE HHK kutatási eredményei azt mutatják, hogy a magyar katonai felsőoktatás képes lépést tartani a nemzetközi fejlődéssel ezen a területen.

RESULTS OF 3D PRINTING RESEARCH AT THE LUPS FMSOT DEPARTMENT OF MILITARY TECHNOLOGY

This paper presents the research results of the Department of Military Technology at the Military Logistics Institute, Faculty of Military Science and Officer Training, Ludovika University of Public Service (LUPS FMSOT), which are related to additive manufacturing technology, primarily in the field of military logistics. The aim of the research conducted by the Department of Military Technology at the Military Logistics Institute, Faculty of Military Science and Officer Training at the University of Public Service is to investigate the application possibilities of additive manufacturing technology in military logistics, industry, and military-technical higher education. The research examined the potential of 3D printing of metals, plastics, fiber-reinforced composites, and the application of Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) metal printing technology. The studies covered the applicability of 3D printing for the production and replacement of components for vehicles and UAVs, such as brackets, gears, and planetary gears. The design and 3D printing of wave drive systems, mainly used in robotics, and the assembly of robotic vehicles were also investigated. The department introduced Autodesk Fusion 360-based 3D modeling education and implemented practical printing education in two 3D printing laboratories for BSc students, PhD and Erasmus researchers, and Horizon Europe applicants in the military-technical higher education

at LUPS FMSOT. The researchers also discussed their research experiences at meetings of the European Defence Agency (EDA).

Keywords: Department of Military Technology, 3D printing, additive manufacturing, military logistics, military-technical higher education

Felhasznált irodalom

- 1393/2021. (VI. 24.) Korm. határozat Magyarország Nemzeti Katonai Stratégiájáról.
- 3rd European Military Additive Manufacturing Symposium (2025). *European Defence Agency*, 2025. február 19. Online: www.eda.europa.eu/news-and-events/events/2025/04/08/default-calendar/3rd-european-military-additive-manufacturing-symposium
- BADIRU, Adedeji B. – VALENCIA, Vhance V. – LIU, David (2020): *Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry*. [H. n.]: Routledge – CRC Press.
- CLEMENS, M. (2022): The Use of Additive Manufacturing in The Defense Sector. *3Dnatives*, 2022. június 30. Online: www.3dnatives.com/en/the-use-additive-manufacturing-defense-sector300620224
- Composites (2023). Markforged. Online: <https://admasys.hu/wp-content/uploads/2024/09/Markforged-kompoziti-3d-nyomatatas-alapanyagok-muszaki-adatlapja.pdf>
- DARUKA Norbert et al. (2024a): A 3D nyomtatási képesség kialakításának lehetőségei és korlátai a Magyar Honvédségben. *Hadtudomány*, 34(E-szám), 27–39. Online: <https://doi.org/10.17047/Hadtud.2024.34.E.27>
- DARUKA Norbert et al. (2024b): A 3D-nyomtatási technológia oktatásának lehetőségei és feltételei a műszakitiszt-képzésben. *Műszaki Katonai Közöny*, 34(1), 5–18. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.1.1>
- European Military Additive Manufacturing Symposium* (2021). Die Deutsche Gesellschaft für Wehrtechnik e.V. Online: www.veranstaltungen.dwtsgw.de/anlage?i=3266&c=GZNvHVIKHEb-TUFx&n=000025_programme.pdf
- GÁVAY György (2023): Logisztikai járművek alkatrészpótlása 3D nyomtatási technológia alkalmazásával. *Katonai Logisztika*, 31(3–4), 208–232. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-3-4-208>
- GYARMATI József (2023): Lánctalpas jármű kormányzása és ennek 3D modellezése. *Műszaki Katonai Közöny*, 33(3), 51–61. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.3.5>
- GYARMATI József – HEGEDŰS Ernő – GYÖRGY GÁVAY (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó. Harkocsi-sebességváltó modell kialakítása 3D nyomtatással oktatási célból. *Műszaki Katonai Közöny*, 32(3), 113–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.7>
- HATOS István et al. (2024): Effect of Energy Density on the Mechanical Properties of 1.2709 Maraging Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Materials*, 17(14), 3432. Online: <https://doi.org/10.3390/ma17143432>
- HEGEDŰS Ernő et al. (2024): Topológiai optimalizálás, generatív tervezés és a 3D-nyomtatás. Az additív gyártástechnológia ipari alkalmazhatóságának vizsgálata. *Műszaki Katonai Közöny*, 34(2), 141–154. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.2.10>
- HILDEBRAND, Christfried (1977): *Műanyagok az építészetben*. Budapest: Műszaki.

- Into the 3rd Dimension | 3rd MLG Marines create metal parts using a 3D printer (2020). *DVIDS*, 2020. március 17. Online: www.dvidshub.net/image/6144131/into-3rd-dimension-3rd-mlg-marines-create-metal-parts-using-3d-printer
- KOVÁCS Zoltán et al. (2024a): Harctéri 3D-nyomtatók alkalmazási lehetőségei és alapvető technikai követelményei. *Hadtudományi Szemle*, 17(2), 5–15. Online: <https://doi.org/10.32563/hsz.2024.2.1>
- KOVÁCS Zoltán et al. (2024b): Kitöltési mintázatok a 3D-nyomtatásban és azok hatása az alkatrész tulajdonságaira. *Hadmérnök*, 19(2), 29–48. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2024.2.3>
- MOLITCH-HOU, Michael (2020): Metal X 3D Printer Begins Operations at U.S. Military Base. *3DPrint.com*, 2020. február 7. Online: www.3dprint.com/263151/metal-x-3d-printer-begins-operations-at-u-s-military-base
- RADZUAN, Nabilah Afiqah Mohd et al. (2023): Mechanical Analysis of 3D Printed Polyamide Composites under Different Filler Loadings. *Polymers*, 15(8), 1846. Online: <https://doi.org/10.3390/polym15081846>
- RÁKOSI Sára et al. (2023): A 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(1), 133–148. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.1.10>
- SZEDERKÉNYI Balázs et al. (2022): Additív gyártástechnológiával készített, folytonos szállal erősített kompozitok szimulációs elemzése. *Gép*, 73(3–4), 82–87. Online: https://www.pt.bme.hu/publikaciok/1535_open_Szederkenyi_et_al_GEP_2022.pdf
- TOLD Roland et al. (2021): Manufacturing a First Upper Molar Dental Forceps Using Continuous Fiber Reinforcement (CFR) Additive Manufacturing Technology with Carbon-Reinforced Polyamide. *Polymers*, 13(16), 2647. Online: <https://doi.org/10.3390/polym13162647>
- TÓTH Csenge – KOVÁCS Norbert Krisztián (2020): Characterization of Short Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composites Produced with Fused Filament Fabrication (FFF). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 903, 012031. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012031>
- VÉG Róbert (2023): A 4D nyomtatás és az okosanyagok alkalmazásának lehetőségei. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(4), 77–89. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.4.6>
- VÉG Róbert et al. (2024): Bepattanó kötések helye, szerepe, valamint 3D-nyomtatási technikával történő előállításának lehetősége a haditechnikában. *Hadmérnök*, 19(1), 21–40. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2024.1.2>
- VÉGVÁRI Zsolt (2023): A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában. *Katonai Logisztika*, 31(1–2), 177–198. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-1-2-177>
- VÉGVÁRI Zsolt (2024): Optikai elemek 3D-nyomtatással történő előállításának lehetőségei. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(2), 115–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.2.8>
- VÉGVÁRI Zsolt – HEGEDŰS Ernő – ZENTAY Péter (2022): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I. rész. *Haditechnika*, 56(6), 56–60. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.09>

