

Végyári Zsolt¹

A 3D NYOMTATÁS FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI A MŰVELETI LOGISZTIKÁBAN

USAGE POSSIBILITIES OF 3D PRINTING IN OPERATIONAL LOGISTICS

[HTTPS://DOI.ORG/10.30583/2023-1-2-177](https://doi.org/10.30583/2023-1-2-177)

Absztrakt

Az additív gyártástechnológia, ezen belül is a 3D nyomtatás ma már nélkülözhetetlen az iparban. A módszer teret nyert a haditechnikai eszközök gyártásánál is, de ennél sokkal többet is kínál a katonai alkalmazás szempontjából. A technológia felhasználható a haditechnikai eszközök üzemeltetésére és javítására, akár műveleti területen is.

Kulcsszavak: 3D nyomtatás, additív gyártástechnológia, műveleti logisztika

Abstract

Additive manufacturing technology, including 3D printing, is now indispensable in the industry. It has also gained ground in the production of military equipment, but it offers much more than that in terms of military applications. The technology can be used to maintain and repair military equipment, even in the field of operations.

Keywords: 3D Printing, Additive Manufacturing; Operational Logistics

A 3D nyomtatás katonai alkalmazásának lehetőségei

Napjainkra az additív gyártástechnológia és azon belül a különféle 3D nyomtatási eljárások már szerves részét képezik a mindennapoknak. Az ipar és a szolgáltatói szektor bizonyos részei már jó ideje

¹ Végyári Zsolt, Vegvari.Zsolt@uni-nke.hu

komolyan profitálnak ezekből a viszonylag új technológiákból, de a honvédelmi szektor sem mellőzheti ezeket. A 3D nyomtatás katonai alkalmazására az alábbi lehetőségek kínálóznak [1]:

1. gyors prototípus előállítás, egy fejlesztési folyamat részeként;
2. komplex geometriájú alkatrészek Additive Manufacturing (anyagfelrakáson alapuló) sorozatgyártása;
3. kis darabszámú vagy egyedi alkatrészgyártás;
4. gyártó által már nem támogatott eszközök üzemidejének meghosszabbítása;
5. műveleti területen történő javításhoz pótalkatrész-előállítás.

Amint látható, a felsorolás első négy eleme a gyártástechnológia szempontjából nem tartalmaz semmilyen különleges katonai követelményt, mivel azok a haditechnikai K+F, illetve a hadiipari termelés egyes funkcióihoz kapcsolódnak, amelyek részei a logisztikai támogatásnak, de nem tartoznak a műveleti logisztika területéhez.

Gyors prototípusgyártás

A gyors prototípus-előállítás manapság már teljesen általánosan alkalmazott módszer a kutatás-fejlesztés során, hiszen ez a folyamat alapvetően béke körülmények között vagy legalábbis a hátszágban történik. A legtöbb hadsereg esetében a K+F feladatok többségét már nem is katonák végzik, hanem a hadiipar és az akadémiai szektor a hadsereg igényeinek (és megrendelésének) megfelelően [2]. Ennek a trendnek megfelelően mára a Magyar Honvédségnél is csak minimális „saját” K+F tevékenység zajlik, azok alapvetően kutatási szerződések formájában kihelyezésre kerülnek az adott területen releváns vállalkozásokhoz, illetve esetenként nemzetközi együttműködés keretében, pl. Európai Védelmi Ügynökség², Európai Védelmi Alap³) valósulnak meg.

A haditechnikai K+F tevékenységeket közel 100 évig a méltán ismert Haditechnikai Intézet folytatta. E szervezet jogutódjai ma már csak a Magyar Honvédség (tehát nem HM tárca) szintű K+F tevékenységek koordinálásáért, menedzseléséért felelősek. A kézirat leadását nem sokkal megelőzve fejeződött be az MH átszervezése, amelynek keretén belül a K+F+I tevékenységet koordináló MH Modernizációs Intézet, mint önálló költségvetési szerv megszűnt és igazgatóságként (de a korábbi

² European Defense Agency – EDA

³ European Defense Fund – EDF

tevékenységet jogfolytonosan végezve) beolvadt az MH Haderőmodernizációs és Transzformációs Parancsnokságba (MH HTP).

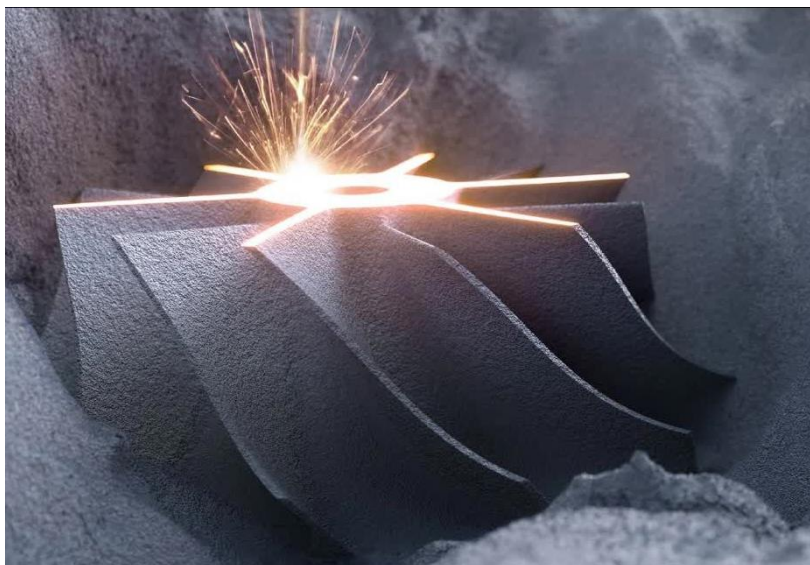
Az MH HTP (illetve jogelődjeként az MH MI) számos hazai fejlesztés, valamint nemzetközi együttműködés lebonyolításáért felelős, illetve a haderőfejlesztés több tárcaszintű feladatában biztosítja a szakmai felügyeletet. Ugyanakkor ezek során jellemzően egy konkrét végtermék (tanulmány, technológiai demonstrátor, prototípus, 0-széria vagy sorozatgyártott eszköz) előállítását egy külső partner (vállalkozás, egyetem, konzorcium) végzi, az MH megrendelésére. Az ilyen típusú szerződések teljes lebonyolítását az MH HTP (MH MI) végzi, ideértve a követelmények támasztását is. Ugyanakkor a megrendelő többnyire nem írja elő, hogy a kutatást kivitelező milyen gyártástechnológiát alkalmazzon a fejlesztésközi mintadarabok és/vagy a végtermék legyártása során [2], ezt a szerződött partner gazdasági és/vagy technológiai szempontok alapján maga döntheti el.

Komplex geometriájú elemek sorozatgyártása

Hasonló a helyzet a szériagyártásnál is. Ilyenkor általában egy bizonyos mennyiségű eszköz, részegység, alkatrész legyártását rendeli meg az MH az egyik beszállítójától. Itt a gyártástechnológia többnyire adott, hiszen a cég kész gyártási dokumentáció birtokában indítja a gyártást, akár ő fejlesztette azt a bizonyos eszközt, akár nem. Amennyiben gazdasági vagy bármilyen egyéb okból esetleg át szeretne térni valamilyen additív technológiára, pl. 3D nyomtatásra [3], akkor ezt a szerződés tartalmának megfelelően az MH jóváhagyásával vagy akár anélkül is megteheti, amennyiben a késztermék megfelel valamennyi, korábban megfogalmazott és rögzített megfelelőségi kritériumnak.

Komplex eszközök esetében a jellemzően külföldi gyártó gyakran előzetes jelzés nélkül is cserél egy-egy alkatrészt vagy részegységet, amelyhez minden joga megvan, hiszen az MH, mint megrendelő általában csak blackbox⁴-minőségellenőrzést végezhet. Sokszor még a megvásárolt eszköz belső működésével sincs teljesen tisztában a megrendelő, nemhogy az alkalmazott gyártástechnológiával, vagyis ebben az esetben is megvan a szerződött partner szabadsága a leginkább megfelelő gyártástechnológia kiválasztását illetően.

⁴ Az adott elemnek csak bizonyos vizsgálati paramétereknek kell megfelelnie, az nem fontos, hogy ez milyen módon történik.



1. számú ábra. SLS⁵ technológiával készülő turbinalapát [4]. Szubsztraktív (anyagleválasztásos) technológiával, például forgácsolással nagyon nehéz egy ilyen formát elkészíteni

Egyedi vagy kis darabszámú alkatrész gyártása

A kis darabszámban szükséges vagy egyedi gyártmányokat sem jellemzően a haderők állítják elő saját maguk számára, hanem arra is szerződnek. Ha rendelkezésre áll a gyártási dokumentáció, akkor egy egyszerű megrendelés keretében, ha gyártmányfejlesztés is szükséges, akkor kutatási szerződés keretében, de szinte minden esetben külső partner végzi a gyártást, a saját, de a megrendelő által akkreditált minőségbiztosítási rendszerének keretén belül.

Pótalkatrész előállítás a üzemidő-hosszabbításhoz

Ezt a kört bővíti a gyártói támogatással már nem rendelkező haditechnikai eszközök üzemidejének meghosszabbítása is. A Magyar Honvédség, illetve számos szomszédos ország esetében itt jellemzően még a Varsói Szerződés időszakából visszamaradt gyártmányokról van szó, amelyek gazdasági vagy egyéb okokból nem kiválthatóak egy újabb eszközzel, így azok (akár a tervezett időt meghaladó) további alkalmazása nemzetbiztonsági érdek. Számos ilyen eszközhöz politikai okok miatt nem lehetséges az eredeti alkatrész biztosítása, de az is gyakori, hogy az adott gyár időközben már meg is szűnt. Ha

⁵ Selective Laser Sintering: szelektív lézeres szinterelés (vagy zsugorítás vagy olvasztás).

rendelkezésre áll a gyártási dokumentáció, akkor visszakanyarodtunk az egyszerű megrendeléshez. Ha nincs ilyen vagy az eszközt nem meglévő formájában, hanem modernizálva kívánja tovább használni az adott haderő, akkor K+F tevékenység is szükséges, de az eljárásrend akkor is a korábban részletezett módok valamelyike.

Jelen felsorolásban azért képez külön kategóriát, mert más megfontolások alapján kerülhet alkalmazásra a 3D nyomtatás, illetve ebben az esetben komoly szerepet kaphat egy, jellemzően a 3D nyomtatástechnológia részét képező eljárás, a 3D szkennelés. Leggyakrabban lézert használva lehet letapogatni egy tárgy felületét, és létrehozni annak méretpontos 3D modelljét, de ahol fontos a belső szerkezet, ott rendelkezésre áll a röntgensugarakkal operáló ipari CT⁶ berendezés is. Ezekkel a módszerekkel gyártási dokumentáció hiányában is előállítható a 3D modell.

A fentiek közül egyik eset sem támaszt az előállítás szempontjából különleges katonai követelményeket. Az additív gyártástechnológia esetleges alkalmazása egy racionális döntési folyamat eredménye, de a 3D nyomtató - akár egy hagyományos CNC eszterga - egy cég telephelyén üzemel, és az, hogy a végtermék katonai célra készült, az alkalmazott gyártástechnológia szempontjából irreleváns.

3D nyomtatás műveleti területen

A fentiekén túl az additív gyártástechnológia, illetve ezen belül a 3D nyomtatás, egy egészen új lehetőséget is felvet. Kimondottan katonai műveleti környezetben (tehát nem ideértve a haderő határvédelmi vagy katasztrófaelhárítási alkalmazását) egy honi, vagy akár nem honi területen folyó fegyveres konfliktus vagy missziós szerepvállalás során viszont a 3D nyomtatás egészen új távlatokat nyit a katonai logisztika területén. Ha egy fegyveres konfliktus során megsérül, elromlik, vagy csak eltűnik egy eszköz, és azt az adott katonai egység saját készletből nem tudja pótolni, akkor csökken a harcértéke. A legtöbbször persze valamelyik raktárbázisban van pótalkatrész, de ennek műveleti területre juttatása nem triviális. Közismert, hogy minden katonai művelet Achilles-sarka az utánpótlás. Az ellenség (legyen az reguláris hadsereg vagy gerilla haderő) előszeretettel támadja a logisztikai támogatás útvonalait. Egy missziós szerepvállalás esetében kisebb a kockázat,

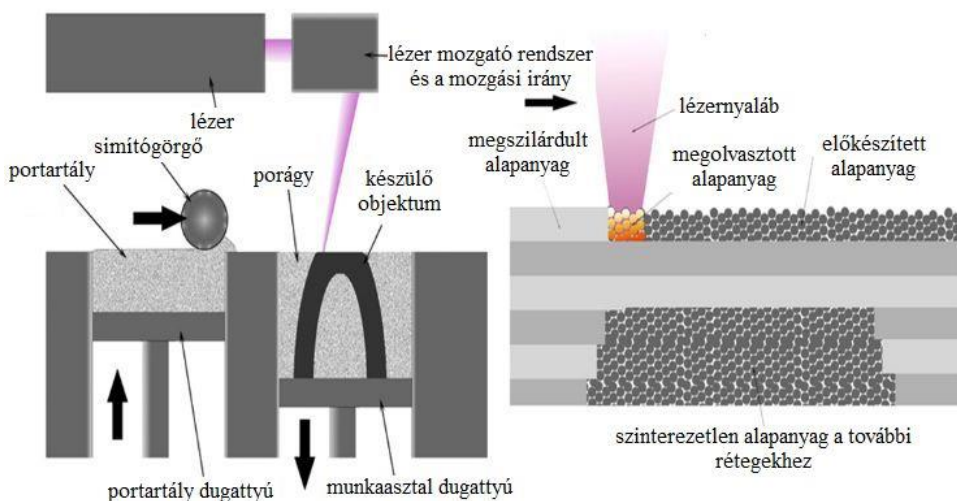
⁶ Komputertomográf

de akkor is hosszú ideig tart és többnyire rendkívül költséges, hogy egy cseredarab a hátországi raktárból eljusson az első vonalba. Persze mindennek csak akkor van jelentősége, ha az adott katonai szervezet javító alegysége egyébként képes az alkatrészcsereére. Amennyiben igen, akkor a hosszú logisztikai lánc problémájára elvben megoldás lehet az in situ 3D nyomtatás [3], de a tényleges kivitelezés számos kihívást rejt.

A 3D nyomtató elvben tehát lehetne egy olyan logisztikai „svájci bicska”, amelynek segítségével a meghibásodott vagy hiányzó alkatrészek egy része magánál a felhasználó alakulatnál, akár műveleti területen is előállítható lenne. Ezzel elvben jelentősen lecsökkenne az alkatrész rendelkezésre állásának ideje, másrészt csökkenne a logisztikai ellátólánc terhelése is. Ez tulajdonképpen a digitális raktár [5] koncepciójának átültetése katonai környezetbe, amely rendkívül vonzó lehetőség; nem véletlen, hogy a nemzeti haditechnikai K+F tevékenységeken túl, a Magyarországot is a tagjai közt tudó EDA [6] és a NATO Kutatás-Fejlesztési Szervezete⁷ [7] is a zászlójjára tűzte. Ugyanakkor a 3D nyomtatótechnológia elhelyezése a műveleti logisztika rendszerében, vagyis egy 3D nyomtató üzemeltetése egy katonai alakulatnál egyáltalán nem kézenfekvő, hiszen a mai napig nincs róla információ, hogy ez egy pilot-projektnél magasabb szinten bárhol megvalósult volna. Vegyük hát számba, hogy melyek azok a tényezők, amelyek miatt még nincs ott az első lépcsős alakulatok felszerelésjegyzékében a 3D nyomtató, illetve vizsgáljuk meg, hogy van-e lehetőség a korlátozó tényezők kiküszöbölésére a belátható jövőben.

Ennél a pontnál érdemes arra kitérni, hogy a műanyagalapú 3D nyomtatók mára óriási fejlődésen mentek keresztül, így az első modellekhez képest a jelenleg elérhető berendezések jóval kisebbek, gyorsabbak és pontosabbak. Ugyanakkor a haditechnikai eszközök rendkívül mostoha üzemeltetési környezethez lettek tervezve, a hasonló polgári eszközöknél szignifikánsan kevesebb műanyagot tartalmaznak, és azok minősége (környezetállósága) is igen magas. Így szinte nincs is olyan példa, amikor egy műanyag alkatrész hiánya tesz használhatatlanná egy katonai eszközt. Tehát a műveleti környezetben végzett, logisztikai támogatási célú 3D nyomtatás alatt 99%-ban fémm nyomtatást kell érteni. Ez pedig jelenleg még egy kevésbé kiforrott terület, ahol számos kompetitív technológia van jelen a piacon, illetve áll még fejlesztés alatt.

⁷ NATO Science & Technology Organization – NATO STO



2. számú ábra. A DMLS rendszerű fémnyomatók egyszerűsített működési elve (a szerző szerkesztése [8] alapján)

A 3D nyomtatók műveleti területen történő alkalmazásának korlátozó tényezői

A problémák megértéshez vegyünk alapul egy jelenleg igen elterjedt fémnyomató típust, és ennek műszaki és üzemeltetési paraméterei alapján vizsgáljuk meg, hogy miként lehetne ezt az eszközt a műveleti logisztikai támogatás eszköztárába vonni. Legyen ez az eszköz az ismert német EOS cég terméke, az M sorozat. Az EOS egyike a legtapasztaltabb fémnyomatókat gyártó és forgalmazó cégeknek. Az EOS nyomtatók már is Magyarországon legalább egy évtizede elérhetők, és jelenleg is számos helyen, autógyárakban, egyetemeken üzemelnek megbízhatóan. A EOS cég termékei nem hobbieszközök, minden olyan sajátossággal rendelkeznek, amely lehetővé teszi, hogy professzionális környezetben is egy termelési folyamatot alapozzanak rájuk.

Az EOS M sorozat egy DMLS⁸ technológiájú eszköz, amely jelenleg a legelterjedtebb az ipari fém 3D nyomtatási technikák között. Itt a nyomtató egy vékony (0,01-0,04 mm) porréteget terít a munkaasztalra a választott fém alapanyagból, amelyet aztán nagy teljesítményű lézerrel vagy lézerekkel megolvaszt a szeletelő program által meghatározott pontokon. Ezután a munkaasztal lesüllyed, és egy következő

⁸ Direct Metal Laser Sintering – Közvetlen Lézeres Fémolvasztás

rétegben is megtörténik a szinterezés. A nyomtatási folyamat végén el kell távolítani a fel nem használt (meg nem olvasztott) fémport és kiemelni a kész elemet. Az alábbi táblázat tartalmazza az M sorozatú EOS nyomtatók főbb paramétereit.

AZ EOS M SOROZATÁBA TARTOZÓ, DMLS TECHNOLÓGIÁJÚ IPARI
FÉMNYOMTATÓK FŐBB ADATAI

1. számú táblázat

	M 100	M 290	M 300-4	M 400
tömeg (kg)	580	1250	5 500	4 635
méret (m)	0,8x0,95x2,25	2,5x1,3x2,19	5,22x2,68x2,34	4,18x1,61x2,35
telepítési helyigény (m)	1x3x2,5	4,8x3,6x2,9	8,8x5,2x3,5	6,5x6,0x3,3
átlagos teljesítményigény (kW)	0,6	2,4	26	16,2
maximális teljesítményigény (kW)	1,7	8,5	36	50,2
lézerteljesítmény (W)	200	400	4x400	1000
maximális tárgyméret (mm)	100 ⁹ x95	250x250x325	300x300x400	400x400x400
inertgázigény (l/perc)	500	330	250	330

(a szerző szerkesztése [9] alapján)

Tömeg és kiterjedés

Az M 300-4 típusú 4 lézeres konfiguráció igényli a legtöbb helyet. Teljes tömege a hozzátartozó kiegészítő berendezésekkel (3D szkenneregység, gáztartály, porkezelő eszközök) több, mint 5500 kg. A berendezés teljes kiterjedése 5 221 x 2 680 x 2 340 mm, és a telepítéshez javasolt minimális tér kb. 8 800 x 5 200 x 3 500 mm). Mivel a katonai műveletek dinamikusak, a nyomtató csak olyan platformon helyezhető el, amely lehetővé teszi a gyors áttelepülést. Erre a fix teherautó-felépítményeken kívül gyakorlatilag csak a konténerek alkalmasak. Az alábbi táblázat tartalmazza a katonai alakulatok által is széles körben használt szabványos ISO 20 és 40 lábas konténerek főbb jellemző adatait.

⁹ Az M 100 nyomtató maximum 10 cm átmérőjű köralapra képes nyomtatni.



2. számú ábra. Egy jól képzett EOS M 300-4 típusú ipari 3D nyomtatóállomás [10]. Ezek a gépek a műanyag nyomtatókkal szemben nem férnek el egy asztalon

A SZABVÁNYOS 20 ÉS 40 LÁBAS SZÁLLÍTÓKONTÉNEREK FŐBB PARAMÉTEREI

2. számú táblázat

típus	hossz (mm)	szélesség (mm)	magasság (mm)	önsúly (kg)	terhelhetőség (kg) ¹⁰
10 lábas	3 050	2 438	2 591	1 250	9 000
20 lábas	6 058		2 591	2 250	25 000
20 lábas magasított			2 896	2 350	
40 lábas			12 192	2 591	3 750
40 lábas magasított	2 896			3 900	

a szerző szerkesztése [11] alapján

¹⁰ Típusonként eltérő lehet, kb. 1700 kg/m²



3. számú ábra. A Magyar Honvédségnél rendszeresített Rába MAN H25 konténerszállító terepjáró tehergépkocsi egy 20 lábás szabványkonténer szállítására alkalmas [12]

A táblázattal összevetve látható, hogy még a legkisebb, M 100 modell sem fér el egyetlen 20 lábás konténerben, a különféle részegységei a telepítési ajánlásokat figyelmen kívül hagyva valószínűleg elhelyezhetőek lennének kettő 20 lábásban. Az M 300 és M 400 modelleket már jelentősen át kellene szabni, hogy két 40 lábás vagy három-négy 20 lábás konténerben elhelyezhetőek legyenek. Itt azt is figyelembe kell venni, hogy a 40 lábás konténerek közúton jobbra csak nyergesvontatókkal szállíthatók, terepjáró konténerszállító tehergépjárművekkel a Magyar Honvédség (és a haderők többsége) is csak a 20 lábás konténerekhez rendelkezik.



4. számú ábra. A MAN HX32 szintén egy 20 lábás konténert szállít, de azt a Hammer 190 HB típusú oldalrakodó segítségével önállóan képes le- és felrakodni [12]

Mindezekhez képest a nyomtatókban előállítható nyomat legnagyobb mérete $7-64 \text{ dm}^3$ között változik. A tárgyasztal által mozgatható tömegre a gyártó nem közöl adatot, de ha a fenti mérettartományban csak egyszerű rozsdamentes (304-es acél) acéltömböket állítanánk elő (ennek természetesen semmi értelme nem lenne), azok tömege az M 100-nál kb. 50 kg-ra, míg az M 400-nál kb. 500 kg-ra adódna, amelyet nem valószínű, hogy kezelni tudnának ezek a berendezések; jóval valószínűbbek az 5-50 kg körüli maximális tömegű nyomatok. Vagyis látható, hogy a meglehetősen terjedelmes és súlyos 3D nyomtatókkal csak viszonylag szerény méretű és tömegű nyomatok készíthetők.

Gyártási sebesség

Persze a gyártáshoz felhasznált eszköz és a gyártmány méret- és tömegaránya önmagában nem jelent túl sokat, hiszen az hasonló a hagyományos szubsztraktív megmunkáló eszközök (esztergák, forgácsolók) esetében is. Viszont a termelékenységben már óriási különbségek vannak ez utóbbiak javára. A gyártmány komplexitásától függően egy CNC esztergának mindössze pár percre van szüksége egy-egy példány előállításához, addig ez a DMLS technológiánál órákban mérhető.



4. számú ábra. A tömeggyártáshoz használt esztergaközpont jelenleg még verhetetlen sebességet biztosít [13]

Míg a szubsztraktív megmunkálásnál a megmunkálás ideje szinte csak a gyártmány bonyolultságától függ, addig az additív eljárásnál azt elsősorban a szükséges anyag mennyisége határozza meg, illetve

nagyban befolyásolja a fém típusa (mennyi ideig kell a lézernek megvilágítani, hogy megolvadjon), illetve az alkalmazott felbontás. Példaként egy hagyományos lövedék tömör kúpos felületének kialakítása egy esztergával alig néhány másodperc. Mindeközben az EOS M nyomtatóknál, amelyek a kategóriájukban kimondottan gyorsnak tekinthetők, az elérhető maximális sebesség alig $0,1 \text{ dm}^3$ óránként.

Az additív technológia egyik nagy hátránya még, hogy ha az egyébként is igen hosszú nyomtatási folyamat pl. áramszünet miatt megszakad, a legtöbb esetben nem lehet újraindítani azt. A DMLS technológiánál, ha a fémfelület egyszer lehűlt, és azt újból felhevítjük, az szilárdsági problémákat, csaknem biztosan törést okoz [14].

Energia

A hagyományos megmunkálóeszközök teljesítményigénye sem csekély, de látható, hogy a DMLS technológia (és jellemzően az összes fémolvasztáson alapuló eljárás) teljesítményfelvétele egészen brutális. Egy átlagos háztartás átlagos pillanatnyi villamos teljesítményfelvétele kb. 0,3 kilowatt¹¹, addig az EOS nyomtatóknál a minimum érték ennek duplája, míg a maximum akár kétszázszorosa is lehet, vagyis egy komoly EOS M berendezés energiaigénye akár egy kisebb településével is vetekedhet. Ekkora mennyiségű villamos energia biztosítása, ráadásul szünetmentes módon, tábori körülmények között nem egyszerű, hiszen az csaknem kizárólag dízelüzemű aggregátorokkal kerül előállításra.

Utómegmunkálás

A 3D nyomtatott fémalkatrészek felületének minősége általában még a legnagyobb felbontással (vagyis a leglassabban) készítve sem éri el a kívánt értéket (vagyis a szubsztraktív technológiával előállított alkatrészek minőségét). Tehát utólagos megmunkálásra van szükség, amely többnyire valamilyen csiszolásjellegű eljárást jelent: kézi vagy gépi csiszolást, polírozást, esetleg nagy nyomású levegős, folyadékos „tisztítást”, illetve vibrációs vagy egy újabb lézer energiájának felhasználását [15]. Ennek idő- és energiaigénye még hozzáadódik a tényleges nyomtatás idejéhez. Ha az alapanyag edzhető acél, akkor a gyártástechnológiától függetlenül el kell végezni az edzést is. Ha ettől, illetve a csiszolástól eltekintünk, akkor a DMLS esetében nincs további munkafolyamat, a fel nem használt por egyszerűen lefújható a

¹¹ Az MVM által megadott átlagos áramfelhasználási hely 2503 kWh/év értékkel számolva

gyártmányról. Viszont léteznek olyan additív technikák, ahol a nyomtatás végén még van egy technológiai lépés, amely szükséges a végleges anyagminőség biztosításához. Egyes műanyagokat pl. UV fényvel szilárdítanak meg, míg az ADAM¹² fémnyomtatási technológia esetében a nyomatból először ki kell oldani az ideiglenes kötést biztosító vegyi anyagot, majd egy kemencében kell kisütni a teljes szilárdság eléréséhez, amely közben a nyomat térfogata is lecsökken.

Minőségbiztosítás

A legtöbb ipari felhasználású fém napjainkban már 3D nyomtatással is megmunkálható. Az EOS nyomtatókhoz több, mint 40 féle fémalapanyag használható. A teljesség igénye nélkül: a hagyományos rozsdamentes acél-, edzhető acél-, szerszámacél-, alumínium-, réz-, bronz-, titán-, kobalt-króm- és nikkelötvözetek, illetve nemesfémek a legtöbb katonai igényt is kielégítik. Mára alig van, és folyamatosan csökken azon iparban alkalmazott fémek száma, amelyek még nem használhatóak 3D nyomtatásra. Ez tehát nem jelent korlátot a technológia katonai célú alkalmazása során. Viszont fontos, hogy a 3D nyomtatással a legtöbb esetben egy hagyományos öntvény minőségében állíthatóak elő alkatrészek. A kovácsolt alkatrészek jóval magasabb minőséget nyújtanak, amelyet a porolvasztás még nem képes biztosítani. Mind ezen felül minden gépben, berendezésben azok az alkatélemek hibásodnak meg a leggyakrabban, amelyek a legnagyobb igénybevételnek vannak kitéve. Ilyenből számos van a gépjárművekben, míg a fegyveralkatrészek szinte mindegyike ilyen. Tehát, ha 3D nyomtatással kívánunk egy alkatrészt legyártani, akkor előtte vizsgálati úton meg kell bizonyosodni arról, hogy a nyomat megfelel minden olyan követelménynek, amely az eredeti alkatrész esetében előírásra került.

Egyéb technológiai igények

A legátlagosabb acélolvasztás minősége is jobb, ha azt oxigénmentes környezetben végezzük, viszont bizonyos alapanyagok (pl. titán) egyáltalán nem is színterezhetőek ilyenkor, mert az erősen robbanásveszélyes. Vagyis a DMLS nyomtatók a munkateret valamilyen inert gázzal, általában argonnal töltik fel, és tartják azt túlnyomás alatt a nyomtatás teljes folyamata alatt. Mivel a nyomtatási idő hosszú, még erősen komprimált gáz esetében is jelentős mennyiségre lehet szükség, amelynek biztosítása műveleti területen egyáltalán nem triviális.

¹² Atomic Diffusion Additive Manufacturing



5. számú ábra. A fémporok biztonságos kezeléséhez védőfelszerelés szükséges [8]

A DMLS eljárás sajátossága az is, hogy rendkívül finom szemcsés fémpor az alapanyag, amely már önmagában is rendkívül veszélyes tud lenni, nem igazán egészséges a belégzése [8], vagyis mind a portartály feltöltése, mind a nyomtatás után fennmaradó por leszitalása nagy odafigyelést és megfelelő védőfelszerelést igényel. A 3D fémnyomtató helyiségek sztenderd felszerelése a szűrőkkel ellátott klímaberendezés és a nagy teljesítményű ipari porszívó. A fémporok többsége igen érzékeny a nedvességre, így azok tárolására is különleges eszközök szükségesek.

Jogi kérdések

A digitális raktár koncepciójának alapja, hogy a rendelkezésünkre áll a „raktárkészlet” digitális 3D modellje. Még ha valami úton hozzá is jutunk egy alkatrész modelljéhez, fontos kérdés, hogy azt fel lehet-e jogszerűen használni. Az egy külön kérdés, hogy az egyes haditechnikai eszközöknél a felhasználó katonai szervezet rendelkezik-e az ahhoz kapcsolódó szellemi termékekkel. Egy hazai fejlesztésű eszköz esetében a fejlesztési szerződés tartalmától függően ez lehetséges, de egy külföldről vásárolt eszköz esetében szinte biztosan nem rendelkezik azokkal. Márpedig a gyártók többnyire ragaszkodnak az ilyen jogaikhoz, hiszen az alkatrészellátás legalább akkora üzlet, mint az alapanyag eladása.

Személyi feltételek

Ahogy a hagyományos szerszámgépek, úgy a 3D nyomtatók esetében sem egyszerű azok működtetése, az minden esetben komoly

felkészültséget igényel. A fém 3D nyomtatás egy meglehetősen komplex eljárás, maga a nyomtató is kellően bonyolult. Még ha egy, az adott technológiával minőségbiztosított alkatrész, megfelelő modellből történő „rutinszerű” előállításáról is van szó, a 3D nyomtató és a kapcsolódó egyéb berendezések működtetése sokrétű, speciális ismeretet kíván. Egy 3D fémnyomtató professzionális üzemeltetéséhez jelenleg még viszonylag magas szintű informatikai, elektronikai, gépészeti és porkohászati ismeretek kellene, ráadásul azok többsége technológia- és típusspecifikus. Így nem is csoda, hogy az ilyen eszközökhöz még nem nagyon létezik középszintű képzés, a működtető személyzet többnyire diplomás szakemberekből áll. Jelenleg még egyáltalán nem életszerű, hogy egy katonai alakulat karbantartó-javító alegységénél szolgáló katonák ilyen képességekkel bírjanak vagy hogy megfelelő képzettségű embereket megfelelő számban tudjanak katonai szolgálatra felvenni.

A 3D nyomtatás műveleti logisztikában történő alkalmazási korlátainak lehetséges feloldása

Tulajdonképpen a jogi kérdések a legkönnyebben megoldhatók. A haderőknek az ipari partnereikkel kötött szerződések során egyszerűen ki kell kötni annak lehetőségét, hogy a kifejlesztett/megvásárolt eszköz alkatrészeit joga legyen műveleti területen (vagy akár a háországban is, ha ahhoz nemzetbiztonsági érdek fűződik) legyártani. Ennek érdekében kötelezni is lehet a gyártókat, hogy az általuk gyártott eszközökhöz mellékeljék azok 3D modelljét is. A műveleti területen történő esetleges gyártás nem okoz érzékelhető veszteséget a gyártónak, mert az természetesen még mindig költségesebb, mint a tömeggyártás, így nyilvánvalóan csak kis tételekre és csak szükség esetre értendő.

A működtetéshez szükséges személyi állomány biztosításának kérdése már kicsit bonyolultabb. A 21. századi haderőknek egyre inkább szüksége lesz a magasan képzett szakemberekre, mérnökökre, technikusokra. Ez általában igaz, nem csupán a 3D nyomtatás technológiájának bevezetése érdekében szükséges. Ennek az igénynek pedig meg kell jelennie a képzési rendszerben is. Ezzel párhuzamosan a fémnyomtatók működtetése is egyre egyszerűbb, ergonomikusabb lesz, amely a technológia evolúciójának természetes eredménye, és amely a 3D műanyag nyomtatók esetében már jórészt le is zajlott.

A 3D nyomtatók műveleti logisztikában történő alkalmazásának logisztikai költségei

Eddig nem esett szó az árról. Nem mintha ez a szempont mellékes lenne, de az közismert, hogyha egy technológia valós képességbővülést jelent a haderő részére, akkor az - függetlenül a költségektől - előbb-utóbb biztosan megjelenik a hadseregek eszköztárában. Tehát jelen esetben még valószínűleg inkább technikai korlátai vannak a katonai bevezetésnek. Annak érdekében, hogy a 3D nyomtatás műveleti területen történő alkalmazásának aktuális lehetőségeit felmérhessük, itt vezessük be a „logisztikai lábnyom” fogalmát. Ez most a karbon lábnyomtól független, egy-egy katonai eszköz mozgatásához, tárolásához, működtetéséhez szükséges logisztikai tevékenységek összességét jelenti.

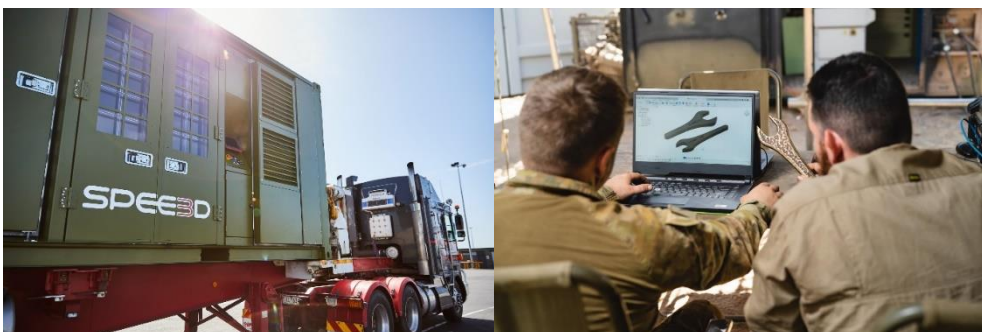
Egy egyszerűsített modellben a logisztikai lábnyom egy honos raktárbázisból történő alkatrészbiztosítás esetén a tárolási tevékenységből, a felhasználás helyszínére történő eljuttatásból, a kapcsolódó anyagmozgatásból és adminisztrációból áll. Az rögtön látszik, hogy tökéletesen egzakt mérőszámot nem tudunk hozzárendelni ezekhez a tevékenységekhez, de ha ennek csak a legköltségesebb és legkockázatosabb részét vesszük, azaz a célterületre történő szállítást, akkor reális lehet egy km x kg dimenzió. Tehát példának okáért egy 20 dkg-os alkatrész 500 km-re történő eljuttatása 100 kmkg. Amennyiben 100 hasonló alkatrészt kell eljuttatni a műveleti területre, akkor összesen 10 000 kmkg logisztikai „költség”-ről beszélhetünk. Tulajdonképpen ennek a „megspórolása” lenne a 3D nyomtatók műveleti területen történő alkalmazásának a hozadéka.

Összehasonlításképpen a 3D nyomtató és kiegészítő berendezéseinek a műveleti területre történő juttatása csupán egy kategóriájában kicsi és könnyű 3 tonnás berendezést tekintve is 300 000 kmkg egyszeri logisztikai költség. Ehhez még hozzá kell számolni a műveleti területen történő energiabiztosítást is. Ha a helyben előállított alkatrészek esetében egy igen moderált 10 órás átlagos nyomtatási időt és 500 W-os átlagos teljesítményfelvételt veszünk figyelembe, akkor összesen 500 kWh energiát használtunk fel a példának vett 100 db alkatrészhez. A gázolaj energiataralma 13,5 kWh/kg [16]. Amennyiben az aggregátor hatásfokát 30%-nak tekintjük, akkor kb. 110 kg gázolajat kell a műveleti területre juttatni. Ennek logisztikai költségénél nem honos területről történő szállítást, hanem egy közelebbi lokációból történő biztosítást, 100 km-es távolsággal számolunk, és így 11 000 kmkg-ot kapunk.

Figyelembe vesszük azt is, hogy helyben történő előállítás esetén csak 10 óra az alkatrész biztosításához szükséges idő, addig hátor-szági szállítás esetén két héttel számolva ez 280 óra, amiért 28-cal megszorozzuk a raktárbázisból történő alkatrészbiztosítás költségét. Nem vettük figyelembe a modellben a helyszíni disztribúció költségét (bár ez mindkét esetben jelentkezik), és még számos tételt (pl. a légi vagy közúti szállítás eltérő költségeit), illetve a példánál mindig a 3D nyomtató helyszíni működtetése szempontjából kedvezőbb értékeket tekintettünk. Így azt találtuk, hogy a példában a 3D nyomtató műveleti helyszíni üzemeltetése nagyságrendileg ugyanakkora terhet ró a lo-gisztikára (311 000 kmkg kontra 280 000 kmkg). Vagyis ebben a pél-dában, az adott kontingens műveleti területen történő ténykedése so-rán 110-120 db olyan, a képességek szempontjából kritikus alkatrészt kellene kinyomtatni, hogy a nyomtató logisztikai (és nem a valós!) költ-ségei megegyezzenek a honos országból történő szállítás logisztikai költségeivel. Amennyiben egy számottevő erejű katonai egység (leg-alább dandár) tartósan tevékenykedne egy, a honos bázisától igen messze található területen, akkor egy 3D nyomtató helyszíni üzemel-tetése már most is előnyös lehetne.

Érdemes ismét megemlíteni, hogy a modell erősen hiányos. Nem vettük például figyelembe, hogy több alkatrész egyidejű szállítása ese-tén a logisztikai költség megoszlik, illetve a példában szereplő 100-as nagyságrendű alkatrész előállítása a helyszínen, a nyomtatási időt és az utómunkálatokat tekintve, egy ember közel egy éves teljes tevé-kenysége. Az mindenestre látszik, hogy a technológia nagyon közel van ahhoz a határhoz, ahonnan az már valós alternatívát jelent a lo-gisztikai ellátás szervezése során. Ettől kezdve azt érdemes vizsgálni, hogy milyen technológiai lehetőségek vannak a fém 3D nyomtatók fej-lesztése során, amelyek javíthatnák azok katonai környezetben történő alkalmazását. Az látható, hogy a fém nyomtatás minden technológia esetében számos apró rész nagy energiával történő megolvasztásá-nak sorozatából áll. Ez a folyamat természetesen idő- és energia-igényes. A nyomtatási idő több és/vagy nagyobb energiájú energiafor-rás (pl. lézer) alkalmazásával csökkenthető, de ez növeli az energia-igényt, így ezen a fronton nem várható belátható időben áttörés. Marad tehát az a természetes technológiai evolúciós folyamat, melynek során a fémnyomtatók tömege, mérete (továbbá nem melleleg az ára) és az eljárások komplexitása csökken. A már korábban említett ADAM tech-nológia pl. a nehézkes és kockázatos fémpor helyett már egyfajta fila-mentet használ alapanyagként, bár ennek az az ára, hogy két plusz technológiai lépés szükséges a kész termék előállításához.

Összegzés



6. számú ábra. Egy ausztrál cég katonai alkalmazásra szánt 3D nyomtatókonténere kívül és belül [17]

Jelen pillanatban a 3D fémnyomtatók műveleti területen történő alkalmazásának legfőbb akadályát azok rendkívül nagy méretében és tömegében, továbbá a bonyolult működtetésükben látjuk. Amennyiben sikerülne egy egyszerű és biztonságos eljárást kidolgozni, és azt egy 10, legfeljebb egy 20 lábás konténerben elhelyezni, akkor már megfontolandó lenne, hogy integrálásra kerüljön a meglévő logisztikai támogatás rendszerébe. Már van is olyan cég, amely ezt kínálja. Az ausztrál Spee3D cég a nevében is utal a sebességre. Az XSpee3D nevű terméküket egyetlen 10 tonnás tömegű 20 lábás konténer tartalmazza, szabadalmaztatott technológiájukkal 100 gramm/perc nyomtatási sebességet ígérnek, amely nagyságrendileg nagyobb, mint a cikkben korábban említett EOS berendezéseké. A technológia jelenleg 12-féle fémmel elérhető, és a katonai sikeres validációja az ausztrál hadsereg által 2022-ben már meg is történt. Egy 2023 márciusában aláírt együttműködés keretében jelenleg a brit hadsereg teszteli a konténert [18]. A segítségével előállított katonai felhasználású eszközökről a cég a brossúrájában egy igen impresszív listát is közzétett.

2021-ben az Amerikai Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma¹³ is aláírt egy 1,4 millió dolláros szerződést az ExOne nevű amerikai céggel, amely szintén egy konténeres kialakítású, terepen is üzemeltethető 3D nyomtatóállomás kifejlesztését tűzte ki célul [20]. A projekt állásáról kevés a publikus információ, de annyi bizonyos, hogy itt egy nagyobb, 40 lábás konténer kerül berendezésre, viszont abban helyet

¹³ DoD – Department of Defense. Nem az európai értelemben vett minisztérium, de funkcióit tekintve megfelel annak.

kap egy 3D szkenneregység is, illetve lehetőség lesz benne kerámia- és műanyagalapú nyomatok legyártására is.

AZ XSPEE3D RENDSZERREL ELŐÁLLÍTOTT KATONAI FELHASZNÁLÁSÚ ESZKÖZÖK LISTÁJA

3. számú táblázat

alkatrész		alapanyag	tömeg	nyomtatási idő
	tömlőfej	6061 alumínium	660 g	24 perc
	M113 harcjármű futógörgő csapágyfedél	alumínium-bronz	2 kg	29 perc
	fegyverzeti kéziszerszám	alumínium-bronz	2 kg	60 perc
	fenékvíz pumpa ház	alumínium-bronz	8,3 kg	83 perc
	szelepfogó	316 rozsdamentes acél	1,2 kg	60 perc
	vízhűtő blokk	6060 alumínium	580 g	40 perc
	rakétafűvókabélés	réz	17,9 kg	199 perc

a szerző szerkesztése [17] alapján

Látható, hogy a 3D fémnyomtatási technológiája igen közel áll ahhoz a ponthoz, hogy valóban megjelenjen a műveleti logisztika eszköztárában. A technológia fejlesztésében élenjáró országokban ezek az eszközök már kiléptek a fejlesztés első fázisaiból, és már a tulajdonképpeni csapatpróbájuk zajlik. Valószínűsíthető, hogy az első 3D nyomtatók 1-2 éven belül rendszeresítésre kerülnek és az ezek nyomán szerzett tapasztalatokra építve 8-10 éven belül szélesebb körben elterjednek, majd a magasabb katonai egységek karbantartó-javító al egységeinél a felszerelés elmaradhatatlan részeivé válnak.

Köszönetnyilvánítás

A kutatási téma kidolgozását a TKP2021-NVA-16 azonosítószámú „Alkalmazott katonai műszaki, had- és társadalomtudományi kutatások a nemzetvédelem, nemzetbiztonság területén a Hadtudományi és Honvédtisztképző Karon” című pályázat segítette. 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.



GAZDASÁGFEJLESZTÉSI
MINISZTERIUM

Felhasznált irodalom

- [1] Zentay Péter, Hegedűs Ernő, és Végvári Zsolt, „A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I. rész”, *Haditechnika*, 56 évf., 6. szám, 56–60o., 2022, doi: 10.23713/HT.56.6.09.
- [2] Badiru, Adedej B., Valencia, Vhance V. és Liu, David, *Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry*. CRC Press, 2020.
- [3] Kocsis Bence, „Az additív és szubsztraktív technológia katonai vonatkozású alkalmazási lehetőségeinek összehasonlító vizsgálata”, *Műszaki Katonai Közlöny*, 29. évf., 2. sz. 95–104o., 2019, doi: 10.32562/mkk.2019.2.8.
- [4] RJC, „Selective Laser Sintering”, *RJC Mold*. <https://rjcmold.com/3d-printing/selective-laser-sintering/> (Leoltve: 2022. november 5.).

- [5] Attaran, Mohsen „Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics”, *JSSM*, 10. évf. 3. szám, 189–206o., 2017, doi: 10.4236/jssm.2017.103017.
- [6] „Activities Search”, *Default*. <https://eda.europa.eu/what-we-do/all-activities/activities-search/additive-manufacturing-3d-printing-feasibility-study-technology-demonstration> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [7] Petch, Michael „The Additive Manufacturing industry supports the security and foreign policy course of the German Federal Government, European Union and NATO”, *3D Printing Industry*, 2022. március 4. <https://3dprintingindustry.com/news/the-additive-manufacturing-industry-supports-the-security-and-foreign-policy-course-of-the-german-federal-government-european-union-and-nato-205472/> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [8] Ferraro, Alessandra, Pirozzi, Marco, Annacondia, Enrico és Di Donato, Luciano, „Powder bed fusion/sintering machines: safety at workplaces”, *Procedia Manufacturing*, 42. évf., 370–374o., 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.061.
- [9] „Metal 3D printer | EOS Metal Systems”. <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [10] Davies, Samuel, „GKN validating DP 600 steel on EOS metal 3D printer as IDAM project reaches halfway point”, *TCT Magazine*, 2020. július 21. <https://www.tctmagazine.com/api/content/ba3abbf2-ca78-11ea-bbe2-1244d5f7c7c6/> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [11] „Konténer méretek és adatok - Konténer Hungária Kft.” <https://www.kontener.hu/kontener-kisokos/kontener-meretek> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [12] Vágner Szabolcs, „Terepjáró képesség fejlesztése a Magyar Honvédségben”, *Katonai Logisztika*, 26. évf. 1-2. szám, 194–227o., 2018, doi: 10.30583/2018/1-2/194.
- [13] „CNC Turning - Process, Operations & Machinery”, *Fractory*, 2020. május 15. <http://https%253A%252F%252Ffractory.com%252Fcnc-turning%252F> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [14] Zentay Péter, Hegedűs Ernő, és Végvári Zsolt, „A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei III. rész”, *Haditech-nika*, 57. évf., 2. szám, 57–62o., 2023, doi: 10.23713/HT.57.2.11.

- [15] „Finishing Options for Metal 3D Printed Parts”, *Desktop Metal*.
<https://www.desktopmetal.com/resources/finishing-options-for-metal-3d-printed-parts> (Letöltve: 2022. november 5.).
- [16] Végvári Zsolt, „Akkumulátorok a gyalogos lövészkatonák felszerelésében, a fejlesztés lehetséges irányai”, *Műszaki Katonai Közlöny*, 26. évf., 2. szám, 85-101o., 2016.
- [17] Spee3D, „Make Metal Anywhere - World’s Fastest Containerised Metal 3D Printer”. Spee3D, 2022.
- [18] „Resources”, *SPEE3D*, 2019. október 25.
<https://www.spee3d.com/resources/> (Letöltve: 2023. május 15.).