

Ádám Balázs¹  – Ember István² 

Béltestek készítésének technikai lehetőségei alacsony sűrűségű anyagból

Technical Possibilities of Low-Density Liner Construction

A kumulatív töltetek béltestei alacsony sűrűségű anyagokból is készülhetnek. Ezek a típusok a hagyományosaktól eltérő hatékonysággal rendelkeznek. Azonban van egy kifejezetten nagy előnyük. 3D nyomtató segítségével viszonylag egyszerűen elkészíthetők, és tervezésük sem igényel kiemelkedő technikai szaktudást. Tanulmányunkban megvizsgáljuk néhány változat méretezésének és kialakításának lehetőségeit. A félgömb és a kúp alakzat alkalmazása bevett gyakorlat a kumulatív töltetekben béltestként, ezért mi is ezeket választottuk ki. Célunk, hogy könnyen kivitelezhető módszert találjunk az ipari és katonai felhasználóknak egyaránt ezek elkészítésére.

Kulcsszavak: kumulatív töltet, PLA, 3D nyomtatás, robbantás, béltest

The liners of shaped charges may be produced with low-density materials. These types have different effectiveness to conventional ones. However, they have an expressly enormous benefit. They are easily constructible with 3D printers and the planning process does not require high technical knowledge. In our study, we examine the sizing and designing process in the case of some liner types. The half-sphere and the cone are typical geometrical forms using in shaped charges, for that very reason we also chose these forms. Our goal is to find an easy way of construction for both industrial and military users.

Keywords: shaped charge, PLA, 3D printing, blasting, liner

¹ Honvédtisztjelölt, Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti Támogató Tanszék, e-mail: Adam.Balazs@uni-nke.hu

² Egyetemi tanársegéd, Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti Támogató Tanszék, e-mail: Ember.Istvan@uni-nke.hu

1. Bevezetés

A kumulatív töltetek legfontosabb alkateleme minden kétséget kizáróan a béléstest. Ez a sokszor hétköznapiak tűnő geometriai formájú alkatrész képes a robbanás energiáját elképesztő hatékonysággal egy adott pontba összpontosítani. Az alkalmazott robbanóanyag szintén nagy jelentőségű, de egy jól bevált brizáns típus, amely homogén vagy több összetevőből áll,³ egyaránt alkalmas lehet a feladatra. Jelentőségük ilyen vonatkozásban elmarad a béléstesthez képest.

Mivel tehát a béléstestek jelentősége meghatározó, úgy döntöttünk, hogy az elkészítésére kísérletet teszünk 3D nyomtatók alkalmazásával. Azért esett a választásunk erre a technológiára, mert napjainkban gyakorlatilag bárki számára elérhető innovatív megoldásként gondolunk rá. Véleményünk szerint néhány éven belül annyira alapvető eszközökké válnak a hétköznapijainkban, hogy alkalmazásuk lehetőségeit idejében fel kell mérni.

A robbantástechnika is ilyen terület, ahol van létjogosultsága a 3D nyomtatásnak. A különböző töltetek alkatelemeit problémamentesen el lehet velük készíteni, különösen akkor, ha nincs szükség nagy darabszámra. Ilyen esetben alkalmazásuk gazdaságosabb is lehet.

A kumulatív töltetek esetében felhasználásuk lehetséges az ipari, katasztrófavédelmi és katonai területeken egyaránt. A különböző speciális jégmentesítési feladatok, egyes épületbontási részfeladatok, vagy a hagyományos⁴ és improvizált robbanótestek⁵ hatástalanítása egyaránt része a fenti feladatcsoportnak. Ezek a területek sok tekintetben eltérő tölteteket igényelnek, amelyek méretezése is sajátos lehet.⁶ Sok tekintetben ez is lehet egy jövőbeli fejlesztési irány, amikor kifejezetten egy-egy feladatra tervezett töltetet alkalmazunk, mert a gyártási kapacitás szinte bárhol elérhető lesz.

Mivel a fellebb említett tevékenységek között több olyan is akad, amelynek van kapcsolódása a hadtudomány mértékadó kutatási irányaihoz,⁷ úgy döntöttünk, kísérletet teszünk ilyen alkatelemek elkészítésére. Célunk volt felmérni, hogy van-e lehetőség olyan alacsony sűrűségű anyagból készült kumulatív béléstest nyomtatására, amely alkalmas lehet kumulatív töltetben való felhasználásra. Ez az eredmény a jövőbeni további vizsgálatokon túl emelheti a leendő honvédtisztek felsőoktatásban folyó képzésének színvonalát, mert egy új, modern és előremutató módszert ismerhetnek majd meg a jövőben, ha az eljárást részletesen kidolgozzák.

³ Kugyela Lóránd: A többkomponensű robbanóanyagok múltja, jelene és jövője. *Katonai Logisztika*, 28. (2020), 4. 58–75.

⁴ Például légi bombák; bővebben Daruka Norbert: Robbanótestek I. – Amit a bombákról tudni érdemes. *Műszaki Katonai Közlöny*, 24. (2014), 4. 68–82.

⁵ Boda József et al.: A hadtudományi kutatási irányok, prioritások és témakörök. *Államtudományi Műhelytanulmányok*, (2016), 16. 1–23.

⁶ Lukács László: A kumulatív töltetek és gyakorlati alkalmazásuk. *Műszaki Katonai Közlöny*, 20. (2010), 1–4. 175–196.

⁷ Kovács Zoltán: Repülőtéri létesítmények fizikai védelme IED ellen. *Repüléstudományi Közlemények*, 26. (2014), 2. 106–113.

2. A 3D nyomtatás technológiai

A 3D nyomtatás alkalmazási lehetősége a különféle műanyagok miatt ma már rendkívül szerteágazó. Számos tudományágban és ipari környezetben is megtalálható a technológia, amely folyamatosan fejlődik, ezzel egyre több lehetőséget biztosít a felhasználók kreativitásának igényéhez. Így napjainkban már nemcsak műanyagok, hanem fémek vagy, ahogy azt egy 2021-es Németországban zajlott építkezés is bemutatta, akár lakóépület nyomtatására is lehet használni megfelelő alapanyagokkal. A tudomány leginkább élvonalában járó területei, ahol 3D nyomtatást használnak: az orvostudomány, az ipar és az űrhajózás.

Az orvoslás területén 3D nyomtatás segítségével készülhetnek fel az orvosok a komplikáltabb műtétekre, ugyanis lehetséges a belső szervek később nyomtatható 3D modellezése. A modell segítségével a műtétet végzők meg tudják vizsgálni a belső szervek pontos alakját, a bemetszések tervezett helyét, és a műtét lefolyását is modellezni tudják. Ezek mellett implantátumokat és emberi testbe építhető olyan szerkezeteket lehet előállítani, amelyeket korábban titánból vagy más orvosi fémekből gyártottak. A fogászatban is gyakran használnak 3D nyomtatást a fogorvos modellezéséhez vagy implantátumok készítéséhez, amelyek nagy előnye az egyedi tervezhetőség és személyre szabott kialakítás.

Bár a technológia felhasználása rendkívül széles körű, leginkább prototípusokat és egyedi modelleket állítanak vele elő, ugyanis más eljárásokkal készült modellekhez képest ezek sokkal pontosabbak, költségeik pedig azok töredékébe kerülnek. Sorozatgyártásra azonban csak korlátozottan alkalmas a technológia, mivel ahhoz túl időigényes és költséges. Ipari felhasználása és az űrutasításban betöltött szerepe leginkább a prototípus-készítésben, illetve az egyedileg gyártott kis sorozatszámú alkatrészek gyártásában nyilvánul meg. Azért fontosak ezek a prototípusok a kutatást és fejlesztést végző mérnökök számára, mert segítségükkel sokkal pontosabb képet kaphatnak a termékről, mivel a minták rendkívül rövid idő alatt elkészíthetők a végtermékkel megegyező minőségben.

A különféle felhasználási területek miatt a műanyag 3D nyomtatás számos eljárás és technológia alapján valósulhat meg, ezek előnyeinek és hátrányainak ismerete elengedhetetlen a kutatómérnökök számára a megfelelő 3D nyomtatási technológia és a konkrét nyomtatótípus kiválasztásához.

Az eltérő technológiai megoldások az eltérő működési elvüknek köszönhetően különböző anyagok és geometriák nyomtatására alkalmazhatók. A kötőanyagok szerint 7 nagyobb csoportja és összesen 15 alcsoportja van a nyomtatási technológiáknak.⁸

Az első nagyobb csoport a fotopolimerizáció elvén működik. Működése során fényérzékeny folyadékot helyeznek a nyomtató kádjába, ahol a nyomtatófej fénye megszilárdítja a megvilágított folyadékreszecskeket. A szilárdulást kiváltó hatás SLA⁹-elvnél egy UV¹⁰-lézersugár, amely „lerajzolja” a tárgyat, DLP¹¹-elvnél egy projektoros fényforrás, amely egyszerre világítja

⁸ Davide Sher: 3D Hubs Publishes Complete 3D Printing Technologies Infographic. *3D Printing Media Network*, 2016. november 4.

⁹ Angol elnevezése: *stereolithography*.

¹⁰ Angol elnevezése: *ultra violet*, magyarul: ultraibolya.

¹¹ Angol elnevezése: *digital light processing*.

meg egy réteg összes megszilárdítandó pontját, míg CDLP¹²- (CLP-) elvnel led fény és oxigén-dúsítás végzi a szilárdítást, ami pehelykönnyű belső szerkezetet eredményez.

A második csoport az alapanyagok melegítését és folyékony halmazállapotúvá válását használja a nyomtatáshoz. Ilyen működési elv a szálhúzásos (FDM-)¹³ módszer. A 3D nyomtatók legnagyobb része ezen elv alapján működik. Ezek a legolcsóbb és legköltséghatékonyabban „táplálható” nyomtatótípusok. Működésük lényege, hogy feltekerített műanyag szál, úgynevezett filament kerül egy adagolófej-egységbe, amely fogaskerék segítségével nyomja azt bele a nyomtatófej következő részegységébe, a „hotend”-be. A „hotend”-et fűtőszál fűti a megfelelő (általában 200–215 °C közötti) hőmérsékletre, itt a filament megolvad, és az adagoló fogaskerék hatására a „hotend” végén található fűvókán keresztül kipréselődik egy melegített tálcára, ahol újra szilárd halmazállapotot vesz fel. A szálhúzásos módszer egyik hátrányát jelenti, hogy az egymásra épülő rétegek egymáson tudnak csak feltámaszkodni, így bizonyos hajlásszög fölött (nyomtatóként változó, de általában 60°) a tárgyak nyomtatásához támasztékokat kell beépíteni a tárgy 3D modelljébe. A kutatás során mi is szálhúzásos nyomtatót használtunk, ugyanis ezekhez rendkívül nagy választékban állnak rendelkezésre eltérő tulajdonságú filamentek.

A harmadik nagy csoport az anyagok fröccsentésének elvén működik. A munkatálcára fröcskölt alapanyagot más-más szilárdulást kiváltó hatás éri, MJ¹⁴-elvnél ez egy UV-lámpa, NPJ¹⁵-elvnél hő (ezt a technológiát fém nyomtatására használják) és DOD¹⁶-elvnél pedig egy másik anyagsugár (a két anyagsugár reakciója során jön létre a szilárdulás).

A negyedik csoportba tartozó BJ¹⁷-elv alapja, hogy itt a nyomtatófejek kötőanyagot visznek fel egy portálcára. Egy réteg felvitele után a nyomtatófej kötőanyaggal rajzolja a porba a mintát, amelyet újabb réteg poralapú alapanyag követ. Ezzel az eljárással fémet, illetve gipszet lehet nyomtatni, ami rendkívül alkalmassá teszi festhető modellek készítésére.

Az ötödik nagy csoport por formájú alapanyagot használ, amelyet ugyancsak külső hatás szilárdít meg. A szilárdító hatást MJF¹⁸-elvnél a porágyba fecskendezett folyadék éri el, SLS¹⁹-elvnél a porrétegekbe irányuló lézerefény segítségével szilárdítják meg, kapcsolják össze az alapanyagsemcséket (itt a lézer „lerajzolja” a nyomtatandó tárgyat), a DMLS/SLM²⁰ pedig hasonlóan működik az SLS-elvhez, csak itt az alapanyag fém, ezért erősebb lézer szükséges a szilárdításhoz. Az EBM-elv segítségével fémnyomtatásra van lehetőség, itt a porágy részecskéi elektromos kisülések hatására kapcsolódnak össze egymással.

A hatodik nagy csoportba tartozó eszközök működési elvével fémnyomtatásra van lehetőség. Alapvetően por vagy szál formájában érkezik a nyomtatófejbe az alapanyag, amelyet

¹² Angol elnevezése: *continuous digital light projection*.

¹³ Angol elnevezése: *fused deposition modeling*.

¹⁴ Angol elnevezése: *material jetting*.

¹⁵ Angol elnevezése: *nanoparticle jetting*.

¹⁶ Angol elnevezése: *drop on demand*.

¹⁷ Angol elnevezése: *binder jetting*.

¹⁸ Angol elnevezése: *multi jet fusion*.

¹⁹ Angol elnevezése: *selective laser sintering*.

²⁰ Angol elnevezése: *direct metal laser sintering* vagy *selective laser melting*.

LENS²¹ működési elvnel egy nagy erejű lézer olvaszt meg és rögzít a már kinyomtatott részekhez, EBAM²²-elvnél pedig az olvasztáshoz szükséges energiát és hőmérsékletet elektromos áram segítségével éri el a nyomtatófej.

A hetedik csoportot alkotó technológia laminálást használ a 3D modell megalkotásához. A LOM²³ elnevezésű működési elv lényege, hogy feltekereselt alapanyag kerül rétegenként a tárgylemezre. Minden réteg alsó része valamilyen kötőanyaggal, leginkább speciális ragasztóval van ellátva. Az új réteget nyomás és/vagy hő segítségével kapcsolják az előzőhöz. A kapcsolódás létrejötte után lézer vagy penge metszi ki az alapanyagrétegből a kívánt tárgy formáját.

Minden technológiának megvannak a maga előnyei és hátrányai, de az egyes nyomtatók és azok „táplálásának”, karbantartásának költségei jelentősen eltérnek egymástól. Így csak néhány olyan nyomtatási eljárásról beszélhetünk, amelyeket például magánszemélyek otthonában megtalálhatunk. Költségei miatt a legtöbb eljárás napjainkban még csak az ipari és a piaci verseny résztvevői számára megtérülő befektetések. Viszont az elvek és eljárások sokszínűsége miatt minden anyag és forma vagy nyomtatási feladat elkészítéséhez megvannak a legmegfelelőbb nyomtatók. A mi kutatásunkhoz éppen ezért egy rendkívül költséghatékony eljárást kerestünk, amellyel számos eltérő tulajdonságú anyag nyomtatható kisebb karbantartások és beállítások elvégzése után. Éppen ezért a kutatás során a CraftUnique cég termékét, a CraftBot 3 nyomtatókat használtunk.

3. A nyomtatáshoz használható filamenttípusok

Az FDM nyomtatási technológiákhoz használható filamenttípusok rendkívül széles választéka teszi ezt a nyomtatási elvet sokoldalúvá (1. táblázat). Az eltérő filamentek más-más fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért a különböző feladatokhoz a legalkalmasabb tulajdonságokkal rendelkező anyagot lehet kiválasztani. Természetesen ebből kifolyólag a filamentek nyomtatásának technikai paraméterei is jelentősen változnak.

A PLA²⁴ a legszélesebb körben alkalmazott műanyagtípus, azért, mert könnyű használni, meglehetősen jól tapad a fűtött tálcához, megfelelően részletes kidolgozásra alkalmas, mégis erős. Hátránya, hogy viszonylag alacsony, 60 °C-os hőmérséklet felett elkezd puhulni. Az ABS²⁵-filament rendkívül erős, akár munkaeszközök és szerszámok készítésére is alkalmas lehet. Ellenáll az időjárás viszontagságainak és a nap fényének is huzamosabb ideig, ezért alkalmas kültéri tárgyak nyomtatására. Hátránya, hogy nyomtatás közben az egyenetlen hűlés következtében könnyen meghajlik, így használata nehézkes, speciális technikát igényel. A PETG²⁶ rendkívül erős, UV-sugárzást álló és számos vegyi anyagnak ellenáll, ezért

²¹ Angol elnevezése: *laser engineered net shaping*.

²² Angol elnevezése: *electron beam additive manufacturing*.

²³ Angol elnevezése: *laminated object manufacturing*.

²⁴ Angolul: *polylactic acid*, magyarul: politejsav.

²⁵ Angolul: *acrylonitrile butadiene styrene*, magyarul: akrilnitril-butadién-sztirol.

²⁶ Angolul: *polyethylene terephthalate glycol*, magyarul: polietilén-tereftalát-glikol.

leggyakoribb felhasználási területe a folyadéktárolók készítése. Keménysége következtében könnyen karcolódik és sérül. A nylon hasonlít a PETG-hez, de még annál is erősebb, ez az egyik legerősebb filament. Amennyiben viszont kevesebb szál felhasználásával vagy kisebb kitöltési aránnyal nyomtatják, rugalmasabbá tehető. Kicsi a súrlódási együtthatója, ezért mozgó-, csúszóalkatrészek alapanyagként alkalmazzák leginkább. A magas tálcahőmérséklet igénye és fizikai tulajdonságai nagyon nehezen nyomtathatóvá teszik. Rendkívül higroszkópos, tehát vízmegkötő hatású, de mivel ez a nyomtatás minőségét nagymértékben rontja, párától elzárt térben kell nyomtatni. Az ASA²⁷ nagyon hasonló az ABS-hez, kifejlesztésének célja az ABS UV-állóságának fokozása volt. Az UV-állóság mellett nőtt a hőállósága és az ütésállósága is elődjéhez képest. A flexibilis filamentek normál polimerek és gumi ötvözéséből jöttek létre. Alapvetően a flexibilitásuk nem egyenlő a gumiéval. Egyik előnyük abban nyilvánul meg, hogy jelentősen nagyobb rugalmassággal rendelkeznek a többi filamenthez képest. Hátrányuk, hogy nagy nehézségekkel jár a nyomtatásuk. A PC-²⁸ anyagokból készített tárgyak rendkívül erősek, ütésállóak, és a többi anyaghoz képest extrém mértékű hőt képesek elviselni. Az anyag 150 °C-ig megtartja kristályszerkezetét, ezért ilyen hőmérsékleti viszonyok között is strapabíró marad. Hátránya, hogy hőállósága miatt nagyon magas hőmérsékleten lehet csak nyomtatni, illetve nagyon higroszkópos. PVA²⁹-anyagot alátámasztások nyomtatására használnak. Vízben oldódik, ezért a nyomtatás befejeztével egyszerűen és könnyedén eltávolítható az elkészült tárgyból. Ez a képessége nagyon bonyolult formák kinyomtatására is képessé teszi az FDM nyomtatástechnológiát és a többi filament típust. Nagymértékben higroszkópos, így fokozott figyelmet kell fordítani a megfelelő, páramentes tárolási feltételek biztosítására.³⁰

1. táblázat: Filamenttípusok fontosabb paraméterei

Fsz.	Filament	Ajánlott fejhőmérséklet	Ajánlott tálcahőmérséklet	Sűrűség
1.	PLA	180–230 °C	20–60 °C	1,24 g/cm ³
2.	ABS	210–250 °C	80–110 °C	1,12 g/cm ³
3.	PETG	220–250 °C	50–75 °C	1,33 g/cm ³
4.	Nylon	240–260 °C	70–100 °C	1,08 g/cm ³
5.	ASA	240–260 °C	50–100 °C	1,06 g/cm ³
6.	TPE, TPU, TPC (flexibilis)	210–230 °C	30–60 °C	1,20 g/cm ³
7.	PC	270–310 °C	90–110 °C	1,18 g/cm ³
8.	PVA	185–200 °C	45–60 °C	1,19 g/cm ³

Forrás: a szerzők szerkesztése All3DP: 3D Printer Filament: The Best Types in 2022. 2021. december 27.; Diallo (é. n.): i. m.; <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/density> alapján

²⁷ Angolul: *acrylic styrene acrylonitrile*, magyarul: akrilnitril-sztirol-akrilát.

²⁸ Angolul: *polycarbonate*, magyarul: polikarbonát.

²⁹ Angolul: *polyvinyl alcohol*, magyarul: polivinil-alkohol.

³⁰ B. Diallo: 3D Printer Filament Types. *Leapfrog*, (é. n.).

4. A béléstesttel szemben támasztott követelmények

A kumulatív béléstesteknek több fontos paraméternek kell megfelelniük. Az anyag meghatározó jelentőségű, hiszen annak sűrűsége a töltet penetrációs képességének fontos eleme. Esetünkben nem a megszokott réz alapanyagot használtuk, amely ugyan kiváló átütési képességgel rendelkezik, de 3D nyomtatása nagy anyagi befektetést igényel. Az alacsony sűrűségű béléstestek alkalmazása magától értetődő választás volt a nyomtatási lehetőségek miatt.

Anyagvastagság tekintetében a 3 mm-t választottuk, bár vékonyabb változatok is lehetnek eredményesek.³¹ Mivel az egyszerű nyomtathatóság, tervezhetőség kiemelten fontos szempont volt, elvetettük az összetettebb formák (dupla kúpos és trombita), valamint a nem homogén anyagvastagság alkalmazását. Mindkét fentebb említett lehetőség segíthet a kumulatív sugár ideális formálódásában azáltal, hogy egyenletesebb súlyelosztású lesz a sugár, ezért nem alakul ki akkora sebességkülönbség a hegye és a magja között. Ezeket a lehetőségeket érdemesnek tartjuk későbbi vizsgálatokra.

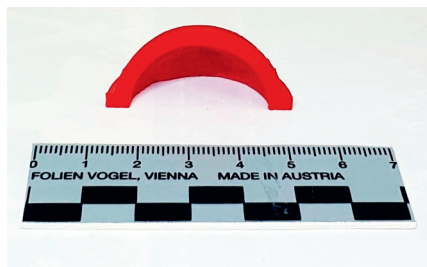
A kúp alak esetében a 60°-os kúpszögre esett a választás, amely hatékonyság szempontjából és összeszerelés tekintetében is kedvező alternatívának tűnt. A félgömb esetében jelentősebb méretezési feladatunk nem adódott, bár érdemes lehet további vizsgálatra egy-egy gömbszelet változat is.

5. Kumulatív béléstestek 3D modellezése

A 3D modellek előállításához az internetről ingyenesen letölthető, de nem felhőalapú szolgáltatást nyújtó „FreeCAD” alkalmazást használtuk. A kutatás során két különböző alakú béléstestformát méreteztünk, ez egy kúp (60°-os kúpszöggel) és egy félgömb volt. A félgömb változat 40, 35 és 30 mm-es belső átmérőben készült, míg a kúpot 40, 35, 30, 25, valamint 20 mm-es belső átmérőjű változatokban nyomtattuk.

A félgömb kialakításához szükség volt egy sík felületére fektetett félgömbre. A sík felületéhez egy korongot illesztettünk, amelynek a középpontjába egy kisebb sugarú kör – átmérője megegyezik a béléstest belső átmérőjével – került. Ebből metsző gömb segítségével alakítottuk ki a végső formát (1. ábra). Az így elkészült üreges test falvastagsága 3 mm lett. A test külső szélén lévő gyűrű biztosítja a stabil és egyenletes felfekvést, kapcsolódást az ugyancsak 3D nyomtatással készült töltetházakhoz. Ez a gyűrű biztosítja azt is, hogy a töltetház és a béléstest függőleges síkja pontosan egybeessen, ez a robbantások pontos és megbízható eredményének egyik kulcseleme.

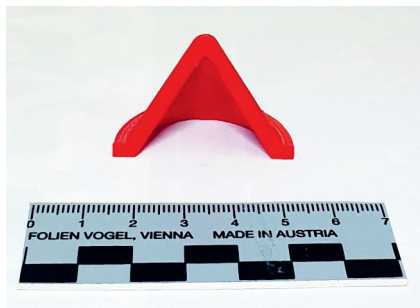
³¹ Henry O. Agu: *The Effect of 3D Printed Material Properties on Shaped Charge Liner Performance*. Doktori értekezés. Cranfield University, 2019.



1. ábra: 3D nyomtatással készült félgömb béléstest metszete

Forrás: a szerzők gyűjteménye

A kúp elkészítéséhez szükség volt egy 60°-os kúpszögű kúpra. A test alapjára itt is egy korong került, majd egy kisebb kúppal a test belsejéből kimetszettünk egy olyan kúp alakzatot, amely biztosítja a 3 mm egyenletes falvastagságot. A test külső szélére itt is perem került, amely biztosítja a stabil és egyenletes felfekvést a töltetházak belső részében (2. ábra).



2. ábra: 3D nyomtatással készült kúp béléstest metszete

Forrás: a szerzők gyűjteménye

6. 3D modellek szeletelése és a G-kód előállítása

A 3D modellek szeleteléséhez³² és a nyomtatás előkészítéséhez több felhő-, illetve nem felhőalapú alkalmazást és szoftvert lehet használni. Mivel a kutatás során CraftBot 3 nyomtatókat használtunk, célszerű volt a nyomtató gyártójának, a CraftUnique-nak a termékét alkalmazni. Így esett a választás a CraftWare alkalmazás használatára. A program rendkívül egyszerűen épül fel. Elsősorban a nyomtatandó tárgy apró módosításait lehet és kell rajta elvégezni, mint a tárgy nyomtatótálcán való elhelyezése, forgatása, szétdarabolása és a méretek módosítása. Itt lehet beállítani továbbá a dupla nyomtatófejek használatát; közülük a párhuzamos módnak nagy hasznát vettük, ugyanis ezzel mindkét nyomtatófej azonos pályán mozog, és így egy

³² A 3D nyomtatás során ez a folyamat biztosítja, hogy a tervezett tárgyakból a nyomtató számára értelmezhető, a nyomtatás során elvégezhető információk, adatok keletkezzenek.

nyomatás időtartama alatt két béléstest is elkészülhetett. Ez jelentősen csökkentette az összes nyomtatási időt, viszont ezzel a hibalehetőségek száma is duplájára nőtt. Másodsorban támasztékokat lehet generálni az olyan felületek megtámasztására, amelyek a vízszinteshez képest túl nagy szöveget zárnak be (ez minden nyomtatónál más érték, de általában 60° fölött javasolt támasztékok használata). A kúphoz nem volt szükség támasztékok generálására, viszont a félgömb esetében igen. A félgömb nyomtatására két változatot teszteltünk a kutatás kezdetén. Az első esetben a félgömb sík felületét helyeztük a nyomtatótálcára, ekkor a támasztékot a félgömb belsejébe kellett tenni, amelyet nyomtatás után oldalvágó és kézi gravírozó segítségével távolítottunk el. A második esetben a félgömb helyzetét 180°-kal elfordítottuk, ebben az esetben a tárgy csúcsa volt a nyomtatótálcán és a töltésházban elmozdulást gátló gyűrűnek kellett támaszték. Itt is gravírozóval távolítottuk el a felesleges anyagmaradványokat. Néhány próbanyomatás után eldől, hogy az első verzióban készítjük el a béléstesteket.

A programban a továbbiakban beállíthatók a szeletelés speciális paraméterei, mint a hőmérsékletek, kitöltés, nyomtatófej sebessége és a filament anyagára vonatkozó információk. A béléstestek nyomtatását 0,4 mm átmérőjű fúvókával végeztük, ezért a szeletelés során is alapbeállításként ezt kellett használnunk. A béléstestek oldalfalának egyenletes és teljes kitöltése miatt a belső részekben 100%-os kitöltést használtunk párhuzamos vonalakkal. A kutatás során csak PLA-anyagból nyomtattunk, ezért 60 °C-os tálcá- és 215 °C-os „hotend” hőmérsékletet alkalmaztunk.

7. Kumulatív béléstestek nyomtatásának sajátosságai

A kumulatív béléstestek nyomtatása nyomtatástechnikailag nem volt nehéz feladat. Mivel a nyomtatófej körkörös koncentrikus pályán tudott mozogni, a nyomtatási hibákat gyakran eredményező változatos mozgásokat sikerült kiküszöbölnünk. Amennyiben egy nyomtatandó darab megfelelően letapadt a tálcához, úgy az esetek 90%-ában már sikeres volt a nyomtatás.

A CraftWare program nettó nyomtatási időt jelez elő, de a gyakorlati tapasztalat alapján ez sokszor pontatlan. A tényleges nyomtatási idő ugyanis függ a tálcá és „hotendek” kezdő hőmérsékletétől is. A teljes nyomtatási idő általában a program által megadott időtől 15-20%-kal több (2. táblázat).

A béléstestek támasztékainak nyomtatásához lehetett volna használni PVA-alapanyagot, amely vízben oldódik, így a nyomtatás végeztével könnyen eltávolítható, de ennek költsége jelentős. Ebben az esetben egy nyomtatáshoz mindkét nyomtatófejre szükség lett volna, növelve ezzel a folyamat teljes idejét. A másik lehetséges megoldás volt, hogy a béléstestet és a támasztékot ugyancsak két külön fejjel nyomtatjuk, de mindkettőben PLA-anyagot, csak eltérő színben alkalmazunk. Az eltérő szín remekül körvonalazta volna a lecsiszolandó felületek pontos elhelyezkedését, de gyakorlati tapasztalatok alapján ezt egy nyomtatófejjel (azonos színből) való nyomtatásnál is remekül lehetett érzékelni.

2. táblázat: A nyomtatott béléstestek paramétereit

Fsz.	Töltet típus	Forma	Külső átmérő (mm)	Magasság (mm)	Nyomatási idő (perc)
1.	20 mm-es béléstest	Kúp	29	20,32	18
2.	25 mm-es béléstest	Kúp	34	24,65	25
3.	30 mm-es béléstest	Kúp	39	29,00	33
4.		Félgömb	39	18,00	37
5.	35 mm-es béléstest	Kúp	44	33,30	40
6.		Félgömb	44	20,50	49
7.	40 mm-es béléstest	Kúp	53	37,70	56
8.		Félgömb	53	23,00	69

Forrás: a szerzők szerkesztése

8. Összegzés

Véleményünk szerint megfelelő eljárást sikerült kialakítani, amely alkalmas lehet arra, hogy alkatelemeket készítsünk kumulatív töltetekbe. Ezeknek a béléstesteknek a hatékonysága elmarad a megszokott anyagokhoz képest, mint a réz és alumínium, de egyes feladatoknál még alkalmasabbak is lehetnek hozzájuk képest. Mindezek mellett a módszer mindenképpen alkalmas a katonai felsőoktatásban a képzés színvonalának emelésére, a szükséges ismeretek magasabb szintű elsajátításának támogatására.

Tervezzük a terület további vizsgálatát, hiszen az eddigi eredmények azt mutatják, hogy van még potenciál a 3D nyomtatás robbantástechnikai alkalmazásában. Kijelenthetjük mindezt úgy, hogy a katonai műszaki tudományok és a hadtudományok területén folyó fejlesztések, kutatások a régóta felfutó³³ és jelenleg nagy erővel folyó orosz–ukrán háború árnyékában új lendületet kaphatnak.

A továbbiakban tervezzük bonyolultabb formában és nem homogén anyagvastagsággal, valamint különböző anyagokból modellezni a béléstesteket. Ezek az irányok és kombinációik sok tekintetben hozhatnak előremutató eredményeket.

Felhasznált irodalom

- Agu, Henry O.: *The Effect of 3D Printed Material Properties on Shaped Charge Liner Performance*. Doktori értekezés. Cranfield University, 2019. Online: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/15285>
- All3DP: *3D Printer Filament: The Best Types in 2022*. 2021. december 27. Online: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- Boda József – Boldizsár Gábor – Kovács László – Orosz Zoltán – Padányi József – Resperger István – Szemes Zoltán: A hadtudományi kutatási irányok, prioritások és témakörök. *Államtudományi Műhelytanulmányok*, (2016), 16. 1–23. Online: www.med.u-szeged.hu/download.php?docID=90702

³³ Padányi József – Tomolya János: Háború és béke Ukrajnában, avagy keleten a helyzet változatlan, 1. rész. *Hadtudomány*, 27. 2017a, 1–2. 63–83.; Padányi József – Tomolya János: Háború és béke Ukrajnában, avagy keleten a helyzet változatlan, 2. rész. *Hadtudomány*, 27. 2017b, 3–4. 29–42.

- Daruka Norbert: Robbanóttestek I. – Amit a bombákról tudni érdemes. *Műszaki Katonai Közlöny*, 24. (2014), 4. 68–82. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2014_4_5_Robbanotestek%20I.%20-%20Amit%20a%20bombakrol%20tudni_1.pdf
- Diallo, B.: *3D Printer Filament Types* (é. n.). Online: www.lpfrg.com/guides/3d-printer-filament-types/
- Kovács Zoltán: Repülőtéri létesítmények fizikai védelme IED ellen. *Repüléstudományi Közlemények*, 26. (2014), 2. 106–113. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4602>
- Kugyela Lóránd: A többkomponensű robbanóanyagok múltja, jelene és jövője. *Katonai Logisztika*, 28. (2020), 4. 58–75. Online: <https://doi.org/10.30583/2020.4.058>
- Lukács László: A kumulatív töltetek és gyakorlati alkalmazásuk. *Műszaki Katonai Közlöny*, 20. (2010), 1–4. 175–196. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2866/2122> (Letöltés: 2022. 04. 23.)
- Padányi József – Tomolya János: Háború és béke Ukrajnában, avagy keleten a helyzet változatlan, 1. rész. *Hadtudomány*, 27. 2017a, 1–2., 63–83. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2017.27.1-2.63>
- Padányi József – Tomolya János: Háború és béke Ukrajnában, avagy keleten a helyzet változatlan, 2. rész. *Hadtudomány*, 27. 2017b, 3–4. 29–42. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2017.27.3-4.29>
- Sher, Davide: 3D Hubs Publishes Complete 3D Printing Technologies Infographic. *3D Printing Media Network*, 2016. november 4. Online: www.3dprintingmedia.network/3d-hubs-publishes-complete-3d-printing-technologies-infographic/