

DARUKA NORBERT* – KUGYELA LÓRÁND** – EMBER ISTVÁN***

TÖBBKOMPONENSŰ ROBBANÓANYAG ÉS ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

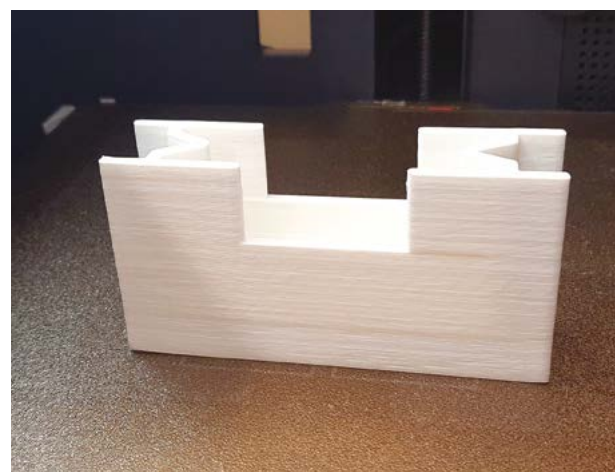
II. RÉSZ

Az orosz-ukrán háború előtt a löpor, a trotil és a hexogén mind a katonai, mind az ipari robbantástechnika területén szinte korlátlan mennyiségben rendelkezésre állt. Mára a löporgyárak az alapanyaghiány miatt több évre előre vesznek csak fel rendelést, így számos robbanóanyag, pl. a TNT hiánycikk lett. A magyar szakirodalomban alig ismert kétkomponensű robbanóanyagok alkalmazása a honvédelmi területen lehetőséget ad a katonai műveletek hatékonyabb és sokoldalúbb végrehajtására. A szerzők cikkükben az új, magyar fejlesztésű, speciális műszaki robbantástechnikai feladatok végrehajtására is alkalmas, helyszínen előállítható, többkomponensű robbanóanyag (TKR) kifejlesztését mutatják be. Az új rendszer jelentős mértékben növeli a hatékonyságot, csökkenti a kockázatokat és egyszerűsíti a robbantási műveletek lebonyolítását. A cikk második részében az additív gyártás lehetőségeit és a TKR gyakorlati alkalmazását ismerhetjük meg.

A technológia rohamosan fejlődik. Néhány éve még a kisszériás gyártás és a prototipizálás eszközeként tekintettünk ezekre a technikai lehetőségekre, de napjainkra ez már jelentősen megváltozott. Természetesen szeretnénk eltekinteni a piaci termékek részletes gazdasági elemzésétől, de egyes esetekben (akár a néhány tízezer darabos terméksorozatok esetében is) olcsóbb lehet valamilyen additív megoldás, mint a fröccsöntés. Alapvetően ez a polimerekre, esetleg kompozit polimerekre igaz, mert a fémtermékek ilyen gyártása még jelentős költségekkel járhat. Persze valószínű, hogy a holnap megoldásai várhatóan ezt a technológiát is a könnyebben elérhető megoldások közé sorolják majd.

A TKR alkalmazása esetén szinte magától értetődik a 3D nyomtatás, mint alkatrészgyártási megoldás. [1] [2] [3] [4] Ennek legolcsóbb, legelterjedtebb változata a szálhúzásos vagy szálolvastásos¹ technológia. Van más, széles körben elérhető eljárás, mely alkalmas lehet robbantástechnikában alkalmazható alkatrészek gyártására, de írásunkban csak az FDM-technológiát elemezzük mélyebben, mert itt rendelkezünk igazolt eredményekkel. (1. ábra)

A viszonylag olcsó alapanyagot dobra csévélve vásárolhatjuk meg, melyet szálnak vagy filamentnek is neveznek. A legelterjedtebb polimerek az FDM-technológia esetében az



ABS (acrylonitrile butadiene styrene), ASA (acrylonitrile styrene acrylate), PLA (poly lactic acid, magyarul: politejsav), PETG (polyethylene terephthalate glycol), PC (polycarbonate) és PA (polyamid, magyarul: nejlón), melyeknek kompozit formái is elérhetők.

A gyártás folyamata során az alapanyag száltozással (kevésbé elter-

1. ÁBRA. Alkatrész egy nagy sebességű nyomtató építőterében (A szerzők felvétele)

2. ÁBRA. Eltérő színnel készített támaszok (A szerzők felvétele)



AZ ADDITÍV GYÁRTÁS LEHETŐSÉGEI

A rétegről rétegre felépített tárgyak manapság már a háztartások számára is elérhetők. Sok esetben szolgáltatásként is megvásárolhatjuk, de már viszonylag olcsón, saját részre is beszerezhetünk 3D nyomtatásra képes eszközöket.

¹ Angolul Fused Deposition Modelling (FDM), más elnevezéssel Fused Filament Fabrication (FFF). A végfelhasználó szempontjából nincs marginális különbség.

* Robbanóanyag-ipari szakmérnök, a katonai műszaki tudományok habilitált PhD fokozatos, alezredes, MH Transzformációs Parancsnokság, Transzformációs Igazgatóság, Tudományos Kutatóhely. ORCID: 0000-0002-7102-1787

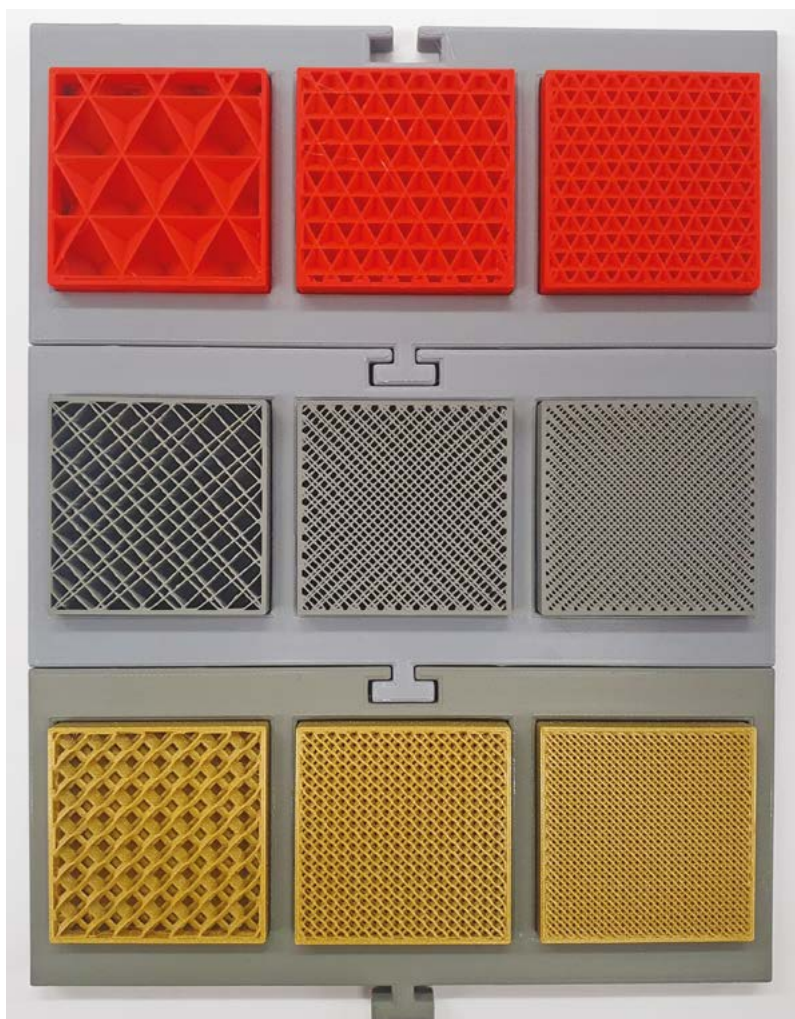
** Robbanóanyag-ipari szakmérnök, a katonai műszaki tudományok PhD fokozatos, CerTrust Kft. Vezető vizsgálómérnök (robbanóanyagok). ORCID: 0000-0002-2869-8864

*** Robbanóanyag-ipari szakmérnök, a hadtudomány PhD fokozatos, alezredes, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Műveleti Támogató Tanszék, adjunktus. ORCID: 0000-0002-9877-0366

3. ÁBRA. Fastruktúrájú támasz
(A szerzők felvétele)



4. ÁBRA. Kitöltési mintázatok eltérő sűrűséggel
(A szerzők felvétele)



jedt) vagy behúzással jut el a nyomtatófej-egységbe, ahol a rá jellemző hőmérsékletre hevített környezetben megolvad, majd egy fúvókán keresztül kipréselődik, extrudálódik az építőtérben elhelyezett asztalra, mely általában szintén előmelegített. [1; 233.] A technológia során a fej és a tálca valamilyen megoszlásban képes a tér három dimenziójában elmozdulni, és ennek eredményeképpen lehetségessé válik az alkatrész rétegeinek egymásra helyezése. (2. ábra)

Maga a technológia a legtöbb esetben számos technikai paraméter beállítására alkalmas előkészítő szoftver alkalmazásával kezdődik, mely az elkészített és betöltött elektronikus tervek, 3D objektumok gyártásához szükséges mozgásokat generálja – sok más részlettel együtt – a 3D nyomtató számára. Az egyik ilyen kulcskérdés a támaszokban rejlik, mivel az építési eljárás során a tálcával párhuzamos felületek esetében szükség van valamilyen alátámasztásra, mivel „lebegő” felületek kialakítására nem képes a technológia. Ez azonban természetesen csak korlátozottan igaz, hiszen a nagy sebességű nyomtatók esetében ez centiméteres áthidalást is elérhet (3. ábra), de ez erősen függ az alapanyagtól és az adott nyomtatótól. Az így kialakított támaszok a végtermékeken nem szükségesek, azokat el kell távolítani. A biztos tartás kialakításához, illetve a támaszok sérülésektől mentes és gyors eltávolítására több megoldás is létezik. Előfordulhat, hogy a támaszokat más színű alapanyaggal nyomtatjuk (2. ábra), hogy pontosan látszódjon az eltávolítandó réteg, de lehetséges akár faágszerű struktúra kialakítása is. Ezek egyedi kinézetű szerkezetek, melyek könnyen eltávolíthatók, és minden támasztási pont az építőtálca felületére vezethető vissza, tehát az egymás feletti felületek nem egymáson fekszenek fel a közbenső támaszok által. (3. ábra) A támasszal érintkező felület általában nem teljesen sima, ami sok esetben probléma egy termék esetében. Ilyenkor utókezelésre lehet szükség (pl. ASA felület acetons kezelés), vagy a támaszba nem tapadó, közbenső réteg építésére (pl.

PETG és PLA alapanyagok nem tapadnak egymáshoz, ezért ideálisak ilyen feladatra), ha a nyomtató képes többféle filamentet egyszerre felhasználni.

Egy másik fontos tényező a kitöltés. Nem minden esetben akkor érjük el az elvárt minőséget a gyártott alkatrészeknél, ha teljesen tömören készülnek el. Az FDM-technológia esetében tucatnyi belső kitöltési mintázatból választhatunk, és a kitöltés sűrűségét is meghatározhatjuk. (4. ábra) Ez anyagtakarékossági, gyártási idő és anyagi jellemzők szempontjából is fontos lehet!

Amennyiben kompozit polimerekre lenne szükség, a legtöbb alapanyaggyártónak van rá elérhető megoldása. A fent említett alapanyag típusok esetében könnyen találhatunk olyat, mely mikron-méretű szénzással kevert, és így képes jelentősebb terhek felvételére, ha alkatrész készül belőlük. Nem csak mikron-méretben lehetséges ilyen szálakat elhelyezni a termékekben. Folyamatos szálerősítés elhelyezésére is van lehetőség, de az ilyen anyagok már nem tekinthetők olcsónak, és az alapanyagok ára is jóval magasabb, mint az egyszerűbb esetekben. Az ilyen tárgyak egyes esetekben – teherviselésben vagy szilárdságban – akár az alumíniummal is vetekedhetnek. Az FDM-technológia egyértelmű hátránya az úgynevezett „Z” gyártási irányban azonosítható, ugyanis ebben az irányban mozdul el az alkatrész felfelé vagy lefelé, tehát a rétegek ebben az irányban tapadnak egymáshoz. Ez természetesen az eredményezi, hogy a húzásból fakadó terheket ez a gyártási irány viseli el a legkevésbé, ráadásul ebben az orientációban folyamatos szálerősítés beépítésére sincs lehetőség. Ezt tehát jelentős hátrálynak tekinthetjük, de mivel ismert előttünk, ezért a gyengeség tervezhető és számítható.

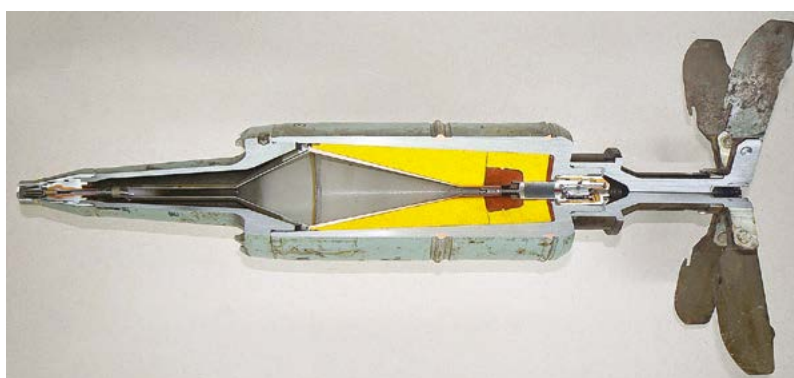
Ezek a technológiai lehetőségek megfelelnek arra, hogy egyedi, robbantástechnikában alkalmazható alkatrészeket is készíthessünk. Ezek a polimer vagy kompozit-polimer tárgyak főleg a kumulatív töltetek esetében válhatnak a jövőben kifejezetten hasznossá. A lyukasztás és vágás robbantással történő megoldása ki-



5. ÁBRA. Vágótöltet
plasztikus
robbanóanyaggal töltve
(A szerzők felvétele)



6. ÁBRA. A vágótöltet
hatása a céltárgyon
(A szerzők felvétele)



7. ÁBRA. A 125 mm-es
BK-14M HEAT lövedék
szerkezeti felépítése [7]

hívásokkal teli, sok esetben egyedi töltetgeometriát kíván, ami jelentős kivitelezési költséget okoz. Természetesen a 3D nyomtatással ezek a költségek jelentősen csökkenthetők.

Az egyedileg méretezett töltetekhez egyedi lyukasztó- vagy vágóbetét is illik, melyeket döntően nagy sűrűségű anyagokból szükséges elkészíteni, a lehető legnagyobb teljesítmény elérése érdekében. A jelenleg folyó kutatások azonban azt mutatják,

hogy a polimer lyukasztó- és vágótölteteknek alacsony sűrűségű anyagokból készíthető is van létjogosultsága. [5] [6] Ilyen esetekben a tölteteket az alkalmazás helyszínén valamilyen plasztikus robbanóanyaggal kell elkészíteni. (5. ábra) Mivel a felhasználás főleg katonai, ezért nem egy szokványostól eltérő eljárás. Kizárólag az anyagok és a gyártási technológia újszerű, az eredmény azonban igazolhatóan megfelel az elvárásoknak. (6. ábra)

8. ÁBRA. Az inert BK-14M HEAT lövedék falának egyoldali lyukasztása és vágása kumulatív töltet által (Fotók: Kugyela Lóránd)



Azonban a robbanóanyaggal dolgozó szakemberek a polgári és katonai területen egyaránt tudják, hogy az ilyen kumulatív alakos- vagy idomtöltetek, illetve a bonyolult, belső geometriával rendelkező összpontosított töltetek esetében nagyon fontos a teljes térkitöltés. Ezt a helyszínen elérni plasztikus rob-

banóanyaggal nem könnyű feladat. Az alakítható robbanóanyagok eltérő hőmérsékleten jelentősen eltérően tölthetők be, főleg a kis átmérőjű, precíziós töltetházakba. Ez a robbantást előkészítő szakember nagy gondossága ellenére is eredményezheti a töltet hatékonyságának csökkenését. Ennek elkerülésére kiváló meg-

oldás lehet egy folyékony, akár több komponensből a helyszínen biztonságosan előállítható robbanóanyag, mint a TKR.

A TKR (TÖBBKOMPENSÚ ROBBANÓANYAG) A GYAKORLATBAN

Annak ellenére, hogy a robbanóanyag-keverékből sokféle kumulatív töltet készült, a vizsgálata vagy tulajdonságainak értékelése nem lett volna teljes, ha éles feladatkörben nincs kipróbálva. A robbanótesteken történő elsődleges működést nemrobbanó testeken vizsgáltuk. Erre ezért volt szükség, hogy megvizsgáljuk azt, hogy megfelelő módon képes-e a robbanótest falát roncsolni-átvágni vagy éppen lyukasztani. Ehhez megfelelő céltárgynak bizonyult a BK-14M HEAT lövedék², amelynek a változó falvastagsága és komplex szerkezete több metodika kipróbálását is lehetővé tette. (7. ábra)

A céltárgyra 70 és 150 gramm TKR-robbanóanyaggal töltött, FDM-nyomtatóval készült kumulatív töltetet helyeztünk, amelyek mind a két esetben átlukasztották a lövedék falát, azaz a robbanási gázsugár a rob-

² 125 mm-es, szovjet/országi gyártmányú lőszer, a T-72-es és T-80-as harckocsik páncéltörő lövedéke.



9. ÁBRA. AT4 HEAT lövedéken elhelyezett kumulatív vágótöltet; jobbra a teljesen megsemmisült lövedék (Fotók: Bokros Tünde Ibolya)



10. ÁBRA. Kumulatív töltet részleges gyújtószerkezettel rendelkező, 60 mm-es aknavetőgránáton (balra); jobb oldalon a teljesen megsemmisült gránát helye látható (Fotók: Bokros Tünde Ibolya)

banóanyagot elérte volna. Emellett a 100 gramm robbanóanyagot tartalmazó, 250 mm hosszú vágótöltetet is kipróbáltuk. Ennek a vágóképessége lágyvas esetén 13–15 mm között változott. A nagy szilárdságú lövedékfalat nem vágta át teljesen, de a kúp aljánál olyan mértékben behatolt, hogy egy éles lövedék megsemmisítését eredményezte volna. A kísérlet ezáltal sikeresnek bizonyult. (8. ábra)

A BK–14M lövedék mellett aknavetőgránáton is végeztünk sikeres vizsgálatot, mely lehetővé teszi, hogy éles robbanótesteken is értékelhesük a TKR teljesítményét.

HATÁSTANULMÁNY ÉLES ROBBANÓTESTEKEN

A TKR terepi vizsgálatai során általános pozitív tapasztalatokat szerezünk, különösen annak ismeretében, hogy a legnagyobb töltettömegünk 140–160 gramm volt. Ez nem tűnik soknak, hiszen ez tulajdonképpen 2 db 75 g-os TNT hengeres préstestű robbanóanyag tömegének felel meg. Korábbi feltételezést igazoltunk azaz, hogy a megfelelően irányított robbanóanyag-töltet képes azt elvégezni, amit ráhelyezett töltetként csak nagyobb tömeggel tudunk elérni. Azonban ez kétségtelenül hosz-

szabb előkészítési és pozícionálási időt igényel irányított töltet esetén.

Az AT4-es lövedéke³ plasztifikálóval kevert oktogén, amely nagyfokú érzéketlenséget mutat kumulatív sugárral szemben is. Ezt megtapasztaltuk, mivel egy kis kumulatív töltettel teljesen át tudtuk lyukasztani a fő robbanóanyag-egységét. Emiatt döntöttünk a vágótöltet alkalmazása mellett, mivel azzal lehetőség volt a farokrészben található booster-töltet és a főtöltet egyidejű roncsolására. Beigazolódott a döntésünk, mivel ez esetben a robbanótest teljesen megsemmisült. (9. ábra)

³ Az AT4 egy vállról indítható, HSN (hátrasiklás nélküli) fegyver, amelyet a svéd Saab a harckocsik és páncélozott járművek ellen fejlesztett ki. Az eszköznek számos változata létezik, az alapváltozata (AT4 HEAT) 350 mm vastag homogén páncél átütésére képes.

11. ÁBRA. Kis méretű EFP-töltettel széttrött inert gránáttest (Fotó: Kugyela Lóránd)



12. ÁBRA. 125 mm-es repeszromboló gránát a robbanás utáni szétnyílt állapotban. A sárga nyíl a kumulatív sugár behatolási pontja (Fotó: Bokros Tünde Ibolya)

Aknavető-gránát megsemmisítését többféle metodikával próbáltuk, és alapvetően mindegyik sikeresnek bizonyult. Ez annak is köszönhető, hogy a gránáttest vékonyabb és törékenyebb kén-tartalmú acélból készült. A robbanó-

anyag ütés-hullám ilyen kombinációval könnyebben megbirkózik, és a szabaddá váló robbanóanyag-tömeg könnyebben iniciálódik amellet, hogy a széttrött, súrlódó fémrészek is iniciálási forrásként lépnek fel. (10. ábra)

A gránáttest törékenységet mutatja, hogy a módosított EFP-lemezes⁴ (explosívely formed penetrator – robbantással formált lövedék) 40 gramm TKR-rel töltött kísérleti töltet sikeresen törte el az inert próbatestet. (11. ábra)

Azonban a gyakorlatban uniformizálni azt, hogy minden esetben csak eltörje a robbanótest fémházát és a robbanóanyag ne robbanjon fel, na-

gyon nehéz feladat, mivel nincs két ugyanolyan gránáttest, nincs két ugyanolyan töltet. A fentiek miatt EFP-töltetekkel további vizsgálatot nem végeztünk.

Az egyik leglátványosabb eredményt egy 125 mm-es repeszromboló gránát esetén értünk el. Az FDM-technológiával készült kumulatív ház a gránát falát átütötte, és a benne található A-IX-2⁵ robbanóanyag csak részlegesen robbant fel, deflagrált. (12. ábra)

A gránáttestet átvizsgálva vált láthatóvá a belső falon jól kivehető hátfelület, ahol az égés deflagrációba ment át. A 23% alumíniumport tartalmazó A-IX-2 kedvezőbb volt a kísérletek szempontjából, mivel a magasabb inertanyag-tartalmú robbanóanyagban a deflagrációt előidéző körülmények nagyobb valószínűséggel alakulnak ki, mint például egy Composit-B⁶ robbanóanyagot tartalmazó robbanótestben. (13. ábra)

ÖSSZEGRZÉS

Magyarországon még soha nem alkalmazott, önmagukban nem robbanóképes alkotó komponenseknek a felhasználás helyszínén történő összekeverése



⁴ Az EFP-töltet lényege, hogy robbantással egy kemény, nehézfém lövedéket formáz és lö ki nagy sebességgel a célpont felé.

⁵ Az A-IX-2 vagy Hexal egy 73% RDX-ből és 4% viasszal flegmatizált 23% alumíniumporból álló orosz eredetű robbanóanyag, amelyet modern, többnyire orosz katonai lövedékekben alkalmaznak.

⁶ Egy Hexotol vagy Hexolite néven is ismert, 60%-ban RDX- és 40%-ban [TNT+(1% viasz)]-alapú, magas hatóerejű keverék robbanóanyag, amit fő töltésként tüzéségi lövedékekben, rakétákban, taposóaknáknakban, kézigránatokban és különféle egyéb lőszerekben alkalmaznak.



által a töltet kis mennyiségben is létrehozható. A speciális robbanóanyag kifejlesztésére egy áttörő újítást jelent, hiszen segítséget nyújthat a különböző típusú katonai célpontok hatékony megsemmisítésében és a műveleti célok elérésében is. Azonban a fejlesztésük és alkalmazásuk során figyelembe kell venni a békeidőszakban történő alkalmazhatóságot is.

Ez az új robbanóanyag a modern, innovatív technológiai fejlesztéseket felhasználva számos olyan területen alkalmazható, ahol a robbanóanyag szállítása és tárolása során felmerülő szigorú szabályozások és bonyolult adminisztrációs feladatok jelentős megkötéseket rónak az állományra. Azáltal, hogy a robbanóanyag-komponensek külön-külön nem számítanak veszélyes anyagnak, a szabályok nagymértékben egyszerűsödnek, így mind a tárolás, mind a szállítás, mind a robbantási munkálatok előkészítése gyorsabbá és biztonságosabbá válik.

A jelenlegi ipari és katonai biztonsági környezetben szükséges lehet egy különleges feladatok ellátására vagy speciális műszaki robbantástechnikai feladatokhoz alkalmas, a helyszínen előállítható, kis átmérőben gyutacsindítható, többkomponensű robbanóanyagra, amely alkalmas lehet például a TNT kiváltására vagy annak alterna-

tívjaként történő alkalmazásra. A fejlesztés során végrehajtott kísérletek eredményei alapján a magyar „találmány” alkalmas az említett hiányok pótlására, illetve a ma még alkalmazásban lévő robbanóanyagok alternatívjaként történő használatra.

A kutatások során kikísérletezett keverék adalékanyagokkal optimalizálható, hogy nagyobb brizanciát (robbanási érzékenységet) mutasson, vagy éppen módosítható annak érdekében, hogy kedvezőbb oxigén-egyenlege legyen. A kétkomponensű, gél állagú robbanóanyag nagy előnye többek között, hogy a komponensek önmagukban nem robbanásképesek, így a tárolásuk és a felhasználási helyre történő szállításuk is biztonságos. A robbanóanyag a felhasználás előtt, a helyszínen történő egyszerű összekeverés által „készül el”, mely további előnyt jelent a jelenleg alkalmazott, helyszíni bekeverésű robbanóanyagokhoz képest.

Egy ilyen új megközelítést implementálni egy évtizedek óta létező, szigorúan és vérrel írt területen nem könnyű feladat. Ezt az sem segíti, hogy mind a polgári, mind pedig a katonai területen a fejlesztések szintén sokévnnyi elmaradásban vannak. Tanulmányunkban vizsgáltuk és értékeltük a TKR, mint teljesen újkeletű robbanóanyag alkalmazhatóságát a Magyar Honvédség vonatkozásában. Bebizonyosodott, hogy célzott, feladatra szabott technológiával kevesebb anyagfelhasználással is megvalósíthatók bizonyos tüzszerész feladatok. A kutatás folytatódik és a jövőben várhatóan újabb fejleményekről tudunk majd beszámolni. ■

13. ÁBRA. 125 mm-es repeszromboló gránát a robbanás utáni szétnyílt állapotban. A sárga nyíl és a vonal mutatja az égés deflagráció határvonalát. Az alsó részen látható a megmaradt A-IX-2 robbanóanyag-maradvány (Fotó: Bokros Tünde Ibolya)

HIVATKOZÁSOK

- [1] Gál Bence – Németh András: Additív gyártástechnológiák katonai alkalmazásának vizsgálata, különös tekintettel a katonai elektronika területére. *Hadmérnök*, 2019/1, 231–249. <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.19>
- [2] Végvári Zsolt et al.: A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I. rész. *Haditechnika*, 2022/6, 56–60. <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.09>
- [3] Zentay Péter et al.: A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei II. rész. *Haditechnika*, 2023/1, 49–55. <https://doi.org/10.23713/HT.57.1.09>
- [4] Zentay Péter et al.: A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei III. rész. *Haditechnika*, 2023/2, 57–62. <https://doi.org/10.23713/HT.57.2.11>
- [5] Ember István: Modern kumulatív töltetek hatékonyságának vizsgálata. *Haditechnika*, 2022/6, 15–20. <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.03>
- [6] Ember István: Additív eljárással készült lineáris vágótöltetek működésének vizsgálata. *Hadmérnök* 2023/3, 5–17. <https://doi.org/10.32567/hm.2023.3.1>
- [7] 125mm BK-14M HEAT in flight https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/02_-_125mm_BK-14M_HEAT_in_flight.jpg (Letöltve: 2025.03.12.)