

Ember István,¹ Dénes Kálmán,² Daruka Norbert,³ Vég Róbert,⁴ Kovács Zoltán⁵

Az additív gyártástechnológia alkalmazásának lehetőségei és korlátai szikramentes kéziszerszámok készítése során⁶

The Possibilities and Limitations of Additive Manufacturing Technology in the Production of Non-Sparking Hand Tools

A cikkben ismertetett kutatás célja az additív gyártástechnológia alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata szikramentes biztonsági kéziszerszámok tervezése, gyártása és fejlesztése során. Vizsgáljuk a 3D-nyomtatott kéziszerszámok használhatóságát, alkalmazási és biztonsági megfelelőségét, valamint a használatuk során felmerülő különböző problémák okait és azok megoldásait. Ebben az írásban a 3D-nyomtatási technológiákat, valamint a nyomtató alapanyagokat mutatjuk be, elemezzük és értékeljük. Arra keressük a választ, hogy melyik nyomtatási technológia és anyag felel meg legjobban az ilyen szerszámokkal szemben támasztott követelményeknek.

Kulcsszavak: additív gyártástechnológia, 3D-nyomtatás, szikramentes biztonsági szerszámok

¹ Tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti Támogató Tanszék, e-mail: ember.istvan@uni-nke.hu

² Építőmérnök, e-mail: denes.kalman.1975@gmail.com

³ Robbanóanyag-ipari szakmérnök, e-mail: daruka.norbi@gmail.com

⁴ Egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék, e-mail: vegh.robort@uni-nke.hu

⁵ Egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti Támogató Tanszék, e-mail: kovacs.zoltan@uni-nke.hu

⁶ A 2022-2.1.1-NL-2022-00012 számú „Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium” projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Laboratóriumok pályázati program finanszírozásában valósult meg.

The aim of the research presented in the article is to explore the application possibilities of additive manufacturing technology in the design, production, and development of non-sparking safety hand tools. We examine the usability, application suitability, and safety compliance of 3D-printed hand tools, as well as the causes of various problems that arise during their use and their solutions. In this paper, we introduce, analyse, and evaluate 3D printing technologies and printing materials. We seek to answer, which printing technology and material best meet the requirements set for these tools.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, non-sparking safety tools

Bevezetés

A különböző kéziszerszámok évezredek óta fontos részei a mindennapoknak, a háztartásoktól kezdve a különböző ipari tevékenységekig mindenhol megtalálhatók, mivel megkönnyítik és hatékonyabbá teszik a munkavégzést. A végrehajtandó feladatok változásával együtt változtak és fejlődtek ezek az eszközök éppen úgy, mint ahogyan a velük szemben megfogalmazott elvárások és követelmények is.

A felhasználói igények változásának megfelelően kialakultak a különleges feladatok elvégzésére alkalmas célszerszámok, majd az azok készítésére és fejlesztésére szakosodott gyártók, valamint megjelentek a munkavégzés biztonságának növelésére irányuló igények és törekvések is. Jogszabályokban rögzítették az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés személyi, tárgyi és szervezeti feltételeit csakúgy, mint a munkáltatók és a munkavállalók feladatait, jogait és kötelességeit.

Szikramentes biztonsági szerszámok

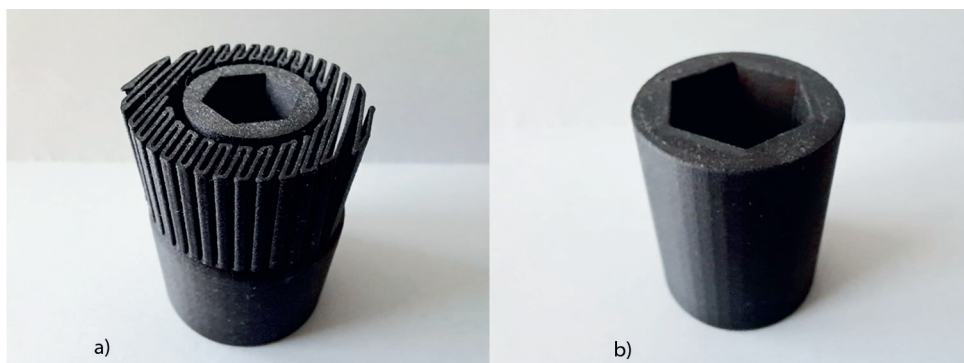
A műszaki munkák végrehajtása során használt kéziszerszámok és az azokkal szemben meghatározott követelmények egyik jelentős változását minden bizonnyal a nyersanyagok és az energiahordozók bányászata során sújtólégrobbanás⁷ miatt bekövetkezett bányaszerencsétlenségek okozták. Ekkor kezdtek el széles körben elterjedni azok a robbanásbiztos berendezések és szerszámok, amelyek használatát robbanásveszélyes környezetben napjainkban már jogszabályok szabályozzák, mint a meghatározó jelentőségű 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet.⁸ A rendelet értelmezésében robbanásveszélyes környezetnek minősül minden olyan gáz, gőz, permet vagy por formájú gyúlékony anyag és levegő keveréke normál légköri feltételek mellett, amelyben a gyújtást követően az égés a keverék még meg nem gyújtott részére is teljes mértékben áttérjed. A robbanás elkerülésének érdekében ezért elengedhetetlen annak

⁷ Sújtólégrobbanás abban az esetben következhet be, ha a levegőben a metán 4–15 (V/V)%-ban van jelen. Alacsonyabb koncentráció esetén nem következik be detonáció, magasabb esetén égés alakul ki.

⁸ 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet.

biztosítása, hogy a munkavégzés során használt szerszámok által esetlegesen generált szikra energiája alacsonyabb legyen, mint a munkavégzés helyén, a robbanásveszélyes környezetben a léghőben lévő gáz gyulladáspontja. Ez a gyakorlatban az úgynevezett szikramentes szerszámok használatával valósítható meg.

A szikramentes biztonsági szerszámok elsősorban vasat nem tartalmazó ötvözetből (általában réz-ötvözetekből, alumínium-bronzból, ón-bronzból vagy berillium-rézből), bőrből, fából vagy műanyagból készülnek annak érdekében, hogy minimálisra csökkentsék a szikraképződés, ezáltal a robbanás bekövetkezésének kockázatát az ATEX 1999/92/EC⁹ szerint gyúlékony vagy könnyen gyúlékony gőzökkel, folyadékokkal vagy porokkal rendelkező zónákban, a szerszámok használata közben. További fontos tulajdonságuk a kialakításuk, amelynek során kerülni kell a szikrát okozható éles széleket vagy sarkokat is (1. ábra).



1. ábra: 3D-nyomatással készült szikramentes dugókulcs
a) utómunkálatok előtt, b) késztermék az utómunkálatokat követően
Forrás: a szerzők felvétele

Figyelembe kell venni továbbá, hogy ezeknek a szerszámoknak a mechanikai tulajdonságai, anyagjellemzői nem érik el az általános acélszerszámok tulajdonságait, ezért a szikramentes szerszámok túlterhelését el kell kerülni, fokozott óvatossággal kell azokkal dolgozni.

A szikramentes biztonsági szerszámokat napjainkban számos területen alkalmazzák, ahol a szikraképződés vagy a keletkező hő biztonsági kockázatot, robbanásveszélyt jelent. Az alábbi felsorolás néhány jellemző példát mutat be a szikramentes biztonsági szerszámokra és azok felhasználási területeire:

- Kéziszerszámok: villáskulcsok, csillagkulcsok, dugókulcsok, kalapácsok, csavarhúzó, fogók stb. Ezek például az olaj- és gáziparban (2. ábra) vagy tűzserézs mentesítési feladatok végrehajtása során használhatók.
- Vágóeszközök: hidegvágók, kések, balták, fűrészek stb. Többek között tűzserézs mentesítési feladatok, vegyipari vagy bányászati feladatok végrehajtása során használhatók.

⁹ Directive 1999/92/EC.

- Kézifúrók és marógépek: a teljesség igénye nélkül az építőiparban például gázvezetékek karbantartásánál, a szénbányászatban, továbbá a vegyiparban használhatják ezeket.

A szikramentes biztonsági szerszámokat különös gondossággal, körültekintően kell nemcsak használni, hanem karbantartani is annak érdekében, hogy azok hosszú időn keresztül használhatók legyenek, és megőrizzék a biztonságos használatot biztosító tulajdonságaikat.



2. ábra: 3D-nyomatással készült speciális hordókulcsok

Forrás: a szerzők felvétele

A jogszabályi előírásoknak eleget téve egyre több helyen van alkalmazási kötelezettség szikramentes szerszámokra annak érdekében, hogy a munkakörnyezet biztonságosabb legyen. Ezek között található meg azok az ágazatok, ahol tűz- vagy robbanásveszélyes anyagok előfordulnak, mint például (a teljesség igénye nélkül):

- a bányászat;
- a vegyipari üzemek;
- a veszélyesáru-szállítás;
- az üzemanyagtöltő állomások;
- a gázcserelepek;
- a robbantástechnika;
- az űrtechnika
- és a környezetvédelem.

A fent említett rendelet előírásai jelennek meg a hatályos 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet,¹⁰ az Országos Tűzvédelmi Szabályzat PB-gázcserelepekre vonatkozó üzemeltetési követelményei között,¹¹ amelyek értelmében:

¹⁰ 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet.

¹¹ A rendelet 175. §-a határozza meg a PB-gázcserelepek tűzvédelmi követelményeit és kategóriáit.

- Az „1”–„2” kategóriájú cseretelepek kivételével a palackok kiadása és bevételezése csak testhezálló, az üzemeltető által beszerzett védőruhában, fedett fővel és szikrát nem okozó, antisztatikus lábbeliben végezhető. Műszálból készült alsó- és felsőruházat nem viselhető.
- A „2”–„4” kategóriájú cseretelepeket szükségvilágítás céljára el kell látni legalább 1 darab, a „kategórián felülit” legalább 2 darab robbanásbiztos védettségű hordozható kézilámpával.
- Azokon a cseretelepeken, ahol acélpalackok tárolása és forgalmazása is történik, a robbanásveszélyes övezetekben csak szikrát nem okozó szerszámokkal lehet dolgozni, acél szerszámok használata tilos.

Az ipar mellett a védelmi szférában is megjelenik a speciális kéziszerszámok használatára vonatkozó felhasználói igény, aminek teljesítése sok esetben jogszabályi elvárás is. A Magyar Honvédség műszaki alakulatainak katonái a szervezetük alaprendeltetéséből származó szakfeladataikat a rendszeresített technikai eszközökkel és kéziszerszámokkal hajtják végre. Ezek között ki kell emelni a Magyar Honvédség 1. Tűzszerész és Folyamőr Ezredet, amelynek katonái a 142/1999. (IX. 8.) Kormányrendelet¹² előírásainak megfelelően napi rendszerességgel tűzszerészeti mentesítési feladatokat látnak el robbanásveszélyes környezetben. A közszolgálati feladat végrehajtása során indokolt esetben szikramentes szerszámokat használnak, amelyekkel az alakulat rendelkezik.

A kereskedelmi forgalomban megvásárolható szikramentes szerszámokat néhány nagy nemzetközi gyártó készíti, hazánkban pedig számos forgalmazótól lehet beszerezni. Ezek a minősített szerszámok megfelelnek a vonatkozó előírásoknak, így például a „Beta” szikramentes szerszámokat a BAM (Szövetségi Anyagkutató és Vizsgáló Intézet) a 99/92/EC Európai Irányelvnek megfelelően tanúsítja.¹³

Hipotézisünk szerint az additív gyártástechnológiát használó 3D-nyomatás megteremti annak a lehetőségét, hogy a felhasználói és a jogszabályi elvárásoknak egyaránt megfelelően jelentősen olcsóbban tudjunk különböző szikramentes biztonsági kéziszerszámokat készíteni, mint amennyiért jelenleg a kereskedelemben megvásárolhatók ezek a termékek. Feltevésünk szerint további előnyt jelent a szerszámok helytől, típustól és darabszámtól független gyártathatósága, mivel az ellátási lánc kizárásával biztosítható a gyártás. Feltételezésünk igazolására az alábbiakban kutatásunk eredményeként bemutatjuk azokat az additív gyártástechnológiai lehetőségeket – tervezésre, gyártásra, valamint fejlesztésre vonatkozóan –, nyomtatókat és nyomtató alapanyagokat, amelyeket a 3D-nyomatás az ipar és a honvédelem számára kínál a szikramentes biztonsági kéziszerszámok készítésére.

¹² 142/1999. (IX. 8.) Korm. rendelet.

¹³ Lásd: www.szerszamallomas.hu/Beta-000550847-Beta-55Ba-17X19-Szikramentes-Villaskulcs

A szikramentes biztonsági kéziszerszámokkal szemben megfogalmazott követelmények

A szikramentes használatot biztosító kéziszerszámoknak különböző elvárásoknak, jogszabályi, gyártási és szabványkövetelményeknek kell megfelelniük annak érdekében, hogy azokat hatékonyan és biztonságosan lehessen használni. Ezek a fontosabb követelmények és előírások, valamint a használathoz szükséges lényegesebb dokumentációk a következők lehetnek:

- **Teljesítményhatékonyság:** a kéziszerszámoknak az elvárt teljesítményt (azaz egységnyi idő alatt elvárt munkavégzést) kell biztosítaniuk az adott feladat elvégzéséhez. Ez magában foglalja a munkavégzés hatékonyságát növelő, egyedi célszerszámok kialakítását-biztosítását is.
- **Minőség:** a kéziszerszámoknak jó minőségű, tartósságot biztosító anyagokból kell készülniük. A minőségi nyomtató alapanyagok és a jól kiválasztott gyártási folyamatok garantálják a hosszú élettartamot, amivel hozzájárulnak a munkavégzés jó minőségéhez.
- **Műszaki specifikációk:** a kéziszerszámoknak meg kell felelniük a meghatározott műszaki specifikációknak, ami a teljesítmény, a méretek és az egyéb műszaki paraméterek szabványosítását jelenti.
- **Minőség-ellenőrzés:** a gyártás során rendszeresen ellenőrizni kell a gyártási folyamatot és a késztermékeket annak érdekében, hogy folyamatosan biztosítani tudjuk az elvárt minőséget. Ehhez ki kell alakítani a szükséges minőség-ellenőrzési eljárásokat és be rendezéseket.
- **Szikramentes használat tanúsítása:** a kéziszerszámok vizsgálata és tanúsítása annak igazolására, hogy azzal robbanásveszélyes környezetben is lehet biztonságosan munkát végezni.
- **Pontosság:** bizonyos feladatok végrehajtása (például információs technológia, űrtechnika) nagyfokú precizitást, pontos végrehajtást igényel, amihez nélkülözhetetlenek a megfelelő méretpontossággal legyártott kéziszerszámok.
- **Biztonság:** a használat során minden kéziszerszámnak a legkisebb kockázatot kell jelentenie a használójára nézve. A biztonságos működéshez hozzájárul például az ergonómiai tervezés, a szükséges védőburkolatok és a különböző biztonsági megoldások.
- **Kényelem, ergonómia:** a kéziszerszámoknak kényelmesen használhatónak kell lenniük, amit már a tervezés során biztosítani kell annak érdekében, hogy a legkisebb erőfeszítést igénylő szerszámokat tudjuk megalkotni. Ez magában foglalja az emberi adottságoknak legjobban megfelelő kialakítást, ami például az ergonómikus fogantyúban, a súlyelosztásban és a rezgéscsillapításban jelenik meg.
- **Védőfelszerelések:** számos kéziszerszám használatakor kiegészítő, de a szerszám szerves részét jelentő védőfelszerelésre is szükség lehet, ami biztosítja például a kéz védelmét véső használatokor. Ezek a felszerelések tovább növelik a felhasználók biztonságát, amire éppen ezért a szerszámtervezésnél különösen nagy figyelmet kell fordítani.
- **Megfelelőség, biztonság:** a tervezett kéziszerszámoknak egyaránt meg kell felelniük a munkahelyi, a nemzeti és a nemzetközi szabványoknak, valamint biztonsági előírásoknak, továbbá rendelkezniük kell a szikramentesességet igazoló szervezet tanúsítványával.

- **Karbantarthatóság:** a tervezett kéziszerszámoknak könnyen karbantarthatónak kell lenniük, ami az elhasználódott, sérült alkatrészek könnyű cseréjét, a szükséges olajozást, valamint az általános tisztítást jelenti.
- **Környezetvédelem:** napjainkban szerencsére egyre nagyobb hangsúlyt kap környezetünk védelme, aminek biztosítása érdekében fontos az olyan környezetbarát gyártási folyamatok és anyagok alkalmazása, amelyek minimalizálják a környezeti hatásokat.
- **Címkézés:** a legyártott kéziszerszámokon fel kell tüntetni számos fontos információt (például a gyártó nevét, a termék megnevezését, azonosítóját, a biztonsági utasításokat), amelyek a kereskedőt és a felhasználót egyaránt segítik.
- **Használati utasítás:** a legyártott kéziszerszámok mellé el kell készíteni a használati utasításokat, amelyek segítik a felhasználókat a helyes használatban és karbantartásban, ezzel biztosítható a szerszámok hosszú élettartama és használhatóságuknak megőrzése.

Fontos hangsúlyozni, hogy a különféle kéziszerszámoknak számos esetben sajátos követelményeknek kell megfelelniük attól függően, hogy azokat milyen feladatra és milyen munkakörülmények között használják.

Mindezekre tekintettel van szükség a lista utolsó elemeként feltüntetett használati utasításra, aminek előírásait és ajánlásait a használónak be kell tartania a hatékony és biztonságos munkavégzés, valamint a szerszám hosszú élettartamának biztosítása érdekében. Ezek azok a fontosabb követelmények és elvárások, amiket elsősorban figyelembe kell vennünk a szikramentes kéziszerszámok gyártási folyamatának kialakítása során.

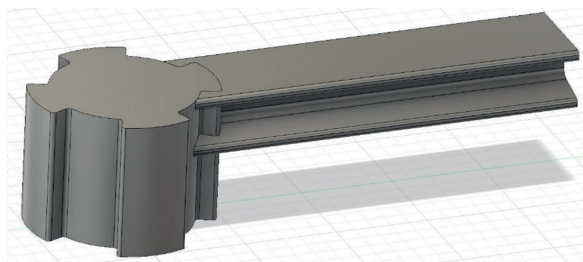
A szikramentes biztonsági kéziszerszámok additív gyártásának folyamata

Az additív gyártástechnológiában végzett kutatásunk során jutottunk arra a feltételezésre, hogy a 3D-nyomatási technológia alkalmazásával jelentősen olcsóbban tudunk többfajta, akár egyedi és testreszabott szikramentes biztonsági kéziszerszámot előállítani anélkül, hogy az az elvárt biztonság rovására menne. A kéziszerszámokkal szemben támasztott követelményeknek megfelelő, egyúttal használhatónak bizonyuló ötletek megvalósításához, azaz a felhasználói és a jogszabályi követelményeknek egyaránt megfelelő szikramentes biztonsági kéziszerszámok előállításához a következő feladatok végrehajtása szükséges:

- az alapadatok gyűjtése és elemzése;
 - felhasználói elvárások;
 - jogszabályi követelmények;
 - a jelenleg megvásárolható termékek vizsgálata;
 - költség-haszon elemzés.
- A 3D-nyomatató alapanyagok vizsgálata, elemzése majd a követelményeknek megfelelő alapanyag kiválasztása. A különböző igényeknek megfelelő, optimális alapanyag kiválasztása egyaránt fontos a biztonsági előírások betartása, a szerszám tartóssága és hatékonysága szempontjából. A vizsgálatok egyik fontos eleme, hogy az alapanyag

önmagában biztosít-e szikramentességet. Ennek igazolására saját laborvizsgálatokat, például szikrapróbát végezhetünk.

- A 3D-nyomatatok vizsgálata, elemzése, majd a követelményeknek megfelelő nyomtató kiválasztása.
- A prototípus tervezése, legyártása és ellenőrzése, szükség esetén módosítása. Tervek készítése CAD-szoftverrel a szerszámokról, figyelembe véve a biztonsági követelményeket, a várható használatot, a funkcionalitást és az alapanyagokat (3. ábra).



3. ábra: Szerszámkulcs CAD-szoftveres tervrajza

Forrás: a szerzők felvétele

- a minőségellenőrzés;
 - méretpontosság vizsgálata;
 - anyagvizsgálatok;
 - gyártási hibák vizsgálata;¹⁴
 - várható élettartam vizsgálata;
 - megfelelő működés és biztonságos használat vizsgálata;
 - a szikramentes használat igazolása, a szerszámok tanúsítása;
- a költségek felülvizsgálata;
- dokumentáció és nyomon követés; a szerszámokhoz tartozó dokumentáció, például használati utasítás, karbantartási utasítás elkészítése, a szerszámok használatának és beválásának nyomon követése;
- végleges gyártmánytervek elkészítése.

A szerszámkészítés iparága folyamatosan fejlődik, hiszen az új technológiák alkalmazásával lehetőség van nemcsak jobb minőségű, hanem egyre hatékonyabb és pontosabb szerszámok gyártására is. Várakozásunk szerint ennek a fejlődésnek lesz fontos állomása a 3D-nyomatás is abban az esetben, amennyiben a szerszámok mechanikai tulajdonságainak biztosítása mellett sikerül igazolni a nyomtatáshoz használt anyagok, ezáltal a késztermék szikramentességét. Erre előzetesen, az akkreditált minősítő vizsgálatokat megelőzően alkalmasak lehetnek az alábbi vizsgálatok:

- szikra- és tűzpróba;
- ütőpróba;

¹⁴ ZENTAY-HEGEDŰS-VÉGVÁRI 2023b.

- elektronmikroszkópos anyagvizsgálat;
- kémiai összetétel vizsgálata;
- laboratóriumi vizsgálatok.

A felsorolt vizsgálatok segíthetnek az anyagok szikramentes használatának igazolásában, de fontos megjegyezni, hogy a szikramentesség nem kizárólag az anyag tulajdonságaitól, hanem a munkafolyamatoktól és egyéb külső körülményektől is függhet.

A 3D-nyomatási technológiák bemutatása

A 3D-nyomatás olyan additív gyártási technológia, amelynek során valamilyen anyag rétegről rétegre történő hozzáadásával készítünk háromdimenziós tárgyakat. Ez az eljárás az ipari felhasználás mellett a védelmi szférában, azon belül a honvédelemben¹⁵ is bizonyította létjogosultságát. A 3D-nyomatási módszereket és nyomtatókat többféleképpen is osztályozhatjuk, ezért cikkünkben mi a kutatásunk szempontjából releváns szempontok alapján csoportosítjuk azokat az alábbiak szerint:

1. A felhasználási terület alapján:
 - kutatás, fejlesztés;
 - prototípusgyártás;
 - gyártás, termelés;
 - oktatás;¹⁶
 - egyéb (például művészet és dizájn, orvostudomány, divat).
2. A nyomtatás folyamata alapján:
 - Fused Deposition Modelling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF);
 - Stereolithography (SLA);
 - Selective Laser Sintering (SLS);
 - egyéb nyomtatók.
3. Az alapanyag típusa alapján:
 - műanyagok nyomtatására alkalmas nyomtatók: az FDM, az SLS, az SLA és egyéb technológiák jellemzően műanyag alapanyagokat használnak, például PLA, ABS stb.;
 - fémek nyomtatására alkalmas nyomtatók: az SLS, az Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) és az Electron Beam Melting (EBM);
 - egyéb nyomtatók (kerámia, beton, étel stb.)

A napjainkban elérhető nyomatási technológiák és alkalmazások száma a felhasználói igények megjelenésével és bővülésével együtt folyamatosan nő. Általánosságban kijelenthető, ami a kutatásunkra kifejezetten igaz, hogy a megvalósítandó projektnek leginkább megfelelő technológiát és alapanyagot kell kiválasztani a cél eléréséhez (4. ábra).

¹⁵ VÉGVÁRI–HEGEDŰS–ZENTAY 2023.

¹⁶ GYARMATI–HEGEDŰS–GÁVAY 2022.



4. ábra: Nyomatási alapanyag kiválasztása 3D-nyomatáshoz

Forrás: a szerzők felvétele

A gyártástechnológiában végzett folyamatos kutatásoknak és fejlesztéseknek¹⁷ köszönhetően a 3D-nyomatásnak napjainkra többféle típusa is kialakult, amelyeket attól függően tudunk csoportosítani, hogy a tárgyak kinyomtatásához milyen eljárást alkalmaznak, és milyen anyagot használnak. Az alábbiakban azokat a releváns 3D-nyomatási módszereket soroljuk fel és ismertetjük röviden, amelyek a kéziszerszámok nyomatása során biztosíthatják az elvárt eredményt:

1. Az FDM/FFF (Fused Deposition Modelling/Fused Filament Fabrication) szálhúzásos eljárásban hőre lágyuló, tekercsben lévő műanyag szálakat, úgynevezett filamenteket olvasztanak fel, amit egy mozgó nyomtatófej segítségével fúvókán keresztül rétegről rétegre raknak le a tervezett test létrehozásához. Az így lerakott egyes rétegek mindig hozzátapadnak az előzőhöz. Az FDM/FFF nyomatási technológia napjainkra széles körben elterjedt, mivel alacsony bekerülési és fenntartási költség mellett széles alapanyag-kínálat érhető el.
2. Az SLA- (Stereolithography) technológia alapján működő 3D-nyomatók a tárgyak elkészítéséhez fényre szilárduló folyékony fotopolimer műgyanta alapanyagokat használnak, amelyeket az építési területen rétegről rétegre fektetnek le, majd egy lézer segítségével rétegről rétegre kötnek össze, keményítenek meg. Ez a technológia teszi lehetővé a legpontosabb és legapróbb részletek megjelenítésére szolgáló nyomatást.
3. Az SLM- (Selective Laser Melting), azaz a fémporok szelektív lézerolvasztása elven működő eljárás az SLS-eljáráshoz hasonlóan, a porágyfúzió elvén működő additív gyártási technológia, amelynek során a nyomtató egy nagy energiájú lézersugarat használ fel

¹⁷ KARA et al. 2023.

a fémpor megolvasztáshoz. Szinte bármilyen összetételű fémporból teljes értékű, nagy pontosságú – sokszor azonban nem megfelelő felületi minőségű¹⁸ – gyártmányokat lehet előállítani, ezáltal akár a harc- és gépjárművek, munkagépek vagy repülőeszközök fém alkatrészei is rövid időn belül reprodukálhatók. Szükség esetén tábori körülmények között is nyomtathatunk alkatrészeket, ezzel jelentősen lerövidíthető az alkatrész-utánpótlás, ezáltal a javítás és az újra hadrendbe állítás folyamata.¹⁹

4. Az SLS- (Selective Laser Sintering), azaz a szelektív lézer szinterezés technológia alapján működő 3D-nyomatók por állagú alapanyagokat (műanyag, fém stb.) használnak az építésre. A nyomtatás során a nyomtatófej az alapanyagot a nyomtatókamra tálcájára a kívánt rétegvastagságban elteríti, majd egy precíz lézer ezt felolvasztja. A nyomtató a tárgyat rétegről rétegre, azok összeolvasztásával hozza létre. A technológiának az a különlegessége, hogy a nyomtatás során a teljes munkatér kihasználható, és nincs szükség támaszszerkezetekre sem. A fel nem használt por ugyanis kitölti a tárgyak közötti teret, ezzel pedig egyúttal elvégzi az alátámasztást is. Ez a technológia alkalmas tartós alkatrészek gyártására.
5. A Polyjet nyomtatók folyékony fotopolimer cseppeket kötnek össze egy UV- (ultraviola) fényforrás segítségével. A Polyjet nyomtatási technológia jelentős előnye, hogy akár nagyméretű részletes prototípus-alkatrészek is gyárthatók kiváló felületi minőséggel, mérettartással és színkeveréssel, azaz többféle anyag akár egyszerre nyomtatható ugyanabban az elemben.
6. A Binder Jetting eljárásban az egyes rétegekben finomszemcsés poros alapanyagra kötőanyagot permeteznek, aminek megszilárdulása révén kialakul a tervezett forma. Ez az eljárás lehetővé teszi több szín és alapanyag használatát egyetlen nyomtatás során.
7. A DLP- (Digital Light Processing) nyomtatók fotopolimer alapanyagot használnak fel a tárgyak felépítésére, amelynek során egyszerre egész rétegeket keményítenek meg egy fényforrás és digitális tükör felhasználásával. Nagy felbontású egyedi modellek, alkatrészek és öntőminták gyártására alkalmas például a fogtechnikában vagy az ékszeriparban.
8. Az EBM (Electron Beam Melting) 3D-nyomatók fémpor alapanyagot olvasztanak fel egy elektronnaláb segítségével, így építik fel a tárgyat rétegről rétegre. Ez a technológia elsősorban fém alkatrészek gyártására használható.
9. A DMLS- (Direct Metal Laser Sintering) technológia alapján működő 3D-nyomatók az SLS-nyomatókhoz hasonlóak, azzal a különbséggel, hogy ezek fém alapanyagot használnak fel az alkatrészek előállításához. Ezzel a módszerrel nagy szilárdságú, komplex fém alkatrészeket is lehet készíteni.
10. A CJP- (Color Jet Printing) technológia olyan additív gyártási eljárás, amely egyaránt alkalmas többszínű (multicolor) ajándékok, koncepcionális modellek vagy építészeti tervek kicsinyített megvalósítására. A nyomtatás kompozit por alapanyag felhasználásával történik, akár festék hozzáadásával, amit rétegenként ragasztó köt össze. A rétegek vastagsága körülbelül 0,1 mm.

¹⁸ MARKOVITS–VARGA 2023.

¹⁹ VÉGVÁRI 2023.

Az ismertetett 3D-nyomatási technológiák különböző lehetőségekkel és korlátokkal, előnyökkel és hátrányokkal egyaránt rendelkeznek, amelyek miatt elsősorban a végtermékkel szemben elvárt tulajdonságok függvényében kell kiválasztani a legmegfelelőbbet. Az optimális típus kiválasztása nagymértékben függ továbbá az alkalmazási körülményektől, az alapanyagtól és a költségvetéstől is.

A bemutatott technológiák mellett egyébként még számos más, speciális 3D-nyomatási módszer (például betonnyomatás, élelmiszer-nyomatás, kerámianyomatás, szervnyomatás stb.) is létezik, amelyek azonban nem relevánsak a kutatott téma vonatkozásában, ezért ezeket nem ismertetjük részletesebben.

A 3D-nyomatás során felhasznált alapanyagok bemutatása

A 3D-nyomatás során számos különböző alapanyagot használnak, amelyek közül a végtermékkel szemben megfogalmazott követelmények, a fajlagos költségek, valamint az alkalmazott nyomtató típusa alapján kell kiválasztani a legmegfelelőbbet. Az alapanyagok sajátos tulajdonságai ugyanis alapvetően befolyásolják a kinyomatott tárgy fizikai tulajdonságait, mint például a szilárdság, tartósság, kopásállóság, hőállóság stb. Ezek az úgynevezett filamentek az elkészült tárgyak minősége mellett alapvetően befolyásolják a nyomtatási folyamatot is. Tekintettel arra, hogy a 3D-nyomatási technológiával elkészített termékek minősége és különböző tulajdonságai nagyban függenek a nyomtatáshoz használt nyomtató alapanyagok, a filamentek jellemző tulajdonságaitól, ezért a kutatásunk szempontjából relevánsabb tulajdonságokat az alábbiakban soroljuk fel:

- anyagösszetétel;
- nyomtathatóság;
- nyomtatási hőmérséklet;
- szilárdság;
- keménység, kopásállóság;
- ütésállóság;
- hőállóság, UV-állóság;
- kémiai hatásokkal szembeni ellenállás, vegyszerállóság;
- nedvességfelvétel;
- vetemedés, zsugorodás;
- rétegtapadás;
- elektromos vezetőképesség.

A gyártók által megadott alapanyag-tulajdonságok összevetése a nyomtatási feladat követelményeivel segít a megfelelő anyag kiválasztásában. A nyomtatáshoz használt alapanyagok közül az optimális kiválasztás a gyakorlatban az alapján történik, hogy melyik anyag biztosítja legjobban a végtermékkel szemben elvárt tulajdonságokat, mi a termék tervezett felhasználása, milyen nyomtatási technológia áll rendelkezésre, valamint milyen anyagi lehetőségek

állnak rendelkezésre a gyártás feltételeinek biztosításához. A sikeres minőségi nyomtatás érdekében továbbá elengedhetetlen a nyomtató egyedi beállítása, amit az alapanyagok gyártó által megadott, a fenti felsorolásban olvasható tulajdonságai, valamint ajánlott nyomtatási beállításai alapján szükséges elvégezni.

Az elmúlt években a 3D-nyomtatási technológiák fejlődésének és bővülésének köszönhetően napjainkra az alapanyagoknak is széles választéka áll rendelkezésre annak érdekében, hogy minél komplexebb geometriájú tárgyakat lehessen elkészíteni. A következő felsorolás tartalmazza azokat az általános alapanyagtípusokat, amelyeket napjainkban 3D-nyomtatásra használnak, és számunkra relevánsak a kéziszerszámgyártásban:

1. Műanyagok

- ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene): erős, kopásálló és strapabíró műanyag, gyakran használják alkatrészek nyomtatására. Kényes a nyomtatási terület állandó hőmérsékletére, és a nyomtatási folyamat során erős szag képződik.
- Nylon: erős, kopásálló és könnyű műanyag, ami miatt többféle alkalmazásban jól használható. Kiváló mechanikai tulajdonságokkal és vegyszerállósággal rendelkezik.
- ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate): széles körben használható hőre lágyuló műanyag jó UV-állósággal, valamint kedvező mechanikai és esztétikai tulajdonságokkal. Alkalmas a legtöbb általános célú 3D-nyomtatási feladathoz, beleértve a prototípusok készítését, valamint a kis darabszámú gyártási alkatrészeket is. Sok színben elérhető alapanyag.
- DIRAN: tartós és szívós, nylon alapú hőre lágyuló műanyag.
- PLA (Polylactic Acid): könnyen, akár alacsonyabb hőmérsékleten is jól nyomtatható merev és erős műanyag, ami kevésbé hajlamos a torzulásra. Jó UV-állósággal és rétegtapadással, ugyanakkor alacsony nedvességállósággal rendelkezik.
- PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified): erős, tartós, kopásálló és hőálló anyag, jó mechanikai tulajdonságokkal. A nedvességgel és különböző vegyszerekkel szembeni ellenállása nagy.
- TPU (Thermoplastic Polyurethane): rugalmas műanyag jó ütésállósággal és kopásállósággal.
- PC (polikarbonát): az egyik legerősebb anyag az FDM-nyomtatáshoz. Jó alternatívája az ABS-nek, mivel a tulajdonságai hasonlóak. UV-érzékeny. Magas szakító- és hajlítószilárdsággal rendelkezik, ami miatt ideális választás prototípusok, szerzőszámok és szerelési készülékek készítéséhez.
- HIPS (High-Impact Polystyrene): nagy tartósságú és ütésálló polisztirol. Mechanikai tulajdonságai hasonlóak az ABS-hez. Nem vetemedik, mérsékeltен rideg és kis sűrűségű, ezáltal könnyű anyag.

2. Fémek

- bronzötvezetek;
- rézötvezetek;
- egyéb fémek (rozsdamentes és szerszámacélok, alumínium, titán, nemesfémek stb.).

3. Kompozitok

- műanyag és fémpor keverékek;
- műanyag és más, nemfém porok keveréke (például farost, gipsz, kőpor stb.);
- műanyag és mikroszálak (például mikroméretű szénszálak).

A fenti felsorolásban említett műanyagba ugyanakkor különböző erősítő szálak is adagolhatók annak érdekében, hogy azok kedvezően befolyásolják, javítsák a végtermék anyagjellemzőit, például növeljék az alkatrészek szilárdságát, szívósságát és egyéb mechanikai tulajdonságait.²⁰ Ezek a folyamatos erősítőszál-típusok:

- szénszál (például szilárdság és merevség növelése);
- kevlar (például szívósság és kopásállóság növelése);
- üvegszál, hőálló üvegszál (például szilárdság, szívósság és hőállóság növelése).

Ezek azok a nyomtató alapanyagok, amelyek felhasználásával a kutatási céljainkat várhatóan sikerül elérni, ezért a továbbiakban ezekkel végezzük el a vizsgálatokat.

A szikramentes kéziszerszámok gyártására alkalmas 3D-nyomtatók és alapanyagok

A szerszámtervezési folyamat utolsó fontos elemeként a különböző nyomtatókkal és alapanyagokkal készített szerszámokat vizsgáljuk meg elsősorban az alapján, hogy azok mindenben megfelelnek-e az előírt jogszabályi és elvárt minőségi követelményeknek. Az elvárásoknak mindenben megfelelő szerszámokat ezt követően összehasonlítjuk egymással a költségek, a minőség és a gyárthatóság alapján.

Tekintettel arra, hogy a kéziszerszámok tulajdonságát döntően a felhasznált nyomtató alapanyagok tulajdonságai határozzák meg, ezért a kutatási célok eléréséhez elsősorban a megfelelő alapanyagot kell kiválasztani, amihez az alábbi szempontokat szükséges figyelembe venni.

Szempontok az alapanyag kiválasztásakor:

- alkalmazás;
- mechanikai tulajdonságok;
- felhasználói tapasztalat;
- hőmérsékleti igények;
- szín és megjelenés;
- környezeti tényezők;
- költség.

A megfelelő alapanyagok kiválasztása után az alapanyagok nyomtatására alkalmas nyomtatók kiválasztása a következő lépés, amihez az alábbi szempontokat célszerű figyelembe venni.

²⁰ ZENTAY–HEGEDŰS–VÉGVÁRI 2023a.

Szemponatok a 3D-nyomtató kiválasztásakor:

- alkalmazás;
- nyomtatási technológia;
- nyomtató mérete;
- nyomtatási sebesség;
- pontosság és felbontás;
- anyagkompatibilitás;
- felhasználói tapasztalat;
- karbantartási igény;
- költség;
- környezeti tényezők;
- gyártási kapacitás.

Kutatásunk fontos részeredményeként arra a következtetésre jutottunk, hogy a szikramentes kéziszerszámok 3D-nyomtathatóságával szemben megfogalmazott releváns követelményeket és elvárásokat elsősorban az FDM-technológia alapján működő nyomtatók, valamint a különféle fémnyomtatók teljesíthetik. Az ezekkel a nyomtatókkal készített szerszámokat a kutatási folyamat következő elemeként részletes anyagvizsgálatoknak vetjük alá, majd azt követően a szükséges módosításokat és fejlesztéseket is elvégezzük.

A 3D-nyomtatáshoz használható alapanyagok közül várakozásaink alapján a szénszállakkal erősített poliamid, PLA-, ABS- vagy PETG-filamentek felhasználásával érhetjük el leginkább a kívánt eredményt. A fémporok közül a bronz- és rézötvetetek alkalmazása jó megoldásnak bizonyulhat, azonban felhasználásuk további kutatást és vizsgálatot igényel, mivel pontos összetételükről a cikk lezárásakor nem rendelkezünk elegendő információval.

Összefoglalás

A 3D-nyomtatás mára a mindennapok részévé vált, mivel az olcsóbb nyomtatók sokak számára elérhetőek, a legmodernebb nyomtatókkal pedig az ipari szereplők jelentősen tudják csökkenteni a termékeik fejlesztésére fordított időt, energiát és pénzt.

Minden olyan munkahelyen, ahol a robbanásveszély reális kockázatot jelenthet, fontos a megfelelő szikramentes biztonsági kéziszerszámok alkalmazása a munkavégzés során, amit a jogszabályi kötelezettség, a munkavállalók és a környezet biztonsága egyaránt megkövetel. A piacon jelenleg megvásárolható kéziszerszámok ugyanakkor drágán, csak az átlagos használatra szánthoz képest többszörös áron beszerezhetőek.

A 3D-nyomtatási technológiában rejlik, még kiaknázatlan lehetőségek, továbbá a kereskedelem jelenleg beszerezhető szikramentes szerszámok magas ára motiválták kutatásunkat ezen a területen. Az additív gyártástechnológiában végzett kutatásunk során jutottunk arra a következtetésre, hogy 3D-nyomtatók alkalmazásával jelentősen olcsóbban tudunk jó néhány szikramentes biztonsági kéziszerszámot előállítani anélkül, hogy az a biztonság és a használhatóság rovására menne.

Az alapanyagok közül a kutatásunkban kiemelten kezelt filamentek, valamint fém- és műanyagporok alkalmasak lehetnek a kéziszerszámok gyártására, ahol a szikramentes használat biztosítása mellett kiemelkedő mechanikai tulajdonságok, például szilárdság és tartósság szükségesek. Az alapanyagok sokfélesége, egyre könnyeb hozzáférhetősége biztosítja azokat a további előnyöket, amivel egyre versenyképesebbé válik a 3D-nyomatás a hagyományos gyártási eljárásokhoz képest. A 3D-nyomatási technológiák folyamatos fejlesztése pedig nemcsak új alkalmazási területeket nyithat meg a felhasználók előtt, hanem további előnyöket is jelenthet, amihez az alapanyagok fejlesztése és választékbővítése is szükséges. Az additív gyártástechnológia, ennek részeként a 3D-nyomatási folyamatot megelőző szerszámtervezés lehetővé teszi például, hogy a szerszámot használó személy adottságainak legjobban megfelelő, egyedi kialakítású szerszámokat tudjunk gyártani. Az ergonómia érvényesítése megjelenik az adott tárgy kialakításában, méreteiben, alakjában és a súlyában. Személyre (azaz egyedi méretre) szabhatjuk például a szerszámok fogantyúinak méretét vagy a biztosító- és kezelőelemek elhelyezését is.

Kutatásunknak, azaz a szikramentes kéziszerszámok gyártási folyamatának és megfelelősége igazolásának a következő fontos eleme annak bizonyítása, hogy a 3D-nyomtatással készített szerszám teljesíti a szikramentes szerszámokkal szemben megfogalmazott biztonsági követelményeket.

Felhasznált irodalom

- GYARMATI József – HEGEDŰS Ernő – GÁVAY György (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó: Harckocsi-sebességváltó modell kialakítása 3D nyomtatással oktatási célból. *Műszaki Katonai Közlöny*, 32(3), 113–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.7>
- KARA, Yahya et al. (2023): A Novel Method and Printhead for 3D Printing Combined Nano-/Microfiber Solid Structures. *Additive Manufacturing*, 61 Paper: 103315. Online: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103315>
- MARKOVITS Tamás – VARGA László Ferenc (2023): Investigating the Surface Roughness of 3D Printed Metal Parts in Case of Thin 20 µm Build Layer Thickness. *Journal of Materials Research*. Online: <https://doi.org/10.1557/s43578-023-01254-9>
- VÉGVÁRI Zsolt (2023): A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában. *Katonai Logisztika*, 33(1–2), 177–198. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-1-2-177>
- VÉGVÁRI Zsolt – HEGEDŰS Ernő – ZENTAY Péter (2023): 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>
- ZENTAY Péter – HEGEDŰS Ernő – VÉGVÁRI Zsolt (2023a): A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei II. rész: 3D-s nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságai minőségjavításának lehetőségei. *Haditechnika*, 57(1), 49–55. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.57.1.09>
- ZENTAY Péter – HEGEDŰS Ernő – VÉGVÁRI Zsolt (2023b): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei III. rész: A gyártási hibák hatásának mérséklése, hibaküszöbölési megoldások. *Haditechnika*, 57(2), 57–62. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.57.2.11>

Jogi források

- 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben történő alkalmazásra szánt berendezések és védelmi rendszerek vizsgálatáról és tanúsításáról
- 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról
- 142/1999. (IX. 8.) Korm. rendelet a tűzszerészeti mentesítési feladatok ellátásáról
- Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999 on Minimum Requirements for Improving the Safety and Health Protection of Workers Potentially at Risk From Explosive Atmospheres