

36. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Budapest, 2023. április 18-20.
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Rendészettudományi Kar

A fém 3D nyomtatás védelmi célú felhasználása

Jelige: *innováció*

Pályamunka lezárásának időpontja: 2022. június

2023.

Kivonat

A fém 3D nyomtatás védelmi célú felhasználása

Témaválasztásomat az indokolja, hogy előzetes tanulmányaimat katonai logisztika alapszakon, haditechnika specializáción végeztem. Jelenleg a Magyar Honvédség Modernizációs Intézetben teljesítek szolgálatot hivatásos tisztként. A BSc képzés óta figyelemmel követem az additív gyártástechnológiák gyorsütemű fejlődését, és mára már a munkám részét képezi annak a vizsgálata, hogy ezen eljárásokat hogyan lehet védelmi célú eszközgyártás szolgálatába állítani.

Dolgozatomban áttekintettem a jelenleg rendelkezésre álló fém 3D nyomtatási technológiákat. A megismert technológiák közül a vékony porréteget terítő lézer segítségével megvilágított (PBF – Powder Bed Fusion) eljárást találtam a legalkalmasabbnak védelmi célú gyártásra. Majd kitekintést adtam a fém 3D nyomtatás eddigi védelmi célú alkalmazásaira.

Kutatásom legfontosabb kérdése, hogy a PBF eljárással milyen minőségben lehet alkatrészeket gyártani, és ezek alkalmasak-e közvetlen hadiipari felhasználásra. Ennek megállapítására alapeometriákat nyomtattam, majd mértem a nyomtatott darabok méretpontosságát. Az alapmérések alapján egy kiválasztott fegyveralkatrészt átterveztem 3D nyomtatásra, majd legyártottam és mértem a geometriai pontosságát. Az elkészült mintadarabok és mérések alapján megállapítottam, hogy a fém 3D nyomtatás közvetlenül alkalmas egyszerűbb alkatrészek direkt gyártására. Szigorú tűréssel rendelkező alkatrészek kritikus felületei utómunkát igényelnek. A dolgozatomban bemutatott eredmények alapján elkészítettem egy missziós területre szállítható alkatrészutánpótló-konténer koncepcióját.

Abstract

Defence application of Metal 3D printing

My choice of the main topic is justified by the fact that I have a bachelor's degree in Military Logistic, in the specialization of Maintenance. I am currently serving as a professional officer at the Hungarian Defence Forces Modernization Institute. I have been following the rapid development of additive manufacturing since my BSc studies and by now it is part of my job to investigate how these processes can be used in defence manufacturing.

In my dissertation I reviewed the currently available metal 3D printing technologies. Among the known technologies I found the Powder Bed Fusion (PBF) method to be the most suitable for defence products. After that I gave an overview of defence applications of the metal 3D printing till now.

The most important question of my research is the quality of the components that can be produced with the PBF process and whether they are suitable for direct profile use. To determine this, I printed basic geometries and then measured the dimensional accuracy of the printed part. Based on the basic measurement I redesigned a weapon part for 3D printing and then fabricated and measured its geometric accuracy. Based on the completed samples and measurements, I have found that the metal 3D printing is directly suitable for direct production of more simple parts. Critical surfaces of parts with higher tolerances required rework. Based on the results obtained during my study, I prepared the concept of a maintenance container to be delivered to a mission area.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	1
2.	Irodalomkutatás	3
2.1.	Additív gyártástechnológia általános bemutatása	3
2.2.	Fém 3D nyomtatási technológiák bemutatása.....	5
2.2.1.	Powder Bed Fusion (PBF)	5
2.2.2.	Binder Jetting technológia	7
2.2.3.	Nanoparticle Jetting technológia.....	8
2.3.	Példák fém 3D nyomtatás védelmi célú alkalmazására	9
2.3.1.	3D nyomtatott páncéltest	9
2.3.2.	Elavult alkatrészek igény szerinti 3D nyomtatása	10
2.3.3.	Tanúsítvánnyal rendelkező 3D nyomtatott repülőgépalkatrészek	10
2.3.4.	Tengeralattjáró javítás a nyílt tengeren.....	12
2.3.5.	Egyedi eszközök	12
2.3.6.	3D nyomtatott hajócsavar	13
3.	Additív gyártástechnológia védelmi célú alkalmazhatóságának vizsgálata	14
3.1.	Az alkalmazott gépek és szoftverek bemutatása	14
3.2.	3D nyomtatásra tervezett alapeometriák létrehozása	15
3.3.	3D nyomtatásra kiválasztott védelmi célú alkatrész létrehozása	19
3.3.1.	Kiválasztott alkatrész bemutatása	19
3.3.2.	Kiválasztott alkatrész áttervezése fém 3D nyomtatásra.....	19
4.	Összefoglalás	23
4.1.	Következtetések	23
4.2.	További kutatási irányok kijelölése.....	25
5.	Irodalomjegyzék	26
6.	Ábrajegyzék.....	29
7.	Rövidítésjegyzék	30

1. Bevezetés

A Nemzeti Közszerológati Egyetemen 2018-ban BSc szintű Katonai Logisztikai Vezetői végzettséget szereztem haditechnika specializáción. A Magyar Honvédség Modernizációs Intézetnél való szolgálatteljesítés során a munkám fontos részét képezi a feltörekvő technológiák figyelemmel követése. Eddigi felsőfokú tanulmányaim során végzett kutatási tevékenységem és a munkaköröm által behatárolt irányok egyértelműen kirajzolták előttem az utat, miszerint az additív gyártás védelmi célú alkalmazásának vizsgálatára fordítom szakmai figyelmemet. Felsőfokú tanulmányaim tervezése is ezen irányok alapján történik. A dolgozatom megszületését is az a cél vezérelte, hogy a tanulmányaim során szerzett tudásomat és tapasztalataimat a védelmi célú fejlesztések szolgálatába állítsam, ezzel is elősegítve a védelmi ipar fejlődését. A védelmi ipar fejlődése mellett továbbá fontos megemlíteni, hogy a védelmi célú fejlesztések könnyen kettős felhasználású – védelmi és civil – eredményekkel járhatnak, mely által számos más iparág számára teremthetnek hozzáadott értéket későbbi pályám során.

Az elmúlt évtizedekben a 3D nyomtatási technológiák rohamos fejlődésnek indultak. Számos fém alapanyagot felhasználó additív gyártástechnológia került kifejlesztésre, aminek következtében az iparágakban hagyományos gyártástechnológia mellett kezd teret hódítani a 3D nyomtatás. A technológiák ismeretének terjedése megreformálja a termékek tervezését és gyártását. A dolgozatom első részében rövid áttekintést nyújtok az additív gyártástechnológiák kialakulásáról, működési elvéről. Bemutatom a ma fellelhető legszélesebb körben ismert fém 3D nyomtatási technológiák közül a porágyas technológiákat, a Binder Jetting eljárást és a nanorészecskés eljárást. Ezt követően a témaválasztás helytállóságát és időszerűségét alátámasztva példákat hozok a világ vezető hadseregeitől a fém 3D nyomtatás védelmi célú felhasználására. A világon számos példa létezik már a fém 3D nyomtatás védelmi célú való felhasználására, nem csak kutatás-fejlesztési projektek folytatására. A dolgozat második felében bemutatom a kutatás során végrehajtott feladatokat, a gyártáshoz és a vizsgálatok elvégzéséhez használt berendezéseket, szoftvereket. Ismertetem, hogy milyen alapeometriák kerültek megtervezésre és gyártásra, a 3D nyomtatással létrehozandó védelmi felhasználású alkatrész kiválasztása előtt. Még a kiválasztott alkatrész bemutatása előtt geometriák gyárthatóságára vonatkozó következtetések vonok le az alapeometriákon végzett vizsgálatok alapján. Ezt követően ismertetem a gyártandó alkatrész eredeti funkcióit, az áttekintés előtt kitűzött irányelveket. Bemutatom a tervezett 3D modellt, és a már legyártott terméket az eredeti, hagyományos eljárással gyártott termékkel összehasonlítva. A nyomtatott alkatrész GOM

optikai szkennelvel létrehozott modelljét összehasonlítom a számítógépen tervezett 3D modellel. A dolgozat további részében védelmi célú alkalmazási területekre irányuló következtetéseket vonok le és javaslatot teszek egy 3D nyomtatóval felszerelt logisztikai javító konténer kialakítására. Végül meghatározom a további kutatásaim során vizsgálni kívánt irányokat, amiket eddigi tanulmányaim és munkám során szerzett ismereteim és tapasztalataim alapján indokoltnak látok.

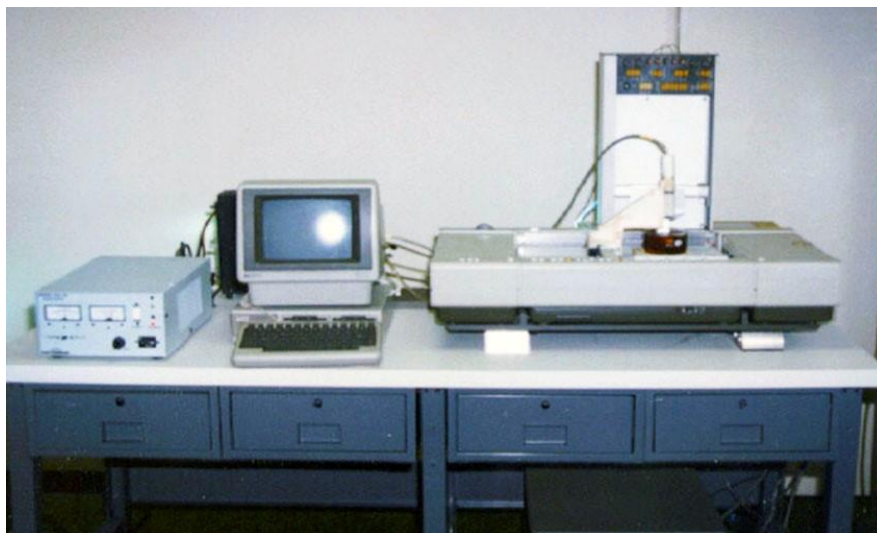
2. Irodalomkutatás

A fejezetben sor kerül az additív gyártástechnológiák általános bemutatására, a piacon jelenleg elérhető 3D nyomtatási technológiák ismert előnyeinek és korlátainak áttekintésére. Példákat hozok az additív gyártástechnológiák védelmi célú alkalmazására.

2.1. Additív gyártástechnológia általános bemutatása

Gyors prototípusgyártás (Rapid Prototyping – RP) elvét alkalmazó berendezések az 1980-as években jelentek meg. Ahogy az additív gyártást lehetővé tevő eljárások összefoglaló neve is sejteti, hogy kezdetben az ilyen elven működő gépeket modellek és prototípusok gyártására használták, azonban a technológia fejlődése által mára lehetségessé vált beépítésre alkalmas alkatrészek gyártása is.[1.]

1980-ban dr. Hideo Kodama kidolgozott egy sikeresen alkalmazható eljárását, azonban finanszírozási okok miatt nem tudta szabadalmaztatni. Charles Hull 1986-ban szabadalmat nyújtott be a sztereolitográfias eljárásra és bejegyeztette a 3D System nevű céget. Az eljárás során a munkasztal egy kádban helyezkedik el, ami fényre keményedő folyékony anyaggal van töltve. Az alapanyag azokon a helyeken keményedik meg, ahol UV fénnel megvilágításra kerül. 1987-ben a 3D Systems bemutatta az első gyors prototípusgyártó berendezést, ami az SLA-1 nevet viselte. (1. ábra) [2.][3.]



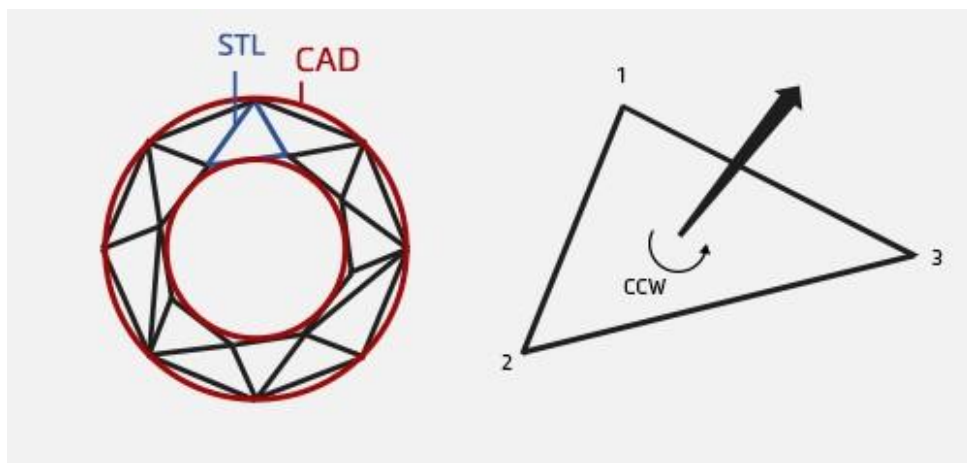
1. ábra: SLA-1, az első gyors prototípusgyártó berendezés[3.]

1980-as éveket követően sem állt meg a technológia fejlődése, az ipari felhasználás lehetőségét célozták meg. Azóta számos eljárást fejlesztettek ki, amivel polimereken kívül lehetőség van számos egyéb alapanyag felhasználására. Az additív gyártástechnológia alkalmazása mára előfordul az orvostechikában, a repülőgépiparban, az autóiparban.[1.]

Az additív gyártás lényege, hogy a forgácsolással ellentétben, nincs szükség előgyártott testre, mivel nem lebontó folyamatokat alkalmazva hozza létre a terméket, hanem rétegről-rétegre építi fel azt. Előgyártmány hiányában, nem keletkezik annyi hulladék és ez által a gyártási folyamat anyagtakarékos.[4.]

Az additív gyártás során keletkező termék gyártási folyamata digitális 3D modell létrehozásával kezdődik. Az új modell létrehozható számítógépes tervezőprogrammal vagy a már meglévő termékről létrehozható 3D szkenneléssel. A CAD szoftverek lehetővé teszik a 3D modell alapján ".stl" kiterjesztésben a geometriáról információk továbbítását a 3D nyomtatók irányába. A piacon lévő 3D nyomtatók megkülönböztethetők a felhasznált alapanyag, valamint az alkalmazott technológiák alapján.[4.]

Az előző bekezdésben említett ".stl" kiterjesztés a sztenderd háromszögelési nyelvhez tartozik, aminek a lényege, hogy a modell geometriája a felszínét felépítő háromszögek segítségével van leírva. A ".stl" fájlformátum esetében a háromszögek oldalai érintik egymást, a háromszögek nem metszik egymást és hézagok sem keletkeznek köztük. A fájl a háromszögekhez eltárolja a csúcspontok koordinátáját, valamint a felületükből kifelé mutató normálvektorokat. A 2. ábra az STL modell és a CAD modell viszonyát mutatja be.[5.][6.]



2. ábra: STL fájl viszonya a CAD modellel[5.]

A 2. ábra bal oldali rajzán látható, hogy az STL modell esetében torzul az ívelt geometria, ezért megfelelő finomságú hálót kell létrehozni annak érdekében, hogy ne torzuljon a termék felszíne, és ne keletkezzen rajta síkfelület.[6.]

2.2. Fém 3D nyomtatási technológiák bemutatása

A dolgozat keretei között bemutatásra kerülnek a jelenleg elérhető fém 3D nyomtatási technológiák, kitérve azok és az általuk előállított termékek alkalmazhatóságára, a jelenleg ismert előnyökre, hátrányokra és korlátokra.

2.2.1. Powder Bed Fusion (PBF)

A porágyas technológia gyűjtőfogalom, azokat az additív gyártástechnológiákat foglalja magába, amelyek esetében lézer- vagy elektronsugár pásztázza végig a termék adott rétegbe eső keresztmetszetét. A termék egy fémporral töltött mozgó építési platformmal rendelkező kádban jön létre.[6.]

2.2.1.1. DMLS/SLM technológia

Irodalomkutatás során arra a következtetésre jutottam, hogy a Selective Laser Melting (SLM) és a Direct Metal Laser Sintering (DLMS) technológiák közel azonos műszaki tartalommal rendelkeznek, csak különböző gyártók kínálják őket.[6.][7.][8.]

Az DMLS/SLM technológiák lézersugárral pásztázó eljárások. A lézersugárral való olvasztás az egyik legelterjedtebb fém 3D nyomtatási technológia, alkalmas prototípusgyártásra és kisserős gyártásra is. Az alkalmazható fémötvözetek széleskörűek.[7.]

Az eljárás során a porszemcsék molekuláris szinten összeolvadnak ez által létrehozva egy homogén terméket. A porágy csak kismértékben támasztja alá a terméket, ezért az eljárás alkalmazása során szükség van támasztószerkezetek hozzáadására például a deformációk elkerülése érdekében.[7.]

Az eljárások a 3D nyomtatáshoz szükséges alap eljárási folyamatokat követik: modellkészítés, szeletelés, és a rétegről-rétegre való felépítés.[8.]

A termékgyártás első lépéseként a portertítő mechanizmus egy réteg finom fémport terít el a munkafelületen. Ezt követően a rétegbe eső keresztmetszetet a lézersugár pásztázza és megolvasztja, majd a munkaasztal egy rétegvastagságnyi süllyed. A leírt három folyamat ismétlődése a termék létrehozataláig folytatódik. Az alapanyag csak azokon a helyeken olvad össze, ahol lézersugár által levilágításra került, a fel nem használt fémpor pedig újrahasznosítható.[7.][8.]

A teljes folyamat a berendezés belsejében megy végbe, ellenőrzött körülmények között. A terméket az építés után el kell távolítani az építési felületről. A támasztószerkezet anyaga

megegyezik az alkatrész anyagával, ezért az eltávolítása nehéz és időigényes folyamat lehet. Az elkészült termék felülete durva, ezért igénytől függően szükség lehet utókezelésre.[7.]

Az eljárások előnye, hogy a fémek széles választéka elérhető alapanyagként, összetett geometriák és belső szerkezetek állíthatók elő velük, valamint lehetőség van egyidejűleg több alkatrész gyártására. Az technológia jelenleg csak durva felszínnel rendelkező kisméretű termékek létrehozására alkalmas. A termékek előállítása drága, különösen, ha nincs 3D nyomtatással való gyártásra optimalizálva.[7.][8.]

Az eljárás jelenleg még nem széleskörben elterjedt, aminek főleg a magas beruházási- és előállítási költség az oka. Azonban vannak iparágak, ahol használatban van már. Az egészségügyi iparban a páciensek igényeire szabott implantátumok, az autóiparban prototípusok, egyedi alkatrészek, vagy speciális kisméretű nagyértékű alkatrészek gyártására. A szerszámgyártásban geometriakövető hűtőcsatornákkal ellátott szerszámbetétek, valamint könnyített forgácsoló szerszámok gyártására használják.[7.][8.]

2.2.1.2. EBM technológia

Az Electron Beam Melting (EBM) eljárás elektronsugaras olvasztás, szintén a PBF technológiák közé tartozik. A lézersugár helyett a por megolvasztásához az EBM technológiák fókuszált elektronsugarat használnak jellemzően vákuum környezetben.[9.][10.]

A 3D nyomtatási folyamat megkezdése előtt először a berendezés volfrámszálat melegít 3000°C fölé, ami az elektronkibocsátást okozza. Ezt követően az anód és a katód közötti potenciálkülönbség hatására az elektronok felgyorsulnak. Az elektronokat mágneses tekercsek segítségével keskeny, nagy energiájú sugárnyalábba fókuszálják, amely ütközik a fémpor felszínével. Amikor megtörténik az ütközés, a súrlódás révén átadott mozgási energia létrehozza a fémpor megolvasztásához szükséges hőt.[9.]

Az eljárás során alkalmazott építési folyamatok megegyeznek a DMLS/SLM technológiák során alkalmazott folyamatokkal. Lényeges különbség, hogy EBM esetében a porágyat akár 600-700°C-ra is felmelegítik, ezzel a nyomtatási felső és alsó rétegek közti hőmérséklet különbség sokkal kisebb, mint DMLS/SLM eljárások esetében, ami kisebb belső feszültségeket eredményez.[10.]

Amikor a termék teljesen elkészült, a porágy kiemelésre kerül a berendezésből és a fel nem használt fémpor eltávolításra kerül. Az elkészült alkatrész a felhasználási igény függvényében alkalmazásra kész vagy további utómunkálatok végrehajtását követően lesz beépíthető.[10.]

Az eljárás előnye a többi PBF eljáráshoz hasonlóan, hogy a fémpor olvasztása miatt a termékek nagy sűrűséggel és szilárdsággal rendelkeznek, valamint, hogy a nem megolvasztott fémpor újrahasznosítható. Az eljárás hátrányai közé tartozik a rendelkezésre álló építési terület kis mérete, valamint a korlátozott alapanyagválaszték (Ti, CoCr), valamint a gyártási időt lényegesen növeli az építési munkát befejezése után a porágy szobahőmérsékletre való visszahűlési ideje.[10.]

Az eljárás ugyanakkor alkalmas komplex szerkezetek kisméretű alkatrészeinek gyártására. Az EBM eljárást már használják az orvostudományban, a repülőgépiparban és a motorsportok területén is. Az egyik legkiemelkedőbb alkalmazása az orvostudományhoz köthető. A lézersugaras PBF eljárásokhoz hasonlóan ezzel eljárással is lehetőség van személyre szabott koponyaimplantátum legyártására.[10.]

2.2.2. Binder Jetting technológia

A Binder Jetting (BJ) eljárás folyékony kötőanyagot használ a porágyban lévő fém porszemcsék összekötéséhez, ezzel létrehozva a termék rétegeit. Az építési folyamat során a nyomtatási rétegek összekapcsolódnak, és létrehozzák a kívánt geometriájú terméket. Műanyag alkatrészek esetében a termék porágyból való eltávolításával lezárul az előállítás, azonban fém alkatrész esetében utókezelési folyamatok végrehajtására van szükség.[11.][12.]

Mind a fém-, a polimer-, a homok és egyéb por alapanyagok esetében a BJ eljárás azonosan zajlik. A PBF eljárásokhoz hasonlóan ebben az esetben is a munkafelületen való fémpor elterítése az első lépés. Azután a nyomtatófej áthalad a porágy felett és a kívánt helyre kötőanyagcseppeket helyez. A kötőanyag lehelyezése után a munkaasztal egy rétegvastagságnyi süllyed. Ezen eljárás esetében a leírt három lépés ismétlődik addig, amíg létre nem jön a kívánt termék, ami a folyamat során hozzáadott festékkel színezhető.[11.][12.]

A nyomtatást követően a termék eltávolítható a porágyból, a fel nem használt por újra hasznosítható. Innentől, a felhasznált alapanyagtól függően, utókezelési eljárások lehetnek szükségesek.[11.][12.]

A BJ alkatrészek esetében szükség van másodlagos folyamatokra a nyomtatást követően annak érdekében, hogy a termék elnyerje a megfelelő tulajdonságokat, mivel a nyomtatott termék gyenge mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik és magas a porozitása. A 3D nyomtatóból kivéve a termék alapvetően polimerragasztóval összekötött fémrészecskékből áll.[11.][12.]

A terméket hűtés és a porágyból való eltávolítás után, kemencébe kell helyezni, ahol a ragasztó kiég a termékből, a fémrészecskék megolvadnak és összehegednek. A kemence hőfokától és a szinterezési időtől függően a termékek porozitási tényezői szabályozhatók lehetnek.[11.][12.]

A BJ-eljárással is lehetőség van üreges belső geometria nyomtatására, ezáltal tömegcsökkentésre.[11.][12.]

Az erősen porózus alkatrészek könnyűszerkezeti gyártáshoz vagy orvosi implantátumokhoz javasoltak, ahol a porozitás bizonyítottan elősegíti a csontképződést. Összességében a BJ-alkatrészek anyagtulajdonságai egyenértékűek a fémfröccsöntéssel előállított alkatrészekével.[11.][12.]

A BJ-eljárásnak számos előnye van a hagyományos fémfröccsöntéshez és más 3D nyomtatási technológiákhoz képest. A technológia előnye főleg a gyorsaságában és a felszíni pontosságában rejlik, mivel a nyomatófejek gyorsabban dolgoznak, mint a lézerek vagy az elektronsugarak. Az eljárást alkalmazó gépek szobahőmérsékleten és légköri nyomáson működnek. Az eljárással lehetőség van a nyomtatási tér teljes kihasználására, mivel a nyomtatott termékeknek nem szükséges a munkasztalhoz kapcsolódniuk. Az eljárás hátránya a PBF technológiákhoz képest, hogy a nyomtatás folyamán nem jön létre a fém porszemcsék összehegedése, hanem szükség van keményítésre, sűrítésre.[11.][12.]

2.2.3. Nanoparticle Jetting technológia

A Nanoparticle Jetting (NPJ) eljárás szabadalmaztatott nanorészecskés additív gyártásifolyamat. Az eljárással lehetőség van két különböző anyag – alapanyag és támaszanyag – egyidejű nyomtatására. Az NPJ eljárás előnyei közé tartozik a gyártott termék magas felszíni minősége, valamint az általa biztosított nagy tervezési szabadság. Az NPJ-eljárással nagyon vékony rétegekből magas sűrűségű, jó felszíni minőségű és alacsony zsugorodású termékeket lehet létrehozni.[13.][14.][15.]

Az NPJ technológia során a berendezés az alkatrész felépítéséhez tintasugaras nyomtatófejből több ezer cseppnyi fém vagy kerámia nanorészecskét tartalmazó szuszpenziót juttat a munkasztalra, amivel párhuzamosan a támasztékot is felépíti. A folyamat 250-300°C-ra melegített munkatérben megy végbe, ezáltal lehetővé válik, hogy a folyadék elpárologjon, így a részecskék minden irányba megtapadnak. A keletkezett termékben csak kismennyiségű

kötőanyag található. A folyékony szuszpenziók lezárt patronokban kerülnek a berendezésben telepítésre.[13.][14.]

A gyártási folyamat a folyékony szuszpenzióban lévő szilárd nanorészecskéket tartalmazó lezárt patronok betöltésével kezdődik. Az építő- és támaszanyag-kazetták gyorsan és egyszerűen kézzel tölthetők be, így nincs szükség a veszélyes fémporok kezelésére.[15.]

A több ezer tintasugaras fűvókából egyidőben több millió ultrafinom csepp jut a munkaterületre. A szilárd nanorészecskék ultravékony rétegekben történő diszpergálása lehetővé teszi páratlan minőségű alkatrészek rendkívül hatékony előállítását. A késztermékről a speciális támaszszerkezet vízfürdőben könnyedén eltávolítható, anélkül hogy sérülne a termék. A nyomtatás után az alkatrészek tartalmaznak még minimális mennyiségű kötőanyagot. A termék kemencében való szinterezése után a maradék kötőanyag is eltávolításra kerül.[15.][16.]

Mivel az NPJ technológia szuszpenziós alapanyagot használ elkerülhető a szitálás, a nyomtatás normál légkörben végrehajtható, nincs szükség vákuumra, gázra.[16.]

Az NPJ eljárást alkalmazzák az orvosiparban hallókészülékek, sebészeti szerszámok, fogászati koronák, hidak készítésére. Az autóiparban és a repülőgépiparban magas hőmérsékletnek és súrlódásnak kitett alkatrészek, valamint az elektromos iparban érzékelők gyártására használják.[16.]

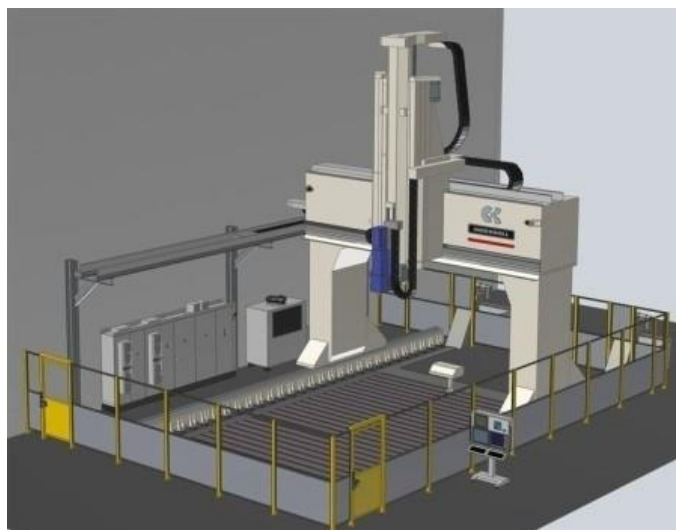
2.3. Példák fém 3D nyomtatás védelmi célú alkalmazására

Ebben az alfejezetben kívánom alátámasztani a témaválasztásom helytállóságát. A világ vezető hadseregei különböző esetekben alkalmazzák már az additív gyártást termékek előállítására, számos példa áll rendelkezésre a 3D nyomtatás védelmi iparban való alkalmazásának vizsgálatával foglalkozó projektek tekintetében.[17.]

2.3.1. 3D nyomtatott páncéltest

Az Amerikai Egyesült Államok Hadserege harcjárművek páncéltestét szeretné additív gyártástechnológia segítségével létrehozni. Az ASTRO Amerika – Amerika védelmi K+F tevékenységekért felelős nonprofit szervezete – a világ legnagyobb fém 3D nyomtatójának kifejlesztésére kötött szerződést, annak érdekében, hogy képesek legyenek páncéltestek egy darabban való nyomtatására a gyártási idő redukálásával, tömegcsökkentéssel az előállítási költségek csökkentése mellett. A projekt a Jointless Hull nevet viseli. A hagyományos gyártástechnológiák nem alkalmasak monolitikus páncéltest gyártására. A Jointless Hull

projekt eredményeként alapfelszereltséggé válhat az additív gyártástechnológiával létrehozott páncéltest az amerikai hadseregben. A 3. ábrán a Jointless Hull projekt során létrehozni kívánt 3D nyomtató látványterve látható.[17.][18.]



3. ábra: a Jointless Hull projekt keretén belül létrehozni kívánt nyomtató látványterve[17.]

2.3.2. Elavult alkatrészek igény szerinti 3D nyomtatása

Az Amerikai Egyesült Államok Hadseregében az additív gyártástechnológia egyik legeredményesebb alkalmazása egy járműfedél-dugó gyártása volt. Az alkatrész biztosítja a harckocsivezetők számára, hogy gyenge fényviszonyok mellett is jól lássanak. Az eredeti alkatrész előállítását a gyártó leállította, így a pótlás a hadsereg számára több ezer dollárba került volna hagyományos gyártástechnológiákkal, azonban 3D nyomtatási technológiák alkalmazásával lehetséges volt alacsonyabb költségen, a hatékonyságát növelve előállítani az alkatrészt.[17.]

A járműfedél-dugók gyártása mellett az amerikai hadsereg más területen is kívánja használni a fém 3D nyomtatást. A Black Hawk helikoptereket és a B-2 Spirit lopakodó bombázókat a Védelmi Minisztérium további tíz évig kívánja rendszerben tartani 3D nyomtatott pótalkatrészek alkalmazásával.[17.]

2.3.3. Tanúsítvánnyal rendelkező 3D nyomtatott repülőgépalkatrészek

Az F-22 Raptor – amerikai légierő legdrágább vadászgép típusa – additív gyártott alkatrészekkel repül 2019 óta. Az első 3D nyomtatott alkatrészt az Utah állambeli Hill Légierő

Bázison telepítették egy harcképes F-22 Raptorba. A 4. ábrán a 3D nyomtatott és az eredeti alkatrész látható.[17.][19.]



4. ábra: Az F-22 Raptor eredeti és a 3D nyomtatott alkatrészei[19.]

Az eredeti alumínium alkatrészt a karbantartás során 80%-os valószínűséggel kellett cserélni, ezzel szemben az additív gyártott alkatrész titán fémporból került legyártásra, aminek köszönhetően nem rozsdásodik, ez által nagyobb valószínűséggel vált prognosztizálhatóvá az, hogy a vadászgépek további élettartama alatt nem lesz szükség a cseréjükre. A technológia használatával továbbá anyagi erőforrásokat és időt takarítottak meg. A kezdeti sikerek eredménye alapján további öt fémből készült additív gyártott repülőgépalkatrész tesztelését tervezték be.[17.][19.]

A TF33-P103 típusú hajtóműhöz hoztak létre alkatrészt 3D nyomtatással az oklahomai Légi Logisztikai Komplexumban. A gyártást követő tesztelés során a termék alkalmazása eredményesnek bizonyult. Az 5. ábrán látható az additív gyártott jég elleni tömítés, ami kritikus elem a hajtómű hatékony és biztonságos működéséhez.[20.]



5. ábra: ATF33-P103 hajtómű 3D nyomtatott tömítőgyűrűje[17.]

2.3.4. Tengeralattjáró javítás a nyílt tengeren

Az Ausztráliai Tengerész Társaság hidegszórásos 3D nyomtatási technológia fejlesztését végzi, annak érdekében, hogy tengeralattjárók fémfelületeinek javítására potenciálisan alkalmazható legyen az eljárás a nyílt tengeren. Az innovatív technológia a használt fém olvadáspontja alatt dolgozik, ezzel elkerülve az alkatrész és az azt körülvevő terület szerkezeti egységének károsodását.[17.][21.]

A társaság a hidegpermetezéssel additív gyártástechnológia alkalmazásával a Collins típusú tengeralattjárók burkolatában előforduló meghibásodások javítására fókuszál. Egy olyan 3D nyomtató, ami képes elvégezni a javításokat dokkolás nélkül, így lehetővé tenné a tengeralattjárók hosszabb idejű bevetettségét és növelné a rendelkezésreállás idejét.[17.][21.]

2.3.5. Egyedi eszközök

Az ausztráliai Charles Darwin Egyetem aktív katonai szolgálatot teljesítő hallgatói a valós felhasználási igényeket figyelembe véve, egy olyan többfunkciós csavarkulcsot terveztek, ami kifejezetten az M242 könnyű páncélozott járműre szerelt géppuska szervizelésére szolgál. A hallgatók maguk határozták meg, hogy az egyes akadályok megoldásához milyen eszközökre van szükség. A detektált megoldásokat pedig egy additív gyártástechnológiával létrehozható

eszközbe ágyazták be. A 6. ábrán látható a hallgatok által a géppuska javítására tervezett 3D nyomtatott szerszám.[17.][22.]



6. ábra: Az M242 könnyű páncélozott jármű géppuskájának javítására szolgáló 3D nyomtatott szerszám[22.]

2.3.6. 3D nyomtatott hajócsavar

A világon elsőként a francia Naval Group fejlesztett additív gyártástechnológiával való gyártásra hajócsavart. A hajócsavar teljes fesztávolsága 2,5 méter, öt darab, egyenként 200 kilogramm súlyú lapátból épül fel. A 3D nyomtatott hajócsavar nagyobb tolóerőt biztosít, valamint az összetett geometriák gyártásának lehetősége miatt tömegcsökkentés is elérhető. A folytatott projektnek csak egy része a hajócsavar gyártása, lényege, hogy további alkatrészek tervezését optimalizálják 3D nyomtatással való gyártásra, olyan módon, hogy megjelenjenek az additív gyártástechnológia nyújtotta előnyök. A 7. ábrán látható az additív gyártástechnológiával létrehozott hajócsavar.[17.]



7. ábra: A francia Naval Group által gyártott 3D nyomtatott hajócsavar[23.]

3. Additív gyártástechnológia védelmi célú alkalmazhatóságának vizsgálata

A fejezetben ismertetem azokat a berendezéseket, amiket az alkalmazhatósági vizsgálat során a termékek gyártására és vizsgálatára használtam. Bemutatom milyen alapeometriák nyomtatására került sor és, hogy milyen következtetéseket vontam le azok vizsgálatából a különböző geometriák gyárthatóságára vonatkoztatva. Azt követően megnevezem a tanulmányozásra kiválasztott alkatrészt, ismertetem az irányelveket, amik alapján megtörtént a modell áttervezése, bemutatom a változtatott modellt és ismertetem a gyártás utáni vizsgálat eredményét.

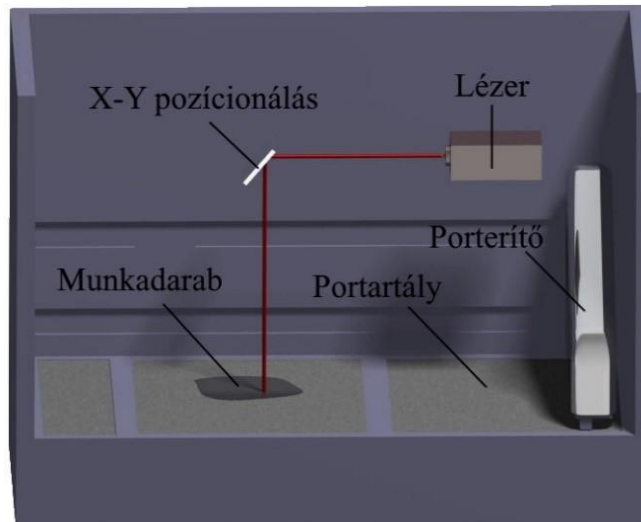
3.1. Az alkalmazott gépek és szoftverek bemutatása

A 3D nyomtatott mintákat a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszék Fém additív gyártástechnológiai laboratóriumában készítettem. A gyártóberendezés EOSINT M270 típusú PBF (DMLS) eljárással működő fém 3D nyomtató (8. ábra).



8. ábra: EOSINT M270 DMLS berendezés a Széchenyi István Egyetemen

Az EOSINT M270 3D nyomtató lézerforrása IPG YLR-200 itterbium szálllézer, aminek hullámhossza $1,07\mu\text{m}$. A berendezés névleges teljesítménye 200W, a munkatere $250\times 250\times 215\text{mm}$. A nyomtató portartálya az építési felülettől jobbra helyezkedik el (9. ábra), a gépben a fémport egy keresztbe mozgó kar teríti el rétegenként. A munkaasztal fölött elhelyezkedő lencse és tükör rendszer biztosítja a lézernyaláb X-Y irányú pásztázását.[6.]



9. ábra: Az EOSINT M270 fém 3D nyomtató munkaterének felépítése[6.]

A nyomtatást nitrogén közegben EOS MaragingSteel MS1 (1.2709) típusú szerszámacél fémporból végeztem. A fémpor nyomtatás előtt 63 μ m-es fémszövetű hálón került átszítálásra, annak érdekében, hogy a fémadarabok és a nagyméretű szemcsék kiszűrésre kerüljenek a használni kívánt alapanyagból. Az építési paramétereket nem változtattam a nyomtatások során, az EOS MS1_02_101 Surface paraméterhez tartozó beállítás szerint történt a nyomtatás 20 μ m-es rétegvastagsággal és 40°C asztalhőmérséklettel.

A nyomtatott darabok méretellenőrzése GOM ATOS Core 200 típusú 3D mérőfejjel történt, a kiértékelést GOM Inspect szoftverrel végeztem.

A GOM ATOS Core 200 típusú optikai 3D mérőgép Triple Scan működési elvet használja, ami azt jelenti, hogy a mérendő felületre a Blue Light technológiával alacsony frekvenciájú kék fényű precíz csíkmintát vetít, amit egyszerre két kamera rögzít. A két kamera és a projektor egyaránt kalibrált, így a három egység bármelyik két tetszőleges nézőpontjából háromszögelhetők a felületi pontok.[24.]

A nyomtatáshoz szükséges támasztékok a Materialise Magics 19.0 programmal készültek.

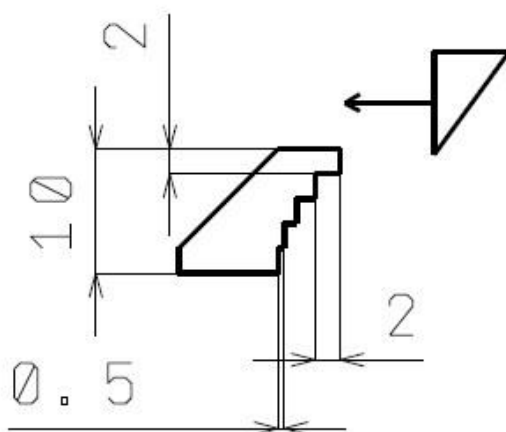
3.2. 3D nyomtatásra tervezett alapeometriák létrehozása

Összetett alkatrészek gyártása esetén gyakran találkozunk olyan felületekkel, amelyek a nyomtatási alaplappal kis szöget zárnak be, ezért támaszt igényelnek. Furatokból, belső üregekből a támaszok teljes eltávolítása sokszor nem lehetséges. Kis lépcsők, beszúrások támasztékolása, majd azok eltávolítása kézi mechanikus eszközökkel gyakran a munkadarab sérülésével jár.

Több irodalom is foglalkozik olyan kritikus felületelemek meghatározásával, amelyek támasz nélkül is gyárthatók, de ezek maximális mérete nagymértékben függ az alkalmazott nyomtatási paraméterektől.[25.][26.]

Célul tűztem ki, hogy mielőtt tényleges darabok tervezésébe és gyártásába fogok, meghatározzam a laborban lévő fém 3D nyomtatóval gyártható támasznélküli felületeket. Korábbi mérések alapján, a nyomtatott felületek orientációtól függő várható felületi érdessége és a névleges mérettől való eltérése ismert.[27.]

Két alape geometria vizsgálatot terveztem, 90°-kal kiálló felületek és furatok nyomtathatóságának jellemzésére. A merőlegesen kiálló felületek vizsgálatához a 10. ábra szerinti próbatesteket készítettem. A próbatesteket 5 különböző irányba helyeztem el a nyomtató asztalán. A 10. ábra szerint lépcsőkkel a porterítővel szemben, illetve 45°-on ként az asztal normálisa körül elforgatva.



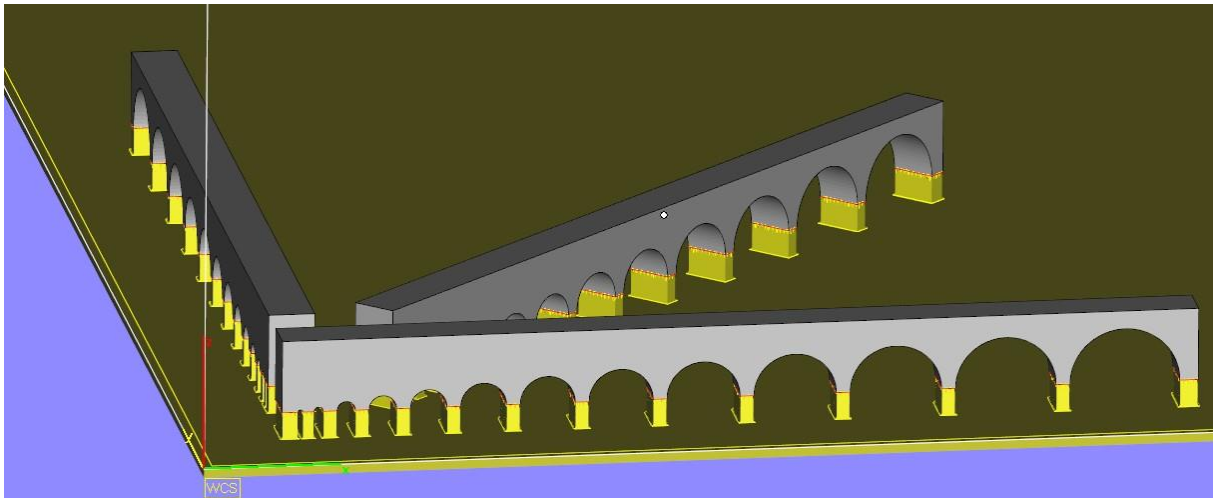
10. ábra: Lépcsőhatás teszt során a próbatest a porterítővel szemben elhelyezve

A furat építés vizsgálatára a 11. ábra szerinti próbatestet terveztem, ahol az ívek sugarát 0,5mm lépésekkel változtattam.



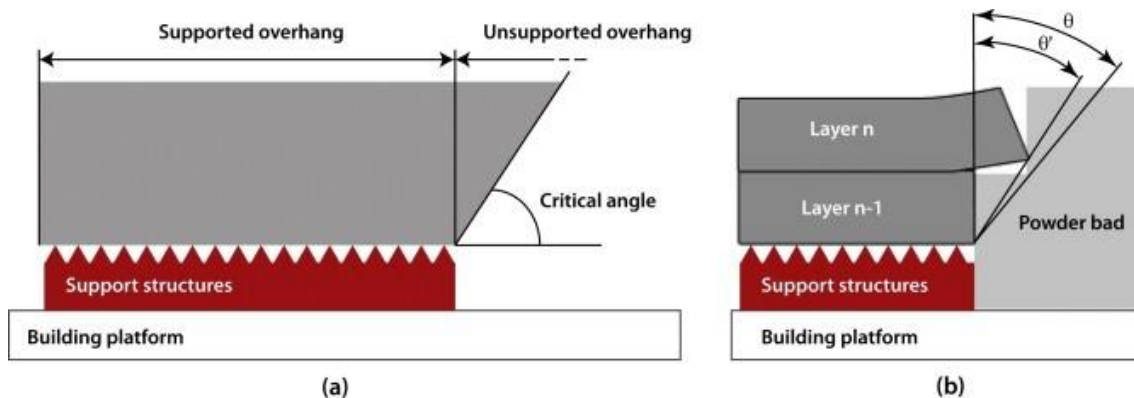
11. ábra: Körépítés teszt során alkalmazott próbatest

A próbatesteket nyomtatáskor a porterítés irányával (X tengellyel) párhuzamosan, 45° -kal és 90° -kal bezáró szögben helyeztem el (12. ábra).



12. ábra: Körépítési próbatestek nyomtatási elhelyezése

A nyomtatás során két, a fémporos additív gyártásra jellemző hatással találkoztam. A túlnyúló rétegek a belső feszültségek hatására felfele deformálódnak (13. ábra).

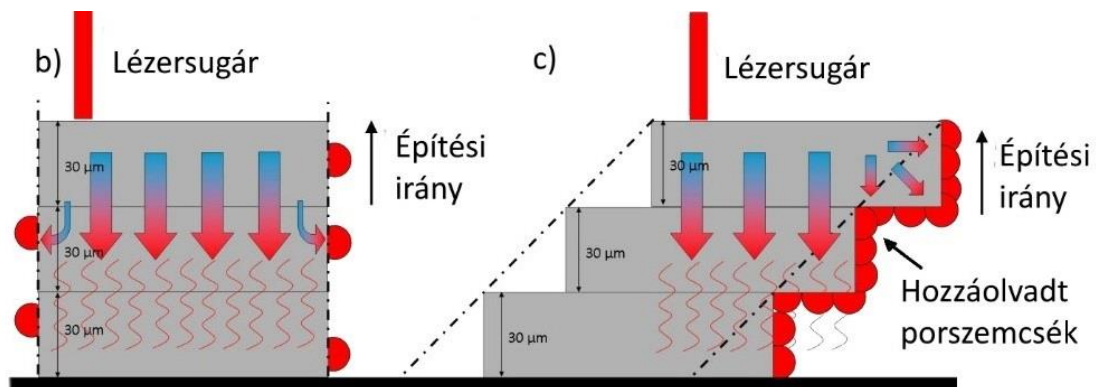


13. ábra: Túlnyúló felületek felhajlása[28.]

A porterítés során a porterítő a felálló részeket fizikailag érinti, azokat a kar a mozgás irányától függően le- vagy felnyomja. Amennyiben a porterítő felfele hajlítja a kiálló részeket, azokat gyakran letépi, ami a következő rétegek túlnyúlási hosszát növeli. Ez a folyamat anyagihiányos nyomtatott darabot, illetve porterítő fizikai elakadását okozhatja.

Nyomtatásnál megkülönböztethetünk alsó és felső felületeket. A felső felületek azok, amelyek a lézerforrás irányából láthatóak. Az alsó felületek felületi érdessége a lépcsők aljához

és oldalához hozzáolvadó nagymennyiségű porszemcse miatt rosszabb, mint ami a felső felületeken mérhető (14. ábra).



14. ábra: A nyomtatott darabokhoz hozzáolvadó porszemcsék[6.]

A lépcsőhatás tesztek közül a 10. ábra szerinti kialakítás esetén, a porterítővel párhuzamos lépcsőkkel elhelyezve csak a 0,5mm-es lépcsővel rendelkező próbatest készült el. Az 1mm-es lépcsőnél a porterítő elakadt. A másik 4 próbatest gyártásánál fizikai elakadás nem volt. A lépcsők aljára nagymennyiségű porszemcse olvadt hozzá. Ez a modell méretét több tized milliméterrel növelte. A hozzáolvadt rész egyenlőtlen, eltérő vastagságú és rossz felületi minőségű.

A körépítés teszteknel a porterítés irányával párhuzamos próbatestnél a porterítő elakadt, a másik két próbatestnél nyomtatási akadás nem történt. A készült íveken jelentős anyagiány nem látható, a nagyobb méretű köríveknél szemmel láthatóan eltérés van az elméleti geometriától. Az összes körívre jellemző, hogy a felületi érdesség a felső ívrészekben lényegesen rosszabb, mint a függőlegeshez közeli falakon. Minden körívnél megfigyelhető a körívtetőn egy hosszanti nagyméretű, a felületről lelógó jelentős anyagtöbblet keletkezése (15. ábra).



15. ábra: Nyomtatott körív

Az irodalom és a próbatest építési eredmények alapján kijelenthető, hogy az építhető geometriákat nem csak azok alakja, hanem a porterítés irányával bezárt szöge is nagymértékben befolyásolja.

3.3. 3D nyomtatásra kiválasztott védelmi célú alkatrész létrehozása

Az alábbi alfejezetben bemutatásra kerül a 3D nyomtatásra kiválasztott alkatrész, ismertetem, hogy milyen irányelvek figyelembe vételével került sor az áttervezésére. Bemutatom az additív gyártásra optimalizált 3D modellt, és geometriai pontossági vizsgálatot végezve összehasonlítom a nyomtatott alkatrészt az eredeti 3D modellel.

3.3.1. Kiválasztott alkatrész bemutatása

A 3D nyomtatásra kiválasztott alkatrész a modernizált AK-63MA gépkarabély csőszerelvénye. Az alkatrész lángrejtő, ami a kompenzátor funkcióját is ellátja.

A lángrejtő a csőtorkolatra kerül felszerelésre, ahol a közvetlenül keletkező lángjelenséget rejt, valamint a kiáramló löporgázok a belsejében hűlnek ez által a lángrejtőt elhagyva kevésbé hajlamosak égésre. Erre a funkcióra azért van szükség, hogy éjszakai feladatvégrehajtás során a katona lokációja kevésbé legyen detektálható a torkolati tűz által.[29.]

A lángrejtő a kompenzátor funkciót a paláston lévő hosszanti bevágások által nyeri el. A fegyver stabilizálására azért van szükség, mivel a fellépő hátratóló erő a fegyvert nem csak hátra, hanem kissé felfelé is mozditja. A kompenzátor a kiáramló gázokat úgy tereli, hogy a cső kissé lefelé mozdujon el. A cső tengelyének középvonalától való kényszeres felfelé történő elmozdulás és a szabályozott lefelé irányuló elmozdulás kompenzálja egymást, ezáltal lehetővé téve a lövész számára, hogy könnyebben és gyorsabban megtalálja a célpontot.[29.]

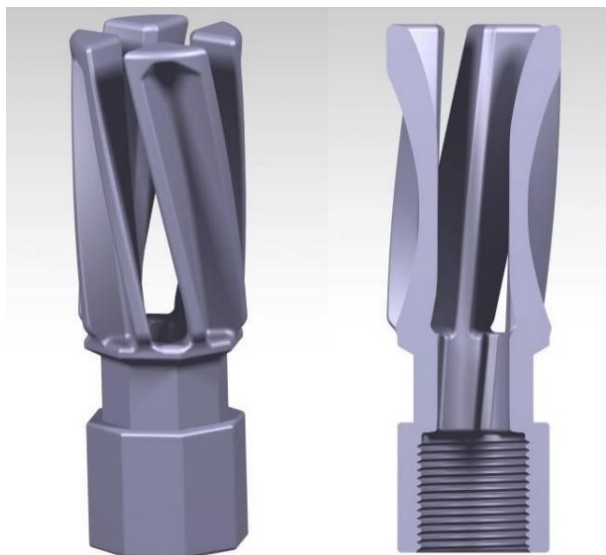
3.3.2. Kiválasztott alkatrész áttervezése fém 3D nyomtatásra

A kiválasztott lángrejtő áttervezése előtt az alábbi célokat tűztem ki:

- befoglaló mérete ne változzon;
- kialakítása, jellege, funkciói megegyezzenek;
- tömege csökkenjen;
- additív gyártással könnyen gyártható legyen;
- csatlakozó része ne változzon, M14x1 (balos);

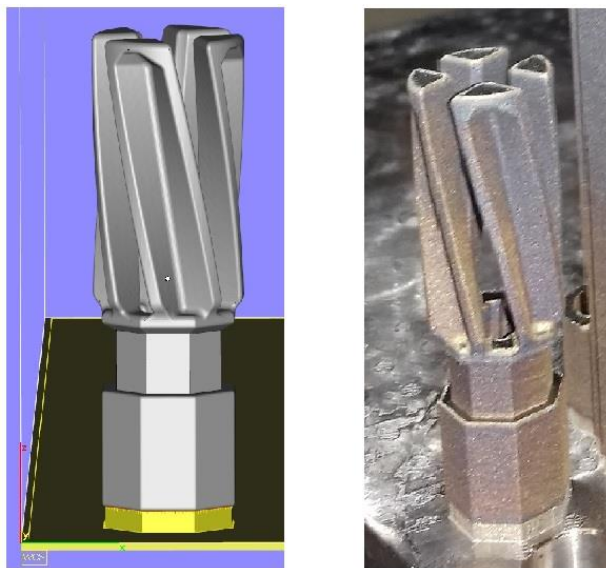
A 3D tervező rendszerben létrehozott új alkatrész plusz felületeinek megjelenése a forgácsolással ellentétben additív gyártás esetén nem növeli az előállítási költségeket, azért az eredeti alkatrészen megtalálható 19mm lapoláson kívül 15mm-es lapolást is létrehoztam. Az

M14x1 menetet már az új 3D modell tartalmazza, mivel az additív gyártással előállítható. A kompenzátor funkció növelése érdekében a korona rész csavarvonal struktúráját a belső furatrészben is folytattam. A tömegcsökkentés érdekében a menet fölötti rész szűkítve lett a 15mm-es lapolással, illetve a korona részen a formát követő zsebek kerültek kialakításra (16. ábra).



16. ábra: Additív gyártásra tervezett alkatrész térbeli (bal) és metszeti (jobb) képe

Mivel az alkatrész modelljének tervezése additív gyártásra történt a felületek kialakításánál arra törekedtem, hogy azok támasz nélkül készülhessenek. A gyártáshoz csak az alkatrész alsó felületét kell támasztékkal ellátni és a gép asztalához kötni (17. ábra).



17. ábra: Alkatrész támaszték tervezése (bal), a nyomtatott darab (jobb)

A nyomtás után az alkatrészeket mechanikusan le kell választani a hordozó lapról. A nyomtatott darabok felülete érdes, a felületi érdesség javítása és az egyöntetű megjelenés érdekében a darabot homokkal szórtam. Az eredeti és az áttervezett nyomtatott darab látható a következő ábrán (18. ábra).

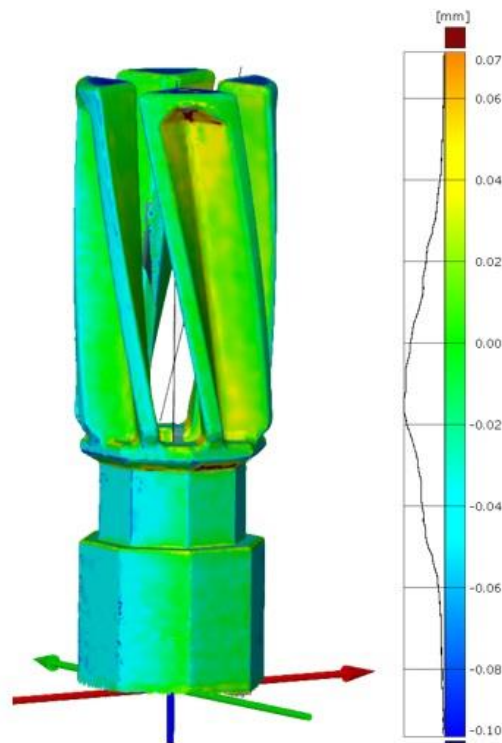


18. ábra: A 3D nyomtatott és az eredeti alkatrész

A fegyverek nehezebb felderíthetősége érdekében felületi bevonatolást kell végrehajtani az alkatrészeken, barnítást, nitridálást vagy DLC felületkezelő technológiát kell alkalmazni annak érdekében, hogy a termék elveszítse világos színét. Az additív gyártásra tervezett darab 67g, 40g-mal könnyebb, mint az eredeti darab. A bemutatott példa rámutat arra a lehetőségre, hogy ha egy védelmi eszközt teljesen 3D nyomtatásra optimalizáltan terveznek, és additív gyártással hozzák létre, akkor lehetőség van az eszköz jelentős tömegcsökkentésére. Az a tömeg, amit nem kell cipelnie a katonának, növeli a katona mozgékonyágát, harcértékét és túlélőképességét.

A gyártott alkatrész méreteit tekintve kevésbé kritikus. Azonban a dolgozat célja, a konkrét darab legyártásán kívül az additív gyártás védelmi célú általános alkalmazhatóságának vizsgálata is, ezért az alkatrészen minősegbiztosítási vizsgálat került elvégzésre, geometriai pontossági vizsgálatnak vetettem alá. Az alkatrész GOM ATOS Core 200 optikai szkennelrel

digitalizálva lett, majd a nyomtatott darab szkennelt modellje összehasonlításra került a tervezett 3D geometriával GOM Inspect 2018 programban (19. ábra).



19. ábra: A nyomtatott alkatrész méreteltérése a tervezett 3D geometriától

A mérés alapján megállapítható, hogy a vizsgált alkatrész megfelel a technológiával szembeni és az általános gyártási elvárásoknak. A darab egésze $\pm 0,1\text{mm}$ tűrésmezőn belül helyezkedik el, míg a darab nagyrésze $\pm 0,05\text{mm}$ pontossággal készült. Ez a pontosság alkalmassá teszi a gyártást a példaalkatrésznél magasabb minőségi elvárással rendelkező alkatrészek gyártására is.

4. Összefoglalás

A dolgozatomban áttekintést adtam az additív gyártástechnológiák kialakulásáról, bemutattam a fontosabb definíciókat és eljárásokat. Részletesen foglalkoztam a ma legelterjedtebb fém 3D nyomtatási technológiákkal, közülük is különös figyelmet fordítva a porágyas fém lézeres 3D nyomtatásra. Példákat hoztam arra, hogy a világ vezető hadseregei milyen módon alkalmazták már a fém 3D nyomtatást kísérleti vagy alkalmazási fázisban lévő kutatások során. A példák bemutatásán keresztül látható, hogy a fém 3D nyomtatás várhatóan egyre nagyobb teret hódít magának a védelmi ipari gyártás során, ez által igazolttá vált a dolgozat témafelvetésének fontossága. A védelmi célú felhasználásra irányuló alkalmassági vizsgálat érdekében először alapeometriákat nyomtattam, amik vizsgálatával megállapítottam, hogy a belső feszültség miatt felfelé deformálódó túlnyúló rétegek a porterítő irányával párhuzamosan lehelyezett próbatestek esetében a kar fizikai elakadását okozták. Azokban az esetekben, ahol a próbatestek a porterítő irányára merőlegesen voltak elhelyezve vagy valamilyen szöget zártak be nem jelentkező elakadás a kar működésében. A körépítési teszt alapján továbbá megállapításra került, hogy a körívek esetében a felső ívrészekeken sokkal rosszabb a felületi érdesség, mint a függőlegeshez közeli falakon, valamint, hogy alátámasztás hiányában a körívtetőn anyag többlet keletkezik. Összességében az alapeometriák és a felelhető irodalmak vizsgálata alapján megállapítottam, hogy az építhető geometriákat nem csak az alakjuk, hanem a porterítés iránya is jelentősen befolyásolja. Alapeometriák vizsgálata után az additív gyártásra kiválasztott alkatrész 3D modelljét úgy alkottam meg, hogy az eredeti alkatrész funkcióit betöltse, a tömege csökkenjen és 3D nyomtatásra optimalizált legyen. Az alkatrész az additív gyártás védelmi célú alkalmazhatóságának vizsgálata érdekében geometriai pontossági mérésen esett át. A mérés eredményeként kijelenthető, hogy az alkatrész megfelel az általános előállítási és a technológiával szemben támasztott elvárásoknak. A 3D nyomtatott alkatrész $\pm 0,05$ mm felületi pontossággal rendelkezik, ami alkalmassá teszi az eljárást magasabb minőségi elvárásokkal rendelkező alkatrészek gyártására.

4.1. Következtetések

A 3D nyomtatás alkalmazásával felgyorsíthatók a védelmi célú kutatás-fejlesztési tevékenységek, a modell létrehozása után a termék gyorsabban előállítható, mint hagyományos eljárásokkal. Továbbá a felmerülő tervezési problémák CAD modellen való javítása után a megváltozott geometriájú termék rögtön előállítható és vizsgálatoknak vethető alá. A K+F tevékenység eredményeként létrejövő új típusú védelmi célú eszközök alkatrészeinek

tömeggyártásába is beépülhet a fém 3D nyomtatás, amennyiben az alkatrészek tervezése az additív gyártás egyedi tervezési szabályait figyelembe véve történt.

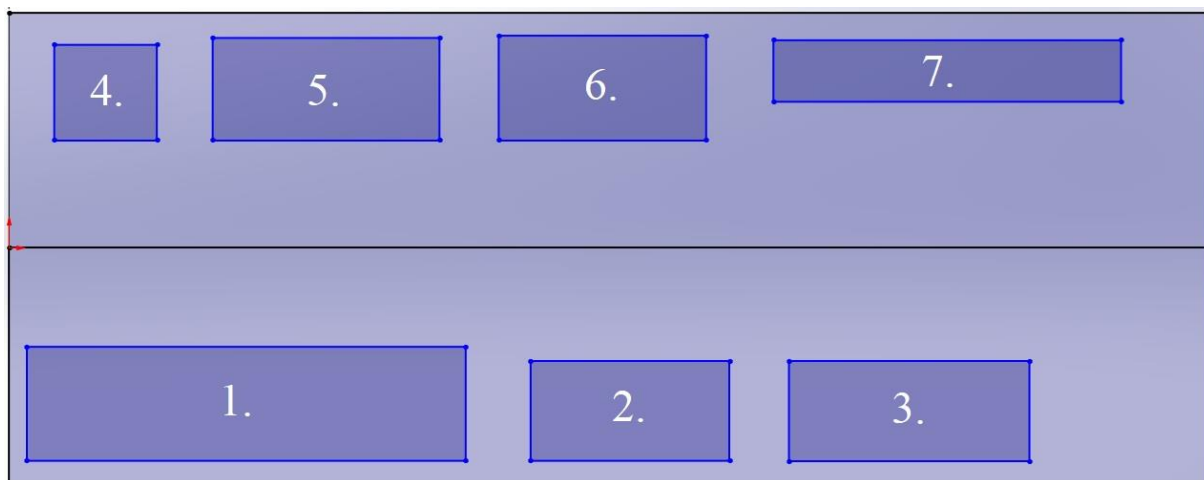
Az additív gyártástervezés és az additív gyártás alkalmazásával nem csak a védelmi célú K+F tevékenységeket, de a meglévő eszközök gyártását is meg lehet reformálni. A technológiák lehetőséget biztosítanak a meglévő védelmi felhasználású eszközök alkatrészeinek újra tervezésére, a 3D nyomtatásra optimalizált tervezés eredményeként az additív gyártás beépíthetővé válhat a hagyományos eljárásokat alkalmazó gyártási sorba, ez által mérsékelni lehetne a gyártási idő. Az additív gyártás eredményeként csökkenthető az eszközök alkatrészeinek darabszáma, összetett szerkezetek gyárthatók egy alkatrészként, továbbá a széles tervezési és gyártási szabadság eredményeként bennszülött alkatrészek hozhatók létre, és eddig kivitelezhetetlen geometriák teremthetők meg. Az optimalizált terméktervezéssel nagymértékben csökkenthető a felhasznált alapanyag mennyisége, a termék tömege és a keletkezett hulladék mértéke.

Az additív gyártás alkalmazása az előre tervezett alkatrészek gyártása mellett lehetővé teszi a hirtelen felmerülő problémákra való gyors reagálást. Additív gyártáshoz szükséges gépekkel berendezett konténerek alkalmazásával a honvédség növelni tudná a logisztikai képességeit. Egy sztenderd méretű konténerek alkalmazásával mobil javítókapacitás alakítható ki. A tábori vagy missziós körülmények között felmerülő rendhagyó problémák helyben, rövid idő alatt kiküszöbölhetők, az eszközök működésképpessége megőrizhető az eredeti pótalkatrészek rendelkezésre állásáig. A sztenderd 40 lábas konténerbe az alábbi berendezések telepítését javaslom:

1. fém 3D nyomtató,
2. munkaasztal;
3. számítógépes tervező asztal (laptoppal, 3D szkennel);
4. homokszóró;
5. marógép;
6. eszterga,
7. tároló.

A megfelelő méretű munkatér biztosítása érdekében a berendezések két konténerben való elhelyezését látnám célravezetőnek. Olyan konténerek alkalmazása lenne célszerűnek, amik oldalai könnyen eltávolíthatók. A konténerek telepítése a hosszabb oldalaik mentén való

összeillesztéssel történne. A 20. ábra a berendezések lehetséges elrendezését mutatja, a berendezéseket jelölő téglalapok nem mérethelyesek.



20. ábra: A 3D nyomtatóval szerelt konténer berendezéseinek elrendezése

4.2. További kutatási irányok kijelölése

A tématerület mélyebb kutatása során szeretnék további vizsgálatokat elvégezni annak érdekében, hogy az additív gyártástechnológiák alkalmazásával a már feltárt előnyökön túl milyen további előnyök megteremtése lehetséges védelmi ipari felhasználás során. A védelmi felhasználású eszközök vonatkozásában sok esetben fontos kritérium az alkatrészek kopásállósága. A későbbiekben vizsgálni szeretném, hogy az egyes 3D nyomtatási eljárásokkal létrehozott termékek kopásállóságát milyen mértékben befolyásolja felületkezelések elvégzése, ezt koptatóvizsgálatok végrehajtásával szeretnék megvizsgálni. A kopásállóság mellett a változó környezeti viszonyok miatt fontos hangsúly van a védelmi eszközök korrózióállóságán is. Ennek érdekében a bevonatolt 3D nyomtatott termékeket sópermet tesztnek és hősokk tesztnek szeretném alávetni.

5. Irodalomjegyzék

- [1.]3D Printing Industry, The Free Beginner's Guide, History of 3D Printing, 2022.01.18.
- [2.]Lonjon, C.: The history of 3D printer: from rapid prototyping to additive fabrication, <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>, 2022.01.18.
- [3.]Gaget, L.: The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today, <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>, 2022.01.18.
- [4.]Dr. habil Husi G., Dr. Szemes P. T.: 3D nyomtatásban használatos fájlformátumok, Rapid prototyping technológiák- additív technikák, 2015.09.30., 13-19. old.
- [5.]Materialise Cloud, STL Converter, <https://cloud.materialise.com/tools/stl-converter>, 2022.01.18.
- [6.]Hatos I.: Additív szerszámgyártás technológiájának fejlesztése járműipari alkatrészek gyártásához, Doktori értekezés, Széchenyi István Egyetem, 2020
- [7.]ALL3DP, Murphy, J.: Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained, <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>, 2022.02.19.
- [8.]ALL3DP, Jones G.: Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained, <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>, 2022.02.22.
- [9.]Revilla-León, M., Meyer, M.J., Özcan, M.: Metal additive manufacturing technologies: literature review of current status and prosthodontic applications, International Journal of Computerized Dentistry 2019; 22(1): 55-67, https://www.academia.edu/41096231/Metal_additive_manufacturing_technologies_literature_review_of_current_status_and_prosthodontic_applications
- [10.] ALL3DP, Gregoric, L.: Electron Beam Melting (EBM) – 3D Printing Simply Explained, <https://all3dp.com/2/electron-beam-melting-ebm-3d-printing-simply-explained/>, 2022.02.25.
- [11.] ALL3DP, Schwaar, C.: Betting on Binder Jetting for Production Additive Manufacturing, <https://all3dp.com/1/betting-on-binder-jetting-for-production-additive-manufacturing/>, 2022.03.06.

- [12.] Mostafaei, A., Elliot, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., Chmielus, M.: Binder jet 3D printing – Process parameter, materials, properties, modeling, and challenges, Progress in Materials Science, vol.119, June 2021, 100707
- [13.] 3DPBM, 3D Printing Media Network, NanoParticle Jetting (NPJ), <https://www.3dprintingmedia.network/additive-manufacturing/am-technologies/what-is-nanoparticle-jetting/>, 2022.03.08.
- [14.] 3DPBM, 3D Printing Media Network, Boissonneault, T.: An in depth look at XJET's NanoParticle Jetting technology for metal and ceramics, <https://www.3dprintingmedia.network/xjet-nanoparticle-jetting-technology/>, 2022.03.08.
- [15.] XJET, <https://www.xjet3d.com/technology/>, 2022.03.08.
- [16.] Gardner Business Media, Inc., Additive Manufacturing, AM 101: NanoParticle Jetting (NPJ), <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-nanoparticle-jetting-npj>, 2022.03.08.
- [17.] ALL3DP, Cottingham, A.: Military Application of 3D Printing, <https://all3dp.com/1/3d-printing-military-applications/>, 2022.03.20.
- [18.] US Dept Of Defense, Aliotta, J.:GVSC awards contract to build largest metal 3D printer ever, <https://www.dvidshub.net/news/397953/gvsc-awards-contract-build-largest-metal-3d-printer-ever>, 2022.03.21.
- [19.] Official United States Air Force Website, Hill Air Force Base, Bradshaw, R. N.: First metallic 3D printed part installed on F-22, <https://www.hill.af.mil/News/Article-Display/Article/1734175/first-metallic-3d-printed-part-installed-on-f-22/>, 2022.03.21.
- [20.] Official United States Air Force Website, Hill Air Force Base, Rangel, D.: Tinker units collaborate, produce first 3D printed engine component, <https://www.hill.af.mil/News/Article-Display/Article/2303173/tinker-units-collaborate-produce-first-3-d-printed-engine-component/>, 2022.03.21.
- [21.] Australian Submarine Corporation, ASC and partners to pioneer additive manufacturing for submarines, <https://www.asc.com.au/asc-and-partners-to-pioneer-additive-manufacturing-for-submarines/>, 2022.03.22.
- [22.] Spee3D, SPEE3D_gunners-ratchet.pdf, https://www.spee3d.com/wp-content/uploads/2021/05/SPEE3D_gunners-ratchet.pdf, 2022.03.24.

- [23.] DefenseNews , Mackenzie, C.: Naval Group prints propeller for powering French warship, <https://www.defensenews.com/global/europe/2021/01/13/naval-group-prints-first-propeller-for-powering-french-warship/>, 2022.03.24.
- [24.] R-Design Studio Kft., ATOS Core Minőségi eredmények az alapoktól, <http://r-design.hu/merorendszerek-szoftverek/atos/core/>, 2022.04.09.
- [25.] Q. Han, H. Gu, S. Soe, R. Setchi, F. Lacan, J Hill: Manufacturability of AlSi10Mg overhang structures fabricated by laser powder bed fusion, Materials and Design 160 (2018), 1080-1095, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.043>
- [26.] M. Dana, I. Zetková, P. Hanzl, O. Hronek: Accuracy of holes created by 3D printing (DMLS), Proceedings of 28th DAAAM International Symposium (2017), 467-473, DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.065
- [27.] Hatos I., Kovács J. G.: Szinterezett fém alkatrészek felületi érdessége és méretpontossága a gyártási orientáció függvényében, OGÉT 2013 XXI Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Arad, Románia, 2013. 04. 25- 04. 28., pp. 146-149
- [28.] F. Calignano: Design optimization of supports for overhanging structures in aluminium and titanium alloys by selective laser melting, Materials and Design 64 (201), 203-213, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043>
- [29.] Varga, R.: Fegyverzettechnikai ismeretek, Jegyzet, Diana Vadász-Felnőttképző Alapítvány Szakképző Iskola és Kollégium (2008-2009), 213-214. old.

6. Ábrajegyzék

1. ábra: SLA-1, az első gyors prototípusgyártó berendezés[3.]	3
2. ábra: STL fájl viszonya a CAD modellel[5.]	4
3. ábra: a Jointless Hull projekt keretén belül létrehozni kívánt nyomtató látványterve[17.]..	10
4. ábra: Az F-22 Raptor eredeti és a 3D nyomtatott alkatrészei[19.]	11
5. ábra: ATF33-P103 hajtómű 3D nyomtatott tömítőgyűrűje[17.]	12
6. ábra: Az M242 könnyű páncélozott jármű géppuskájának javítására szolgáló 3D nyomtatott szerszám[22.]	13
7. ábra: A francia Naval Group által gyártott 3D nyomtatott hajócsavar[23.]	13
8. ábra: EOSINT M270 DLMS berendezés a Széchenyi István Egyetemen	14
9. ábra: Az EOSINT M270 fém 3D nyomtató munkaterének felépítése[6.].....	15
10. ábra: Lépcsőhatás teszt során a próbatest a porterítővel szemben elhelyezve	16
11. ábra: Körépítés teszt során alkalmazott próbatest	16
12. ábra: Körépítési próbatestek nyomtatási elhelyezése	17
13. ábra: Túlnyúló felületek felhajlása[28.]	17
14. ábra: A nyomtatott darabokhoz hozzáolvadó porszemcsék[6.].....	18
15. ábra: Nyomtatott körív	18
16. ábra: Additív gyártásra tervezett alkatrész térbeli (bal) és metszeti (jobb) képe	20
17. ábra: Alkatrész támaszték tervezése (bal), a nyomtatott darab (jobb)	20
18. ábra: A 3D nyomtatott és az eredeti alkatrész	21
19. ábra: A nyomtatott alkatrész méreteltérése a tervezett 3D geometriától	22
20. ábra: A 3D nyomtatóval szerelt konténer berendezéseinek elrendezése.....	25

7. Rövidítésjegyzék

BJ	Binder Jetting
CAD	Computer-aided design
DLC	Diamond-Like Carbon
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
K+F	Kutatás-fejlesztés
NPJ	Nanoparticle Jetting
PBF	Powder Bed Fusion
RP	Rapid Prototyping
SLM	Selective Laser Melting
STL	Standard Triangle Language