WYKORZYSTANIE DRUKAREK 3D W LOGISTYCZNYM ZABEZPIECZENIU DZIAŁAŃ OKRĘTÓW NA MORZU

THE USE OF 3D PRINTERS IN LOGISTIC SUPPORT DURING SHIP OPERATION AT SEA

Grażyna SZUBRYCHT
g.szubrycht@gmail.com

Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Dowodzenia i Operacji Morskich
Instytut Bezpieczeństwa Publicznego

Jarosław TESKA
j.teska@amw.gdynia.pl

Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Dowodzenia i Operacji Morskich
Instytut Bezpieczeństwa Publicznego

STRESZCZENIE

W publikacji przedstawiono historię rozwoju wydruków 3D oraz ich współczesne zastosowania, ze szczególnym uwzględnieniem militarnych aspektów wykorzystania technologii szybkiego prototypowania. Specyfika działań okrętów oraz wyzwania wiązane z logistycznym zabezpieczeniem ich działań sprawia, że drukarki 3D znalazły się w obszarze zainteresowania przedstawicieli marynarki wojennej. W związku z tym w artykule postawiono do rozstrzygnięcia problem z jakimi wyzwaniami wiązane jest wykonywanie wydruków 3D na pokładach okrętów a także jakie są zalety i wady zastosowania tej technologii w logistycznym zabezpieczeniu działań okrętów na morzu.

SUMMARY

This publication presents the development of 3D printing technology over the years, with strong emphasis on the military aspects of range of rapid prototyping technology. Individual nature of strips operations and the challenges to logistic security of this operations develop strong interest made in printers. This article presents and divers into challenges which making 3D prints on decks of the ships brings in, as well as advantages and disadvantages of using this technology in regard to logistic security of naval vessels' operations.

Słowa kluczowe: wydruki 3D, technologie szybkiego prototypowania, zabezpieczenie logistyczne działań okrętów, militarne wykorzystanie drukarek 3D
Key words: 3D printers, naval logistic support, 3D printers in military use

WSTĘP

Truizmem wydaje się stwierdzenie, że podstawowym przeznaczeniem okrętów jest prowadzenie działań na morzu, często w rejonach oddalonych, a nie postój w porcie. Okręty aby mogły efektywnie realizować postawione zadania, muszą mieć zapewnione środki

walki (amunicję, rakiety, torpedy, miny), materiały pędne, żywność oraz co jest równie ważne sprawnie działające systemy i urządzenia okrętowe. Naturalną konsekwencją eksploatacji wszystkich urządzeń technicznych są awarie, uszkodzenia i niesprawności. Oczywiście nie każde uszkodzenie, niesprawność czy awaria systemu, urządzeń lub wyposażenia okrętowego ma taki sam wpływ na zdolności bojowe okrętu. Nie wszystkie niesprawności eliminują okręt z działalności operacyjnej na morzu i wymuszają powrót do bazy morskiej. Doświadczenia związane z zabezpieczeniem logistycznym działań okrętów, jakie marynarki wojenne różnych państw zgromadziły na przestrzeni wieków sprawiają, że każdy z okrętów posiada na pokładzie zestaw części zamiennych do urządzeń które, mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia zdolności bojowych lub takich które najczęściej ulegają uszkodzeniu lub awarii.

Bardzo często również w skład zespołów okrętów wchodzą okręty specjalistyczne, okręty wsparcia logistycznego, bazy pływające, na których zgromadzony jest większy i bardziej różnorodny zapas części zamiennych dla okrętów wchodzących w skład zespołu. Okręty takie mogą przeprowadzać również bardziej specjalistyczne naprawy. Coraz większe utechnicznienie okrętów oraz zwiększająca się liczba różnorodnych systemów okrętowych, zwiększające się ich złożoność sprawia, że wzrasta również prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń niesprawności lub awarii. Oczywiście w przypadku prowadzenia działań zbrojnych to prawdopodobieństwo ulega znacznemu zwielokrotnieniu.

Należy również pamiętać, iż okręty zwykle przeznaczone są do prowadzenia działań na morzu przez dłuższy okres czasu wynoszący od kilku tygodni nawet do kilkunastu miesięcy. Ponadto okręty są eksploatowane przez 30 – 40 lat, nie jest również rzadkością, iż w składzie marynarki wojennej są okręty pełniące służbę przez więcej niż 50 lat. Przedstawione uwarunkowania sprawiają, że zabezpieczenie logistyczne działań na morzu jest dużym wyzwaniem i systematycznie zyskuje na znaczeniu.

Jak już wspomniano wcześniej, postęp techniczny spowodował nie tylko rozszerzenie katalogu pozycji, które są w obszarze zainteresowania zabezpieczenia logistycznego, ale również stworzył nowe możliwości logistykom. Na przestrzeni lat zwiększeniu uległa niezawodność systemów, urządzeń i wyposażenia okrętowego dzięki m.in. zastosowaniu nowych materiałów. Ostatnie lata otworzyły kolejne możliwości wynikające z upowszechnienia oraz udoskonaleniu technologii wydruków 3D, zastosowania szerokiej gamy materiałów wykorzystywanych przy wydruku oraz lepszego oprogramowania niezbędnego do wykonywania skomplikowanych wydruków, cechujących się pożądanymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Jednak istnieje powszechne znane stwierdzenie, że jedną z przeszkód we wprowadzaniu nowości w siłach zbrojnych jest wyeliminowanie starego sposobu myślenia. To stwierdzenie jednak w przypadku nowości technicznych i ich ewentualnego wykorzystania w siłach zbrojnych nie jest do końca prawdziwe. Bardzo często zasadniczą przeszkodą w zastosowaniu nowych technologii są bardzo wysokie wymagania stawiane przed sprzętem i urządzeniami wykorzystywanymi w siłach zbrojnych.

Zasadniczym celem niniejszej publikacji jest przeanalizowanie czy, a jeśli tak to w jakim stopniu, możliwe jest wykorzystanie wydruków 3D w szeroko rozumianym zabezpieczeniu logistycznym działań współczesnych okrętów oraz zidentyfikowanie zasadniczych przeszkód w ich powszechnym wykorzystywaniu w marynarce wojennej, lotnictwie morskim czy morskich siłach specjalnych.

1. HISTORIA TECHNOLOGII 3D I JEJ WSPÓŁCZESNE ZASTOSOWANIA

W ostatnich pięciu latach wydruki 3D stały się elementem naszej codzienności, dlatego wiele osób przekonanych jest, że technologia druku 3D to osiągnięcie ostatnich kilka lat. W rzeczywistości historia ta jest znacznie dłuższa. Za datę rozpoczynającą historię wydruków 3D można przyjąć rok 1984 (ma ona zatem już 34 lata), jednak prace koncepcyjne nad wspomnianą technologią zapoczątkowane zostały przez Francuza Pierre A. L. Cirauda na początku lat 70. ubiegłego wieku. Zaproponował on metodę druku przedmiotów o dowolnej geometrii poprzez dodawanie materiału w postaci proszku i ich tworzenie w oparciu o wykorzystanie odpowiedniego źródła energii. Opis tej metody opublikowany został w połowie roku 1973 r. i dał podwaliny technologii znanej dziś jako SLS (*selectve laser sintering* – selektywne spiekanie laserem).

Sześć lat później Amerykanin Ross F. Housholder złożył wniosek o opatentowanie metod warstwowego formowania wyrobów poprzez spajanie różnego rodzaju materiałów. Metody te zostały opatentowane na początku 1981 roku, nie zostały one jednak skomercjalizowane. W kolejnych latach prowadzone były różne prace nad rozwojem tych technologii.

Jednak współcześnie za ojca technologii druku 3D uznaje się Charlesa Hulla, który stworzył nie tylko pierwszą oficjalną metodę drukowania przestrzennego – *stereolitografię* (SLA), ale również założył pierwszą firmę produkującą drukarki 3D, była to firma 3D Systems. Od roku 1993 zaobserwować można powolny, ale systematyczny rozwój branży druku 3D. Na rynku dostępne były maszyny drukujące w kilku niezależnych technologiach. W tym roku narodziła się również jedna z najpopularniejszych technologii

przyrostowych, nazwana po prostu „*drukiem 3D*" (*3 Dimensional Printing Techniques*). Twórcami tej metody byli naukowcy z *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Opracowali oni metodę tworzenia modeli przestrzennych z proszku gipsowego, spajanego selektywnie natryskiwanym lepiszczem. Do pracy wykorzystano technologię stosowaną w drukarkach atramentowych, które w tym rozwiązaniu zamiast atramentu na papier, nanosiły klej na proszek gipsowy (Ślusarczyk, 2017).

Pierwsza dekada XXI wieku to ostatnia dekada, w której rynek druku 3D był zdominowany przez drogie technologie o charakterze profesjonalnym, a o jego istnieniu wiedziało tylko wąskie grono specjalistów(Ślusarczyk, 2017). Nie bez znaczenie na boom w wydrukach 3D miał fakt, że w ostatnich dziesięciu latach drukarki 3D stały się 100 razy szybsze i aż 45 razy tańsze (spadek ceny z 18 000 do 400 USD)(Katoch, 2018).

Natomiast inne ograniczenia zastosowania drukarek 3D wynikają z następujących przyczyn: możliwości sprzętu (np. kształt oraz gabaryty komory roboczej samej drukarki), metod wytwarzania zaprojektowanych elementów (np. metody, w których materiał zawieszony jest w proszku co umożliwia na tworzenie wydruków znacznie bardziej skomplikowanych elementów, niż w przypadku metod, w których materiał nanoszony jest stopniowo), materiałów z jakich musi być wykonany wydruk, właściwości termicznych wykorzystywanych materiałów oraz ludzkiej wyobraźni.

Obecnie drukarki 3D wykorzystywane są między innymi w: **różnych gałęziach przemysłu** (np. motoryzacyjnym, elektroniczny i elektrotechniczny, maszynowym, elektromaszynowym, komputerowym, paliwowo-energetyczny, obuwniczym czy zbrojeniowy), **medycynie, stomatologii, weterynarii**, **architekturze i budownictwie**, **reklamie i marketingu, edukacji** oraz **modzie**. Jak już wspomniano wcześniej istotnym ograniczeniem zastosowań wydruków 3D jest nasza wyobraźnia, oznacza to, że liczba podmiotów i obszarów w których wykorzystywane będą wydruki 3D w przyszłości będzie się systematycznie zwiększała.

Poniżej przedstawione zostaną wybrane przykłady zastosowania wydruków 3D: **Motoryzacja** – drukarki 3D wykorzystywane są m.in. do tworzenia wydruków specjalistycznych zestawów metalowych narzędzi wykorzystywanych przy montowaniu różnych modeli samochodów w firmie Volvo (ich wykorzystanie powoduje obniżenie: kosztów o 94%, niezbędnego czasu wytworzenia oraz wagi bez zmniejszenia właściwości mechanicznych – wytrzymałości), prototypowania nowych modeli samochodów (np. Forda

Mustanga, co aż 30-krotnie skróciło czas jego tworzenia oraz umożliwiło obniżenia kosztów aż 166-krotnie), wytwarzania części samochodowych (tytanowych rur wydechowych czy elementów, których złożoność kształtu bardzo utrudniała lub wręcz uniemożliwiała ich wykonanie metodami tradycyjnymi). Warto również wspomnieć, że został zbudowany już pierwszy samochód złożony w całości z części wyprodukowanych z wykorzystaniem technologii szybkiego prototypowania. Powstał on w Kanadzie i nazywa się *Urbee*.

Architektura i budownictwo – najczęstszym sposobem wykorzystania technologii 3D w architekturze i budownictwie jest drukowanie modeli domów, mieszkań, rzutów kondygnacji budynków, wydruki całych budynków czy też całych wieloelementowych inwestycji budowlanych. Przykładem takiej inwestycji może być wydruk 10 domów tworzących osiedle w Szanghaju. Natomiast szwedzka firma *Skanska* wykorzystuje wydruki 3D w wielu realizowanych inwestycjach np. przy budowie szesnastopiętrowego wieżowca w Londynie wykorzystano wydruki 3D jako elementy maskujące łączenia stalowych słupów podporowych dachu.

Przemysł zbrojeniowy – wykorzystuje możliwości jakie stwarza druk 3D w wielu dziedzinach np. do wytwarzania prototypów działającej broni, wydruku głowic pocisków o specjalnie zamodelowanej geometrii która zapewnia lepszą celność, większą siłę rażenia oraz wyposażenia specjalistycznego zwiększającego bezpieczeństwo żołnierzy. Dzięki drukarkom 3D możliwe jest wytwarzanie specjalistycznych narzędzi i części zamiennych wyposażenia i sprzętu wojskowego. Drukarki 3D były już wykorzystywane przez armię prowadzącą działania w Afganistanie.

Medycyna, stomatologia i **weterynaria** – po raz pierwszy druk 3D znalazł zastosowanie w medycynie w 1999 roku[1]. Na przestrzeni ostatnich 20 lat udało się m.in. wydrukować miniaturową nerkę, zdolną do filtracji krwi oraz produkcji moczu u zwierząt. Dzięki opracowaniu nowych biozgodnych materiałów, możliwe jest wsparcie organizmu człowieka w odbudowie tkanek na rusztowaniach wydrukowanym na drukarkach 3D, dzięki czemu radykalnie wzrosły możliwości regeneracji tkanek i wypełniania powstałych ubytków. Drukarki 3D pozwalają na wydruk szerokiej gamy spersonalizowanych implantów czy protez. Współcześnie druk 3D znajduje powszechne zastosowanie przy tworzeniu implantów w stomatologii, ortodoncji oraz weterynarii. Zaletą wydruków jest radykalne skrócenie czasu przygotowania implantów z tygodni w przypadku metod klasycznych do dni lub godzin w przypadku wydruków 3D.

[1] Stworzono skafold, który pokryty komórkami własnymi pacjenta, został wykorzystany w leczeniu przerostu pęcherza moczowego chorego

Moda – projektanci mody coraz częściej sięgają do możliwości jakie dają drukarki 3D. Jednak o wiele ważniejsze są możliwości drukarek 3D przy tworzeniu idealnie wyprofilowanych wkładek do butów na podstawie skanów stóp klientów i uwzględnieniu takich parametrów jak wzrost, waga i aktywność konkretnego klienta. Wydruki 3D znalazły również zastosowanie w jubilerstwie przy wydruku biżuterii. W 2011 roku po raz pierwszy jako materiału do druku 3D użyto srebra i złota. Możliwe jest również zaprojektowanie i wydrukowanie mebli, zgodnie z projektem klienta.

Przemysł spożywczy – w lutym 2015 roku klienci holenderskiego supermarketu mogli udekorować ciasta czekoladą za pomocą drukarki 3D. W połowie tego samego roku zaprezentowano drukarkę *PancakeBot,* dzięki której możliwe było drukowanie naleśników o różnych kształtach. Trwają prace nad drukiem żywności.

Edukacja – wydruki szerokiej gamy pomocy dydaktycznych np. części anatomicznych czy części urządzeń technicznych. Istotna jest również możliwość wydruku kopi dzieł sztuki np. rzeźb, płaskorzeźb, ceramiki, kopi zabytkowej broni i innych przedmiotów zabytkowych mogących służyć w procesie nauczania.

Druk 3D stanowi idealne narzędzie w rękach kolekcjonerów, którzy mogą z łatwością wytwarzać wszelkiego rodzaju figurki i inne gadżety. Wśród dostępnych w Internecie modeli, które zgromadzone są w licznych bazach np. *MakerBot Thingiverse*, znajdziemy mnóstwo takich, które po wydrukowaniu posłużą jako oryginalny prezent lub zabawka dla dziecka. Dodatkowo wiele wydruków 3D może ułatwić nam codzienne życie. Do takich przedmiotów należą np. różnego rodzaju specjalistyczne i dedykowane podstawki, stojaki, uchwyty czy wieszaki.

Niektóre z przedstawionych poniżej możliwości zastosowań drukarek 3D wydają się przykładami ze sfery *science fiction* jednak historia pokazuje, że w przyszłości takie zastosowania są jak najbardziej realne. Otóż przez dekady lekarze marzyli o możliwości zaprojektowania i wykonania implantów nerek, wątroby i innych organów i tkanek, dzięki którym pacjenci potrzebujący transplantacji, nie musieliby czekać na dawcę. Technologia szybkiego prototypowania sprawia, że takie marzenia stają się coraz bardziej realne. W nieodległej przyszłości możliwe stanie się drukowanie 3D mięsa ze specjalnej hodowli komórek. Możliwości i korzyści jakie daje produkcja żywności w formie wydruku 3D zostały zauważone i docenione, na przykład przez armię amerykańską. Inwestuje ona w rozwój technologii wytwarzania żywności metodą druku addytywnego.

Nad innym przyszłościowym zastosowanie druku 3D pracują aktualnie naukowcy z *Massachusetts Institute of Technology*, otóż dzięki zastosowaniu druku 4D stworzyli

materiały zmieniające się pod wpływem kontaktu z innymi substancjami np. wodą. Tym samym w przyszłości możliwe będzie drukowanie mundurów zmieniających kolor w zależności od środowiska, w jakim żołnierze będą prowadzić działania operacyjne.

Przemysłowe drukarki trójwymiarowe mogą korzystać z niemalże każdego rodzaju materiału, są to zarówno metale, gumy, żywice, a także tworzywa sztuczne, takie jak PLA, ABS, PVA, nylony i wiele innych, a ich grupa nadal systematycznie się powiększa. W zastosowaniach domowych i amatorskich, najczęściej wykorzystywane są właśnie te ostatnie czyli: PLA, ABS, PVA i nylon, gdyż zapewniają one niskie koszty oraz nie są tak wymagające jak stosowanie innych materiałów (CADXPERT, 2018).

Jak wynika z przeprowadzonej analizy wybranych zastosowań wydruków 3D ich wykorzystanie obniża koszty, skraca czas oraz otwiera nowe możliwości. Redukcja kosztów wynika m.in. z faktu, że przy stosowaniu konwencjonalnych metod obróbki ubytkowej usuwa się zbędny materiał, a to wiąże się ze stratami. Natomiast w przypadku zastosowania druku 3D zużywa się dokładnie tyle materiału, ile jest potrzebne do stworzenia danego modelu.

2. WYDRUKI 3D W WYBRANYCH ZASTOSOWANIACH MILITARNYCH

Siły Zbrojne od wieków inspirowały do tworzenia rozwiązań, które zwiększałyby potencjał bojowy sił zbrojnych lub adaptowały do zastosowań militarnych powstałe rozwiązania techniczne lub organizacyjne wykorzystywane w sferze niemilitarnej. Podobnie jest z technologią wydruków 3D. Przemysł zbrojeniowy prowadzi systematyczne prace nad wykorzystaniem technologii druku 3D, a ostatnia dekada dostarcza coraz więcej przykładów takich zastosowań. Aktualnie wydruki 3D wykorzystywane są przez wszystkie rodzaje sił zbrojnych tj. wojska lądowe, siły powietrzne, marynarkę wojenną, siły specjalnych oraz piechotę morską. Oczywiście, ze względu na specyfikę każdego rodzaju sił zbrojnych, stopień wykorzystania tej technologii jest różny. Istotnym wyzwanie staje się realizacja wydruków 3D w warunkach bojowych. Należy być jednak pewnym, iż zakres wykorzystania tej technologii w przyszłości będzie się systematycznie zwiększał.

Poniżej przedstawione zostaną wybrane przykłady zastosowania wydruków 3D w amerykańskich siłach zbrojnych. Stany Zjednoczone podobnie jak w innych dziedzinach również w przypadku wykorzystania tej technologii w siłach zbrojnych są światowym liderem.

2.1. Siły powietrzne

W przypadku sił powietrznych zastosowanie wydruków 3D jest obwarowane restrykcyjnymi wymaganiami. Dotyczą one w szczególności wykorzystania wydruków 3D w zastosowaniach, które mogą mieć bezpośredni wpływu na bezpieczeństwo lotów statków powietrznych, tym samym na życie lub zdrowie człowieka.

Dwa lata temu amerykańskie dowództwo NAVAIR[2] dowiodło, że wydruki 3D tych części lotniczych, które mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo lotów, mogą znaleźć powszechne wykorzystanie. Przydatność takich części potwierdzono podczas praktycznych testów samolotu *MV-22B Osprey* znajdującego się na wyposażeniu amerykańskiej piechoty morskiej. Podczas przeprowadzonych testów w samolocie *MV-22B Osprey* zamontowano tytanowy wydruk elementów gondoli silnika. Przeprowadzone testy zakończyły się sukcesem. Jednak pierwszą częścią wykonaną w technologii druku 3D i zatwierdzoną do użytku przez Federalną Administrację Lotnictwa (*FAA*) w USA była obudowa czujnika T25, mierzącego temperaturę powietrza zasysanego do sprężarki silnika *General Electric GE90-94B*.

Według szacunków specjalistów koncernu *BAE Systems,* zastosowanie do produkcji elementów samolotów *Tornado* drukarek addytywnych przyniesie RAF oszczędności na poziomie 1,2 mln funtów w ciągu czterech lat. Koszt wytworzenia części zastosowanych w testowanym samolocie był niższy o 300 GBP niż przy zastosowaniu tradycyjnych metod wytwarzania takich części.

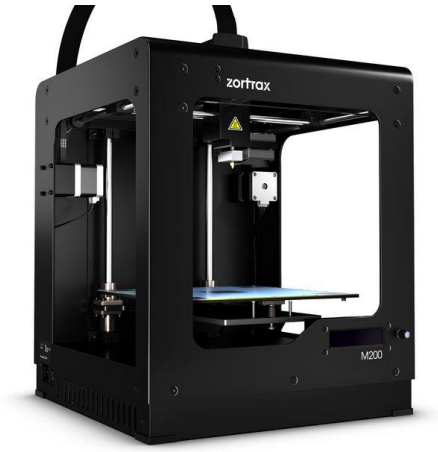
W przypadku części, które nie mają bezpośredniego wpływu na bezpieczeństwo lotów statków powietrznych mogą być one wdrożone do powszechnego użytku znacznie szybciej. Wiosną 2016 roku wykorzystano wydruk 3D zaworu typu *flip-top*, w który wyposażona została maska tlenowa wykorzystywana w samolocie szkolnym *T-45 Goshawk,* pozwalającej pilotom na treningi w kabinie oddechowej (Rysunek 1).

[2] Głównym zadaniem *Naval Air Systems Command* (NAVAIR) jest zapewnienie szeroko pojmowanego wsparcia w całym cyklu eksploatacyjnym samolotów, uzbrojenia i systemów wykorzystywanych przez amerykańską marynarkę wojenną i piechotę morską. Wsparcie szeroko pojmowanego zabezpieczenia logistycznego, które obejmuje m.in.: badania, rozwój, pozyskiwanie niezbędnego sprzętu i części zamiennych, przeprowadzanie testów i ewaluacji nowowprowadzanego wyposażenia, szkolenia, obsługę techniczną, naprawy oraz modernizację. Idea działanie NAVAIR opiera się na trzech filarach: zadanie, człowiek i stworzenie pożądanych związków między zadaniem i człowiekiem

Rys. 1. Wydrukowany zawór typu *flip-top* wykorzystywany w masce tlenowej samolotu szkolnego 45 Goshawk
Źródło: Emanuel Cavallaro via NAVAIR (12.08.2018).

Również w Polsce w przemyśle zbrojeniowym wykorzystywane są drukarki 3D. Wojskowe Zakłady Lotnicze (WZL) Nr 2 w Bydgoszczy wykorzystują drukarki firmy Zortrax. Zakłady te zapewniają obsługę, przeglądy i modernizacje samolotów Su-22 i MiG-29. Drukarki Zortrax M200 (Rysunek 2) wykorzystywane są do modelowania części, które później będą wykorzystywane w tych samolotach. Po dokonaniu wydruku są one sprawdzane pod względem ich kompatybilności z aktualną awioniką samolotu.

Druk 3D pozwala bardzo zredukować koszty ponoszone przez zakłady w celu utrzymania samolotów w pełnej gotowości bojowej. Szybkie prototypowanie 3D wykazuje każdą niezgodność między projektem CAD dostarczonym przez producenta części, a fizyczną geometrią samolotu. Okazuje się, że jest to najszybszy sposób aby rozwiać wszelkie wątpliwości zanim dany element zostanie zbudowany i wysłany do Zakładów Lotniczych. Drukarki Zortrax M200 znalazły zastosowanie również w przemyśle motoryzacyjnym.



Rys. 2. Polska drukarka 3D wykorzystywana w Wojskowe Zakłady Lotnicze Nr 2 w Bydgoszczy
Źródło: http://cadportal.pl/polskie-drukarki-3d-firmy-zortax-wykorzystywane-przez-wojskowe-zaklady-lotnicze (14.08.2018).

2.2. Siły specjalne

Laboratorium *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) we współpracy z *U.S. Navy's Disruptive Technology Lab* opracowało projekt pozwalający wydrukować (po raz pierwszy w historii) kadłub pojazdu podwodnego (Rysunek 3), przeznaczonego dla amerykańskich sił specjalnych (*SEALS*). Pojazd ten ma ułatwiać płetwonurkom bojowym transport pod wodą sprzętu i wyposażenia niezbędnego do realizacji konkretnej misji bojowej. Dzięki opracowanemu projektowi możliwy będzie wydruk pojazdu podwodnego dedykowanego do każdej misji(Alexandrea, 2017). Warto podkreślić, że koszt „klasycznego" opracowania i wybudowania kadłuba pojazdu podwodnego waha się od 600 do 800 tys. USD i trwa od 3 do 5 miesięcy. Dzięki zastosowaniu technologii *Big Area Additive Manufacturing* (*BAAM*) możliwe było zredukowanie kosztów produkcji takiego kadłuba o 90% i czasu jego budowy z miesięcy do dni (Alexandrea, 2017).

Rys. 3. Wydrukowany 10-metrowy pojazd podwodny dla sił specjalnych
Źródło: Miley, (2017).

Również Brytyjczycy rozpoczęli prace badawcze, których celem jest uzyskanie do 2030 roku zdolności do realizacji wydruków 3D, małych bezzałogowych jednostek nawodnych i podwodnych o długości do 15 metrów, wydrukowanych z metalu, grafitu i tworzywa sztucznego.

2.3. Siły lądowe

W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój wydruków 3D działającej broni oraz improwizowanych ładunków wybuchowych (Rysunek 4). Ważnym obszarem wykorzystania drukarek 3D w wojskach lądowych jest wydruk głowic pocisków o specjalnie zamodelowanej geometrii. Coraz bardziej powszechnie technologię tę wykorzystuje się w druku spersonalizowanego obuwia dla żołnierzy, hełmów oraz indywidualne środki ochrony przed bronią masowego rażenia. Podobnie jak w innych rodzajach sił zbrojnych również w wojskach lądowych drukarki 3D wykorzystuje się do produkcji części zamiennych wyposażenia i sprzętu oraz w zastosowaniach medycznych.

Rys. 4. Wydruk 3D prototypu miny lądowej
Źródło: Sebastian Pop, 2014.

Prace nad militarnymi zastosowaniami druku 3D są realizowane, oprócz USA, również w wielu innych krajach, w tym w Wielkiej Brytanii. Ministerstwo Obrony tego państwa zapoczątkowało program mający na celu wdrożenie infrastruktury umożliwiającej zastosowanie druku 3D w siłach zbrojnych. Nosi on nazwę *Additive Manufacturing Deployed Exploitation Capability Concept Demonstrator* (*AMDEx*) i znajduje się we wstępnej fazie badawczo-rozwojowej.

3. ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII 3D W MARYNARCE WOJENNEJ

Gen. Greg Masiello powiedział, że celem lotnictwa marynarki wojennej nie są wydruki części mających wpływ na bezpieczeństwo lotów, ale takich które poprawią

ten proces(Lai, 2018). Otóż wydruk nie wszystkich części jest konieczny, ekonomicznie uzasadniony lub możliwy z technicznego punktu widzenia.

W ostatnim roku amerykańskie Biuro Badawcze Marynarki Wojennej przyznało firmie *Concurrent Technologies Corporation* kontrakt o wartości 2,8 mln USD na rozwój wydruków metalowych, które mogą być wykorzystane w Marynarce Wojennej USA(Lai, 2018).

Kiedy na okręcie uszkodzeniu lub awarii ulegnie jakaś część, konieczne jest usunięcie awarii, niesprawności lub uszkodzenia tak szybko jak jest to możliwe. Nowoopracowany program *GE Global Research* ma na celu rozwój zdolności skanowania i wydruku 3D części zamiennych wykonanych z metalu stopionych laserem na okręcie lub w brzegowym centrum logistycznym. W przypadku wykonania wydruku w brzegowym centrum logistycznym konieczne jest jego dostarczenie na okręt tak szybko jak to jest możliwe. Marynarka amerykańska pokłada duże nadzieje w tej technologii. Jednak w jej przypadku przydatność wydruków 3D mogą stać się one nieocenione również z innego punktu widzenia. Otóż okręty amerykańskie starzeją się. Są one eksploatowane od kilku dekad. Tym samym zwiększają się problemy logistyczne w zapewnieniu części zamiennych dla tych okrętów, ponieważ często nie są one już produkowane. Z punktu widzenia logistycznego aż do momentu wycofania z linii okrętów części zamienne do tych okrętów muszą być cały czas dostępne.

Wzrastające zdolności marynarki wojennej do realizacji wydruków 3D na morzu znacząco zwiększy możliwości zastępowania uszkodzonych części urządzeń okrętowych. Ponadto coraz powszechniejsze wykorzystywanie wydruków 3D sprawia, że w nieodległej przyszłości nie będzie już konieczności magazynowania na okrętach dużej liczby części zamiennych. Podniesie to ekonomiczność eksploatacji okrętów i efektywność wykorzystania części zamiennych. Aktualnie Marynarka Wojenna Stanów Zjednoczonych w pierwszym etapie wykorzystania drukarek 3D koncentruje się na druku części o objętości mniejszej niż stopa sześcienna.

Powstałe uszkodzenie, niesprawność lub awaria urządzenia okrętowego musi zostać usunięta tak szybko jak to jest możliwe. Okręty marynarki wojennej prowadzące działania na morzu często borykają się z problemem braku części zamiennych do uszkodzonych lub zniszczonych urządzeń okrętowych. Oczywiście jedną z opcji reakcji jest wyłączenie z eksploatacji takiego urządzenia, jednak bardzo często nie jest to możliwe. W przypadku gdy wyłączenie z eksploatacji uszkodzonego urządzenia nie jest możliwe wówczas uszkodzona część:

- wymieniana jest na nową, jeśli znajdują się na danym okręcie;

- można ją pozyskać z zapasu części zamiennych znajdujących się na innym okręcie;
- można ją pozyskać z brzegowego centrum logistycznego, jednak w tym przypadku okręt musi zawinąć do portu lub też taka część musi zostać dostarczana na okręt.

W ostatnich latach pojawiło się jeszcze jedno źródło pozyskania takiej części, a mianowicie może zostać ona wydrukowana na okręcie z wykorzystaniem drukarki 3D. Komandor M. Lienza z amerykańskiej marynarki wojennej stał się zwolennikiem wykorzystania technologii 3D, po tym jak będąc na okręcie zobaczył proces drukowania uszkodzonej część urządzenia okrętowego. Zaistniała awaria wyeliminowała okręt z działań operacyjnych i miała bezpośredni wpływ na jego gotowość bojową.

Jednak dzięki technologii druku 3D możliwe było usunięcie awarii w kilka godzin. Wówczas stwierdził, że „[…] *nowoczesne technologie przesuwają marynarkę wojenną ze świata rzeczywistego do cyfrowego. Dlatego zamiast zgromadzonych na okręcie części zapasowych, może na nim znajdować się drukarka 3D i torby z różnymi składnikami, niezbędnymi do realizacji wydruków 3D, co pozwoli w dowolnym momencie wydrukować prawie każdą uszkodzoną część*" (Templeton, 2013).

Jednak przedstawiciele amerykańskiej marynarki wojennej są świadomi, że z inżynierskiego punktu widzenia niezbędne jest uzyskanie odpowiedzi na wątpliwości, czy części drukowane w technologii 3D i wykorzystywane na okrętach, samolotach i śmigłowcach marynarki wojennej są w stanie sprostać wymaganym parametrom technicznym.

Navy's Office of Research, Development Test & Evaluation opublikowało na początku 2016 dokument *Department of the Navy (DON) Additive Manufacturing (AM) Implementation Plan.* W dokumencie tym, który ma obowiązywać w latach 2016-2025 przyjęto 5 celów i mapę drogową dochodzenia do rozszerzenia wykorzystania technologii 3D w marynarce wojennej dla zapewnienia zabezpieczenia logistycznego działań okrętów.

Pomimo tego, że wydruki 3D są coraz powszechniej wykorzystywane w sił zbrojnych w ramach logistycznego łańcucha dostaw nie wolno zapominać, że technologia wydruku 3D, podobnie jak inne nowinki techniczne, obarczona jest pewnymi ograniczenia i wyzwaniami technologicznymi, prawnymi oraz organizacyjnymi.

Do wyzwań natury technologicznej zaliczyć należy konieczność spełnienia wymagań z zakresie wytrzymałości i niezawodności wykonanych wydruków. Część wydruków musi przejść skomplikowany i czasochłonny proces certyfikacji. Niektórzy eksperci twierdzą, że przeprowadzenie przez marynarkę wojenną procesu kwalifikacji dla nowych materiałów

wykorzystywanych przez technologię wydruków 3D, może potrwać do 10 lat. Nowe materiały muszą być przetestowane nie tylko ze względu na ich właściwości mechaniczne takie jak: wytrzymałość na obciążenie (rozciąganie, ściskanie, zginanie, ścinanie, itp.), wytrzymałość zmęczeniowa materiału czy udarność. Materiały te muszą spełniać również rygorystyczne wymagania przeciwpożarowe, przeciwdymne i zakresu toksyczności (*Flame, Smoke* i *Toxicity* - FST) (Johnson, 2018). Wykorzystywane obecnie w siłach zbrojnych technologie wydruków zaliczane są do technologii *COTs* (*Commercial Off the Shelf*), pozwalają uzyskiwać wydruki z wymaganą tolerancją wymiarów. Przeznaczone są przede wszystkim do wykonywania wydruków na lądzie, w kontrolowanym środowisku, natomiast w przypadku ich wykorzystania na okrętach, wydruki wykonywane będą podczas ruchu okrętów (wyzwania związane z przechyłami bocznymi, przechyłami wzdłużnymi i drganiami) oraz w środowisku, w którym występuje duża wilgotność i zasolenie.

Uwarunkowania środowiskowe występujące na morzu sprawiają, że metodologia oraz parametry materiałów stosowanych w technologii szybkiego prototypowania wykorzystywanych na okrętach powinny różnić się od tych wykorzystywanych na lądzie. Przedstawione uwarunkowania: wibracje, przechyły boczne i wzdłużne okrętu oraz środowisko o dużej wilgotności i zasoleniu sprawiają, że wykonywane wydruki powinna cechować częściowa zmienność geometryczna i zwiększenie wewnętrznej porowatości materiałów wykorzystywanych do wydruku, co nie pozostaje bez wpływu na jakość pozyskanych w ten sposób części zamiennych.

Wykorzystywane na okręcie metodologie wydruku oraz materiały, bez względu na ostateczne przeznaczenie wydrukowanych części zamiennych muszą przejść certyfikowanie wykonane przez NAVSEA z zakresu FST. Wykorzystywane materiały przechodzą częściowe certyfikowanie, zbliżone do tego, które ma miejsce na lądzie. Dla przykładu przeprowadzone testy okrętowe i laboratoryjne wykazały, że aktualnie dostępne materiały polimeryczne nie spełniają wymagań FST, dlatego przyjęto, że wykorzystywane na okrętach: drukarki 3D, materiały oraz metodologie wydruku powinny cechować się następującymi właściwościami:

- materiały muszą spełniać wymagania FST;
- drukarki 3D muszą zapewnić wymaganą dokładność wymiarową wydruków oraz założoną tolerancję kształtu wydruków wykonywanych podczas ruchu jednostki pływającej;

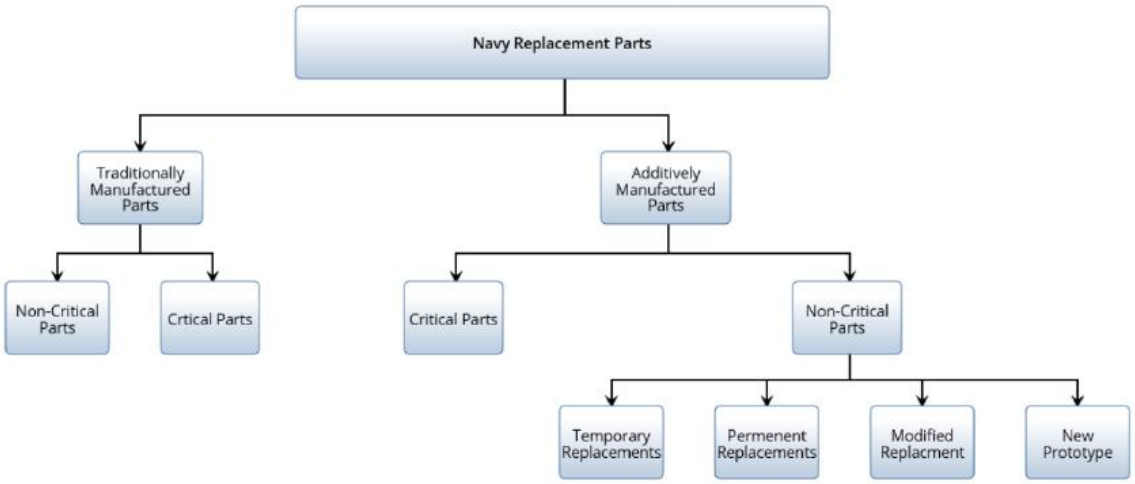
– materiały oraz zastosowane metodologie druku z zastosowaniem materiałów niemetalowych, muszą zapewnić jednolitą strukturę realizowanych wydruków(Putnam, 2016).

Do wyzwań i ograniczeń prawnych wykorzystywania drukarek 3D do wytwarzania części zamiennych zaliczyć należy konieczność uwzględnienie praw własności intelektualnej części drukowanych na pokładzie okrętu lub części dostarczanych (zamawianych) elementów z brzegowych centrów logistycznych (Leopold, 2016).

W przypadku ograniczeń organizacyjnych pojawia się problem decyzji, gdzie powinny być zainstalowane drukarki 3D wykorzystywane w marynarce wojennej.

Opinie ekspertów odnoszące się do miejsca zainstalowania wykorzystywanych drukarek 3D można podzielić na trzy zasadnicze grupy. Do pierwszej zaliczyć należy te według, których drukarki 3D powinny być instalowane przede wszystkim w brzegowych bazach logistycznych. Druga grupa uważa, że w drukarki 3D powinny być wyposażone okręty. Natomiast najbardziej racjonalny jest głos trzeciej grupy ekspertów, którzy uważają, że drukarki 3D powinny znajdować się zarówno w brzegowych centrach logistycznych jak i na pokładach okrętów, a zakres wykorzystywania wydruków 3D uzależniony byłby od zaistniałych potrzeb.

Do wydruków 3D wykorzystywana jest szeroka gama materiałów np. polimery, żywice, materiały ceramiczne, metale czy materiały gumopochodne (dokładniejszy podział zaprezentowano na Rysunku 5.). Marynarka wojenna jest szczególnie zainteresowana w wydrukach zrealizowanych z użyciem metali tj. tytanu, aluminium oraz stali nierdzewnej. W roku 2016 w amerykańskiej marynarce wojennej dostępnych było 150 różnych materiałów wykorzystywanych do realizacji wydruków 3D. W roku 2017 amerykańskie Biuro Badawcze Marynarki Wojennej podpisało z firmą *Concurrent Technologies Corporation* kontrakt o wartości 2.8 mln USD na rozwój wydruków metalowych, które mogą być wykorzystane w Marynarce Wojennej USA (Lai, 2018).



Rys. 5. Kategorie części zamiennych wydrukowanych w technologii 3D wykorzystywane w marynarce wojennej
Źródło: DeVisser, 2017.

Tymczasowe części zamienne (*Temporary replacements*) po wydrukowaniu są montowane w urządzeniach, których przywrócenie do prawidłowego działania pozwala na wykonanie przez okręt postawionej misji, zadania lub umożliwia samodzielny powrót okrętu do bazy. Wykorzystanie wydrukowanych części do takich urządzeń, nawet po ich ponownym uszkodzeniu nie spowoduje negatywnych skutków dla człowieka (zranienie, śmierć) lub urządzenia.

Intencją przy ich wydruku jest sprostanie założeniu, iż muszą być wystarczająco dobre (*just good enough*) oraz to, że będą wykorzystywane w urządzeniu tylko do momentu zaistnienia możliwości ich wymiany na tradycyjną część zapasową, która zostanie dostarczona na okręt w ramach istniejącego systemu zabezpieczenia logistycznego lub do momentu wejścia do portu. Czas ich użytkowania to kilka dni lub co najwyżej kilkanaście dni. Oczywistym jest zatem to, że niezawodność i żywotność części wydrukowanych w technologii 3D o takim przeznaczeniu nie jest taka sama jak części produkowanych w sposób „klasyczny", ale jednocześnie musi być taka, by niezawodnie działały przez czas niezbędny do pozyskania „klasycznych" części zamiennych.

Ponieważ, iż wykorzystanie jest tylko czasowe nie ma konieczności przeprowadzania obowiązkowych badań nieniszczących (*Non Destructive* testing - NDE) tak wydrukowanych części. Powodem takiego podejścia jest to, że jeśli taka część tylko przez pewien czas (nawet bardzo krótki) działa poprawnie, a następnie ulegnie zniszczeniu lub uszkodzeniu bez spowodowania dodatkowych uszkodzeń urządzenia można ją ponownie wydrukować

i zamontować do urządzeniu. Cykl taki może być wielokrotnie powtarzany, aż do momentu pozyskania certyfikowanych części zamiennych.

Stałe zastąpienie uszkodzonych części przez wydruki 3D (*Permenent Replacements*) – wykorzystywane w taki sposób części, możemy podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należy zaliczyć te części zamienne, które nie wymagają przeprowadzenia testów niezawodnościowych, ponieważ siły dynamiczne oddziaływujące na te części nie występują lub są bardzo małe. Do drugiej grupy należy zaliczyć natomiast te części, które ze względu na swój charakter muszą przejść cały cykl certyfikacji i testów obowiązujących w marynarce wojennej przed ich dopuszczeniem do użytku. Wszystkie wydruki 3D przeznaczone do stałego zastąpienia uszkodzonych części okrętowych, muszą spełniać obowiązujące w marynarce wojennej wymagania przeciwpożarowe, przeciwdymne i wymagania z zakresu toksyczności (FST).

Ponadto części zaliczane do tej grupy, powinny cechować się określonym poziomem niezawodności, określonej z użyciem stosownych badań nieniszczących (NDE) oraz po zamontowaniu, należy je monitorować przez założony czas dla upewnienia się, że istnieje ich pełne dopasowanie. Szczególnie ważne, z punktu widzenia zabezpieczenia logistycznego działań marynarki wojennej, jest możliwość pozyskiwania, dzięki zastosowaniu technologii wydruków 3D, tych części zamiennych, które nie są dostępne na rynku (DeVisser, 2017).

Zmodernizowane części drukowane w technologii 3D (*Modified Replacements*) są to części, których pierwotna konstrukcja, waga lub materiał z którego zostały wykonane została zmieniona bez negatywnego wpływu na ogólne parametry danej części.

Części prototypowe wydrukowane w technologii 3D (*New Prototype*) obejmują wydruki części, niezbędnych do logistycznego zabezpieczenia przeprowadzanych prób i testów eksploatacyjnych przed dopuszczeniem urządzenia do powszechnego zastosowania (DeVisser, 2017).

4. PODSUMOWANIE

Upowszechnienie technologii 3D i zastosowań wydruków 3D nie mogło pozostać bez wpływu na szeroko pojmowany sektor technologii wojskowych. Ostatnia dekada to systematycznie wzrastająca liczba militarnych zastosowań tej technologii szybkiego prototypowania. Wykorzystanie w marynarce wojennej wydruków 3D jest szczególnie istotne w obszarze logistycznego zabezpieczenia działań okrętów na morzu.

W tym miejscu może zrodzić się pytanie: dlaczego producenci sprzętu i uzbrojenia akceptują zastosowanie tej metody do wytwarzania elementów ich maszyn w wojsku? Szczególnie jeśli uwzględnimy fakt, że koszty eksploatacji to nawet 70% kosztów całego cyklu życia urządzenia, tym samym w dużej mierze stanowią zyski producentów. Taka akceptacja wymuszona jest przez marynarkę wojenną. Producenci są również świadomi, że jeszcze przez wiele lat tradycyjne metody wytwarzania części zamiennych nadal będą dominować na rynku.

Dotychczasowe doświadczenia pozwalają zidentyfikować następujące korzyści w wykorzystaniu drukarek 3D w marynarce wojennej:

1. Oszczędność pieniędzy i czasu przy tworzeniu i wprowadzaniu zmian konstrukcyjnych jednostek pływających (technologię tę wykorzystano przy projektowaniu planowanych zmian w wyposażeniu i konstrukcji lotniskowców klasy *Gerald*

   R. Ford). Wykorzystanie drukarek 3D w procesie projektowania urządzeń, części prototypowych może skrócić czas ich tworzenia z kilkunastu miesięcy nawet do kilku dni (Johnson, 2018).
2. Innowacyjne wykorzystanie technologii 3D pozwala na modyfikowanie i rozwój dotychczas stosowanych, a w przypadku niektórych części poprawę ich jakości (np. udoskonalone elementy hydrauliczne wlotu kolektora dla samolotu *V-22 Osprey*, są o 70% lżejsze i poprawiają przepływ płynów oraz cechują je mniejsze wycieki);
3. W Centrum *Walter Reed National Military Medical Center* drukowane są dedykowane implanty m.in. kości czaszki, kości kończyn czy zębów oraz wydruki specjalistycznych narzędzi chirurgicznych niezbędnych do przeprowadzenia skomplikowanych operacji. Wydrukowane implanty wykorzystywane są zarówno do wszczepiania ich pacjentom jak również jako pomoc podczas przygotowania się zespołu chirurgów do skomplikowanych zabiegów chirurgicznych;
4. Technologia szybkiego prototypowania umożliwia wydruk części, których nie można pozyskać od producenta, ze względu na zaniechanie ich produkcji, tym samym umożliwiają efektywną eksploatację urządzeń i sprzętu okrętowego przez cały okres pozostawania okrętu w linii. *Naval Undersea Warfare Center-Keyport* wykorzystuje technologie wydruku 3D do wydruku części, które trudno pozyskać lub których produkcji zaniechano. Przykładem są części dla serwerów *J-6000 Tactical Support System* znajdujących się na wyposażeniu starszych klas atomowych okrętach podwodnych;

5. Poprawa gotowości bojowej floty poprzez stworzenie możliwości druku uszkodzonych części na pokładzie okrętów(przykładem jest *USS Essex)*. Na okręcie tym zainstalowano specjalistyczne drukarki 3D, które pozwalają na druk kilkunastu części, które najczęściej ulegają uszkodzeniu oraz narzędzi i pomocy szkoleniowych (Cullom, 2014).

LITERATURA

Alexandrea, P. (2017). *U.S. Navy uses 3D printing to create submarine hull*. https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-submarine260720174/ (18.08.2018).

CADXPERT. (2018). http://www.cadxpert.com.pl/zastosowania-druku-3d-cadxpert.htm (11.08.2018).

Cullom P. (2014). *5 Things to Know About Navy 3D Printing*. http://www.doncio.navy.mil/chips/ArticleDetails. aspx?ID =5302 (12.07.2018).

DeVisser, K.K. (2017). *Qualification and certification of 3d printed parts for naval ships*. California: Naval Postgradu-ate School Monterey.

Johnson R.C. (2018). *3D Printing for the U.S. Navy*. https://cacm.acm.org/news/228700-3d-printing-for-the-u-s-navy/fulltext (17.08.2018).

Katoch, P.C. (2018). *The 3D Revolution*. http://www.spslandforces.com/experts-speak/?id=324&h=The-3D-Revolution (12.08.2018).

Lai, E. (2018). *U.S. Navy will rely on 1,000 3D printed parts by end of 2018.* https://3dprintingindustry.com/news/u-s-navy-will-rely-1000-3d-printed-parts-end-2018-131910/ (11.08.2018).

Leopold, G. (2016). *How 3D printing can aid the military supply chain.* https://defensesystems.com/articles/2016/06/07/navy-3d-printing-supply-chain.aspx (17.08.2018).

Mendoza H.R. (2016). *UN Secretary-General Ban Ki-Moon Lists 3D Printing Among Potential Global Threats* https://3dprint.com/147046/ban-ki-moon-3d-printing-threat/ (12.08.2018).

Miley, J. (2017). *The US Navy 3D Printed This Concept Submersible In Less Than Four Weeks* https://interestingengineering.com/us-navy-3d-printed-concept-submersible-four-weeks(12.08.2018).

Polskie drukarki 3D firmy Zortrax wykorzystywane przez Wojskowe Zakłady Lotnicze. http://cadportal.pl/polskie-drukarki-3d-firmy-zortax-wykorzystywane-przez-wojskowe-zaklady-lotnicze/ (12.08.2018).

Putnam D., Shipboard Additive Manufacturing (AM)/3D Printing, Navy SBIR 2016.1-Topic N161038

Sebastian Pop. (2014). *U.S. Army Uses 3D Printed Landmines for Training – Pictures*. https://news.softpedia.com/news/U-S-Army-Uses-3D-Printed-Landmines-for-Training-453339.shtml (11.08.2018).

Ślusarczyk, P. (2017). *Historia druku 3D – część 1: jak stary jest druk 3D, kto naprawdę jest jego twórcą oraz kto wymyślił jego nazwę?* http://centrumdruku3d.pl/historia-druku-3d/(14.08.2018).

Ślusarczyk, P. (2017). *Historia druku 3D - część 2: początki branży druku 3D na świecie, czyli jak Stratasys sprzedawał drukarki 3D do metalu, a EOS produkował drukarki 3D do żywic*. http://centrumdru- ku3d.pl/ historia-druku-3d-czesc-2/(14.08.2018).

Templeton, G. (2013).*US Navy looks to 3D printing to turn its city-sized aircraft carriers into mobile factories.* http://www.extremetech.com/extreme/156773-us-navy-looks-to-3d-printing-to-turnits-city-sized-aircraft-carriers-into-mobile-factories (14.08.2018).