

Druk 3D jako technologia przyszłości – część 1

3D printing as a technology of the future – part 1

Chrystian Fiał*, Marcin Pieknik

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Przemysłu Skórzanego

Streszczenie

Technologia druku 3D w ostatnich latach przeżywa rozwój i cieszy się sporym zainteresowaniem, zarówno u użytkowników „domowych” jak i u producentów wieloseryjnych i projektantów. W poniższym artykule omówiono technologie druku 3D oraz materiały z których możliwe jest drukowanie za pomocą tej technologii. W pierwszej części przedstawiono w sumie siedem różnych metod otrzymywania wydruków 3D, od najprostszyc i najbardziej popularnych do tych bardziej wyszukanych, charakteryzujących się większą dokładnością i szeroką gamą materiałów, z których można korzystać. W drugiej części artykułu po krótko opisano szereg materiałów, które można wykorzystywać do technologii druku 3D – m.in.: kompozyty, metale czy ceramikę.

Abstract

The 3D printing technology has been rapid developing in recent years and enjoys considerable interest, both among "home" users, as well as multi-series producers and designers. The following article discusses 3D printing technologies and materials from which it is possible to print using this technology. The first part presents a total of seven different methods of obtaining 3D prints, from the simplest and most popular to the more sophisticated, with greater accuracy and a wide range of materials that can be used. The second part of the article briefly describes a number of materials that can be used for 3D printing technology - including composites, metals and ceramics.

Słowa kluczowe: druk 3D, wytwarzanie przyrostowe, drukarka 3D, materiały, filament, technologia

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, 3D printer, materials, filament, technology

1. Wprowadzenie

Na przestrzeni ostatnich lat doszło do sporego rozwoju technologii druku 3D i w ostatnich latach zaczęła być postrzegana jako elastyczna i potężna technika, która może mieć zastosowanie zarówno w zaawansowanym przemyśle wytwórczym, jak i do użytku domowego [1-4]. Pierwsze komercyjne wykorzystanie druku 3D miało miejsce w 1980 roku [5].

* autor korespondencyjny: dr inż. Chrystian Fiał: chrystian.fial@ips.lukasiewicz.gov.pl

Technologia druku 3D znana również jako wytwarzanie przyrostowe polega na produkcji danego obiektu lub jego elementu poprzez dodawanie materiału warstwa po warstwie i tworzenie konstrukcji trójwymiarowej (3D). Konieczne jest wcześniejsze utworzenie i zaprojektowanie za pomocą oprogramowania CAD (*Computer Aided Design*) odpowiedniego modelu wydruku [6]. Dzięki możliwości stosunkowo łatwego wprowadzania zmian w samym modelu produktu, konsumenci mogą mieć większy wpływ na produkt końcowy i wydrukowanie go zgodnie z ich specyfikacją. Technologia druku 3D rozwija się w bardzo szybkim tempie, opracowywane są nowe metody i możliwe jest stosowanie coraz to nowych materiałów, z których otrzymywane są wydruki. Dlatego są podstawy do postawienia tezy, że technologia ta może w przyszłości być wiodącą technologią wykorzystywaną w przemyśle.

2. Technologie druku 3D

Zgodnie z informacjami zamieszczonym w normie ASTM F2792 [8], opracowano różne technologie druku 3D. ASTM podzieliło je na siedem grup:

1. natryskiwanie wiążące – *Binder Jetting* (BJ);
2. ukierunkowane osadzanie energii – *Directed Energy Deposition* (DED);
3. wytłaczanie materiału – *Materials Extrusion* (ME);
4. nastrykiwanie materiału – *Materials Jetting* (MJ);
5. spajanie w złożu proszkowym – *Powder Bed Fusion* (PBF);
6. laminowanie arkuszy – *Sheet Lamination* (SL);
7. fotopolimeryzacja kadzi – *Vat Photopolymerization* (VP).

Nie ma jasnego określenia, która z powyższych metod jest najlepsza, ponieważ każda z nich posiada swoje konkretne zastosowanie i zalety. Obecnie wykorzystanie technologii druku 3D nie ogranicza się wyłącznie do prototypowania, ale coraz częściej służy ona do wytwarzania konkretnych produktów [9]. Poniżej pokrótce zostaną opisane najpopularniejsze metody.

2.1. Binder Jetting

W technologii Binder Jetting wykorzystuje się chemiczne spoiwo strumieniowo wprowadzane na rozsypany proszek w celu utworzenia warstwy [7]. Ciekły środek wiążący jest selektywnie osadzany w celu połączenia cząstek proszku, dzięki czemu technologia ta umożliwia szybkie drukowanie 3D i prototypowanie. Stosując tę technikę możliwe jest otrzymywanie wzorców do odlewania, wytwarzanie wstępnych wyrobów spiekanych lub wyrobów o dużej objętości z piasku. Dzięki tej technologii można drukować różnego rodzaju materiały: metale, polimery, ceramikę, czy materiały hybrydowe wykorzystując do tego piasek. Proces ten jest stosunkowo prosty, szybki i tani oraz możliwe jest drukowanie stosunkowo dużych wyrobów.

2.2. Directed Energy Deposition

Metoda ta jest bardziej złożonym procesem drukowania. Jest ona powszechnie stosowana do naprawy obiektu lub do dodania dodatkowego materiału do istniejących elementów [6]. Stosowanie tej technologii, zapewnia wysoki stopień kontroli struktury ziarna i pozwala na osiągnięcie wysokiej jakości wyrobu. Technologia DED jest podobna do technologii wytłaczania materiału (*Material Extrusion*), lecz dysza w tej metodzie nie jest ograniczona w poruszaniu się do określonej osi i jej ruch może odbywać się w wielu kierunkach. Ponadto w metodzie tej można wykorzystywać materiały ceramiczne, ale najczęściej stosuje się ją w przypadku metali pod postacią drutu lub proszku. Jako przykłady tej technologii można wymienić osadzanie laserowe (*Laser Deposition*) oraz laserowe kształtowanie siatki (LENS – *Laser Engineered Net Shaping*) [6]. Pierwsza z nich, może być wykorzystywana do produkcji lub naprawy części o różnych rozmiarach od milimetrów do metrów.

Z kolei LENS zyskuje na popularności przy produkcji oprzyrządowania, w transporcie, w przemyśle lotniczym i kosmicznym oraz w sektorach gazowym i paliwowym, ponieważ może zapewnić skalowalność i różnorodne możliwości w jednym systemie [10].

2.3. Materials Extrusion

Technologię druku 3D opartą na wytłaczaniu materiałów można stosować do drukowania wielu materiałów i wielokolorowego drukowania tworzyw sztucznych, żywności, a nawet żywych komórek [12]. Technologia ta jest szeroko stosowana, głównie ze względu na jej niskie koszty oraz możliwość zbudowania w pełni funkcjonalnych części produktu [6]. Pierwszym systemem wytłaczania materiału, który opracowano na początku 1990 roku, było osadzanie topionego materiału (FDM – *Fused Deposition Modelling*), gdzie jako główny materiał wykorzystywany jest polimer [13]. W technologii tej części budują się warstwa po warstwie od dołu do góry poprzez ogrzewanie i wytłaczanie włókna termoplastycznego. W niektórych przypadkach stosuje się dodatkowy materiał, który może posłużyć do druku podpór.

2.4. Materials Jetting

W metodzie MJ, zgodnie z normami ASTM, proces drukowania i budowy elementu odbywa się poprzez selektywne osadzanie materiału budulcowego kropla po kropli. Podczas natryskiwania materiału głowica drukująca dozuje kropelki światłoczułego materiału, który zestala się, tworząc część warstwa po warstwie pod wpływem światła ultrafioletowego (UV) [14]. Natryskiwanie materiału tworzy części o bardzo gładkiej powierzchni i dużej dokładności wymiarowej. Korzystając z technologii natryskiwania materiałów, można korzystać z szerokiej gamy materiałów, takich jak m. in. polimery, ceramika, kompozyty.

2.5. Powder Bed Fusion

Spajanie w złożu proszkowym obejmuje różne techniki, mające różne źródła ciepła: wiązka elektronów – EBM (*Electron Beam Melting*), spiekanie laserowe – SLS (*Selective Laser Sintering*) oraz spiekanie cieplne SHS (*Selective Heat Sintering*). Różne źródła ciepła są wykorzystywane do topienia lub stapiania proszku materiału ze sobą. Wśród materiałów wykorzystywanych w tym procesie są metale, ceramika, polimery, kompozyty i hybrydy. Metodę SLS opracował Carl Deckard w 1987 roku i jest ona najbardziej popularnym przykładem proszkowej technologii druku 3D. Technologia ta jest szybka, ma wysoką dokładność i możliwe jest osiągnięcie zróżnicowanego wykończenia powierzchni [15]. Za pomocą tej technologii można otrzymywać przedmioty metalowe, plastikowe oraz ceramiczne [16]. Z kolei technika SHS wykorzystuje do drukowania głowicę termiczną, do topienia proszku termoplastycznego w celu uzyskania obiektu 3D. Natomiast topienie wiązką elektronów (EBM) powoduje szybsze podgrzewania materiału – proces zajmuje mniej czasu.

2.6. Sheet Lamination

Laminowanie arkuszy to proces drukowania 3D, w którym arkusze materiałów są ze sobą łączone w celu wytworzenia części przedmiotu [14]. Przykładami technologii druku 3D wykorzystującej ten proces są wytwarzanie obiektów laminowanych (LOM) i ultradźwiękowe wytwarzanie addytywne (UAM) [6]. Laminowanie arkuszy pozwala na wykonywanie pełnokolorowych wydruków, jest stosunkowo niedrogi, proste w obróbce, a pozostały materiał można bez problemu poddać recyklingowi. Dzięki zastosowaniu technologii LOM możliwe jest wytwarzanie skomplikowanych części geometrycznych przy niższych kosztach produkcji i krótszym zużyciu sprzętu [17]. Ultradźwiękowe wytwarzanie addytywne (UAM) to innowacyjna technologia procesowa, która wykorzystuje ultradźwięki do łączenia warstw metalu.

2.7. Vat Photopolymerization

Często używaną techniką druku 3D jest fotopolimeryzacja, która ogólnie odnosi się do utwardzania fotoreaktywnych polimerów za pomocą światła, lasera lub ultrafioletu (UV) [23]. Jako przykłady technologii druku z wykorzystaniem fotopolimeryzacji można przytoczyć metody SLA (Stereolithography) oraz DLP (*Digital Light Process*). Główna różnica pomiędzy tymi technikami wynika ze zróżnicowania źródła światła. DLP może wykorzystywać bardziej konwencjonalne źródło światła, takie, jak lampa łukowa z panelem ciekłokrystalicznym, który jest nakładany na całą powierzchnię kadzi żywicy fotopolimerowej w jednym przejściu czyniąc ją szybszą od stereolitografii [19]. Istotnymi parametrami technologii VP są czas naświetlania, długość fali i moc zasilacza. Stosowane materiały są początkowo płynne i stają się twarde pod wpływem światła ultrafioletowego. Fotopolimeryzacja jest odpowiednia, gdy zależy nam na otrzymaniu produktu o bardzo wysokiej jakości - zarówno powierzchni, jak i z zachowaniem wszystkich detali.

3. Materiały stosowane do druku 3D w przemyśle

Jak w przypadku każdego procesu produkcyjnego, również przy technologii druku 3D, wymagane są wysokiej jakości materiały, które pozwolą otrzymać części wysokiej jakości. Aby to zapewnić, spełniony musi być szereg procedur, wymagań i zapewnień o kontroli materiałów, które powinny być omówione pomiędzy dostawcami, nabywcami oraz użytkownikami końcowego wyrobu.

Technologia druku 3D jest w stanie wyprodukować w pełni funkcjonalne części wykorzystując przy tym szeroki wachlarz materiałów: metale, ceramikę, polimery, kompozyty, materiały hybrydowe, czy materiały klasyfikowane jako tworzywa gradientowe [6].

3.1. Metale

Technologia druku 3D wykorzystująca różnego rodzaju metale jest popularna ze względu na swoje zalety w wielu gałęziach przemysłu, takich jak: przemysł lotniczy, kosmiczny, samochodowy, czy medyczny [20]. W zależności od docelowych właściwości wyrobu, można dobierać odpowiednie metale i uzyskiwać materiały o doskonałych właściwościach fizycznych, dzięki czemu technologia druku 3D może być używana do produkcji wielu skomplikowanych wyrobów, począwszy od ludzkich organów po części lotnicze. Wśród tego typu materiałów mogą być stopy aluminium, stopy na bazie kobaltu, stopy na bazie niklu, stopy tytanu oraz stale nierdzewne [21-26]. Stopy na bazie kobaltu, dzięki swoim właściwościom (duża sztywność właściwa, sprężystość, wydłużenie) są odpowiednie do druku 3D wyrobów dentystycznych [22]. Korzystając z technologii druku 3D możliwe jest wytwarzanie części dla przemysłu lotniczego przy zastosowaniu stopów na bazie niklu [23]. Stopy te posiadają bardzo dobrą odporność na działanie korozji oraz są odporne na działanie wysokiej temperatury dochodzącej do 1200°C [20]. Natomiast stopy tytanu, mogące pracować przy wysokich naprężeniach i w wysokich temperaturach pracy, wykorzystywane są między innymi w komponentach w przemyśle lotniczym [25] oraz przemyśle biomedycznym [26].

3.2. Ceramika

Obecnie technologia druku 3D poprzez optymalizację jej parametrów, umożliwia wytwarzanie obiektów z ceramiki oraz betonu, które charakteryzują się brakiem porów i pęknięć oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi [30]. Materiały ceramiczne jako grupa materiałów – która obejmuje szeroki ich wachlarz – cechuje się wysoką odpornością na działanie wysokich temperatur i czynników chemicznych oraz dodatkowo charakteryzuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi.

Ze względu na swój płynny stan (masa lejna) przed związaniem, może być stosowana do uzyskania praktycznie dowolnej geometrii i kształtu, co sprawia, że można ją stosować do tworzenia przyszłych konstrukcji i budowli [30].

W pracy [31] stwierdzono, że materiały ceramiczne znajdują miejsce również w zastosowaniach dentystycznych i lotniczych. Jako przykłady takich materiałów można podać: tlenek glinu, szkło bioaktywne czy tlenek cyrkonu [31-34]. Tlenek glinu jest świetnym tlenkiem ceramicznym o bardzo szerokim zakresie zastosowań, w tym jako katalizator, absorbent i znajduje zastosowanie w mikroelektronice, przemyśle lotniczym oraz przy innych zaawansowanych technologiach [35]. Dzięki zastosowaniu technologii druku 3D można drukować części z tlenku glinu o skomplikowanych kształtach, które po spiekaniu mają wysoką gęstość [32]. Posiadają one wyjątkowo korzystne właściwości do tego typu zastosowań: są ciągliwe, odporne na korozję i utlenianie oraz posiadają niską porowatość. W jednym z eksperymentów, za pomocą techniki stereolitografii, połączono tworzywo szklano-ceramiczne ze szkłem bioaktywnym w całość znacznie poprawiając jej wytrzymałość na zginanie. Otwiera to nowe możliwości użycia bioaktywnego szkła w zastosowaniach klinicznych jako kości, czy różnego rodzaju szkieletów lub implantów.

Z kolei tlenek cyrkonu jest głównym materiałem konstrukcyjnym w energetyce jądrowej, stosowanym przy produkcji zewnętrznej powłoki cylindrycznych prętów paliwowych. Wolny od hafnu cyrkon jest odpowiedni do tego zastosowania, ponieważ ma niską podatność na promieniowanie, a także niską absorpcję neutronów termicznych [34].

3.3. Polimery

Bardzo popularnym materiałem stosowanym w technologii druku 3D są polimery. Dzięki nim możliwe jest tworzenie komponentów o trudnej geometrii, począwszy od prototypów po ostateczne części [27].

Za pomocą techniki FDM, można tworzyć wydruk 3D poprzez osadzanie kolejnych warstw poprzez wytłaczanie włókna termoplastycznego, takiego, jak polilaktyd (PLA), poli(akrylonitryl-butadien-styren) (ABS), polipropylen (PP) lub polietylen (PE) [27]. Ostatnio do druku 3D zaczęto również stosować filamenty termoplastyczne o wyższych temperaturach topnienia: polieteroeteroketon (PEEK) i polimetakrylan metylu (PMMA) [28]. Polimery w stanie ciekłym lub o niskiej temperaturze topnienia są szeroko stosowane ze względu na niski ich koszt, niską wagę oraz elastyczność przetwarzania [29]. Przeważnie polimery były wykorzystywane w biomateriałach, do produkcji urządzeń medycznych, często jako materiały obojętne, które przyczyniały się do wydajnego ich działania oraz jako części zapewniające wsparcie mechaniczne w wielu implantach ortopedycznych [22].

3.4. Kompozyty

Materiały kompozytowe, czyli materiały utworzone z co najmniej dwóch materiałów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że posiadają właściwości lepsze od każdego składnika osobno, a także lepsze od wynikających z prostego sumowania tych właściwości, szybko zyskały popularność, szczególnie w sektorach przemysłu wysokiej efektywności. Przykładami takich materiałów są kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami węglowymi, czy kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami szklanymi [36, 37]. Pierwsze z nich są szeroko stosowane w przemyśle lotniczym, ze względu na ich wysoką wytrzymałość, dobrą odporność na korozję i dobre właściwości zmęczeniowe [36]. Drugie natomiast często są stosowane w druku 3D [37] ze względu na wysoką wydajność i opłacalność produkcji z nich elementów [38]. Włókno szklane jako materiał charakteryzuje się wysoką przewodnością cieplną i niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Ponadto włókno szklane nie jest palne i nie mają na nie wpływu temperatury utwardzania stosowane w procesach produkcyjnych, dlatego jest bardzo odpowiednie do zastosowania w technologii druku 3D [38].

3.5. Materiały inteligentne

Jako materiały inteligentne określa się materiały, które mogą zmieniać swoją geometrię i kształt pod wpływem warunków zewnętrznych – temperatury, czy wody [39]. Przykładami obiektów drukowanych w 3D wytwarzanych przy użyciu inteligentnych materiałów są samoewoluujące konstrukcje oraz systemy miękkiej robotyki. Materiały inteligentne można również sklasyfikować jako materiały do druku 4D. Przykładami inteligentnych materiałów grupowych są stopy z pamięcią kształtu [40] i polimery z pamięcią kształtu [41]. Niektóre ze stopów z pamięcią kształtu, jak nikiel-tytan [40] mogą znaleźć zastosowanie w urządzeniach mikroelektromechanicznych [30]. W produkcji wyrobów drukowanych 3D z wykorzystaniem niklu oraz tytanu istotną kwestią są temperatury przemiany, powtarzalność mikrostruktury i gęstości. Z kolei polimery z pamięcią kształtu są to materiały funkcjonalne, który reaguje na szereg różnych czynników takich, jak światło, temperaturę wywołaną przykładowo energią elektryczną, czy niektóre rodzaje chemikaliów i tym podobne. [41]. Korzystając z tego typu polimerów w technologii druku 3D możliwa jest łatwa i wygodna produkcja części o skomplikowanych kształtach. Końcowej oceny jakości takiej części dokonuje się na podstawie dokładności wymiarowej, chropowatości powierzchni oraz gęstości [41].

3.6. Specjalne materiały

Ciekawą, a zarazem oryginalną grupą materiałów, które można również stosować do druku 3D są tzw. materiały specjalne. Wśród nich wymienić można:

- żywność – korzystając z m.in. takich produktów spożywczych jak czekolada, mięso, cukierki, pizza, czy makaron spaghetti oraz różnego rodzaju sosy, za pomocą technologii druku 3D można przetwarzać i wytwarzać pożądaną ich kształt i geometrię [42].

Drukując żywność 3D możliwe jest wytworzenie jej „zdrowej” odmiany, ponieważ proces ten umożliwia klientom dostosowanie składników bez jednoczesnego zubożenia wartości odżywczych w pożywieniu, nie powodując zarazem pogorszenia ich smaku [43].

- pył księżycowy – zaskakującym materiałem może wydawać się pył księżycowy. Prowadzone są badania, które polegają na wykorzystaniu pyłu księżycowego do wielowarstwowego druku 3D części, które mogą w przyszłości pomóc w potencjalnej kolonizacji Księżyca [44].
- tkaniny – wraz z rozwojem druku 3Dtextile, planowany jest wzrost przychodów w branży jubilerskiej jak i odzieżowej. Zaletą tej technologii jest krótki czas przetwarzania produktu, obniżenie kosztów związanych z pakowaniem oraz redukcja kosztów związanych z łańcuchem dostaw [7].

4. Podsumowanie

W artykule dokonano przeglądu metod i materiałów stosowanych w technologii druku 3D. Swoboda projektowania, masowe dostosowywanie i możliwość drukowania złożonych konstrukcji przy minimalnej ilości odpadów to główne zalety druku 3D. Pod względem metod, osadzanie topionego materiału (FDM) jest jedną z najpopularniejszych technologii druku 3D ze względu na niski koszt, prostotę i dużą prędkość przetwarzania.

Pierwotnie, materiałem do druku w tej metodzie były włókna polimerowe, jednak z czasem dostosowano do tej techniki wiele innych materiałów. Do druku 3D można wykorzystywać materiały w postaci filamentów, drutu, proszku, pasty, arkuszy czy atramentów. Polimery, takie jak ABS, PLA i PA, są uważane za najpopularniejsze materiały opracowane do szybkiego prototypowania.

Technologia druku 3D przeżywa rozkwit w ostatnich latach. Oferuje coraz więcej technik wytwarzania elementów, które stają się coraz bardziej precyzyjne i mogą drukować coraz to lepsze wyroby. Również wybór materiałów, z których możliwy jest druk 3D staje się coraz szerszy.

Nic nie stoi na przeszkodzie, aby technologia druku 3D w najbliższym czasie stała się dominująca w tych gałęziach przemysłu, w których już stała się popularna i chętnie wykorzystywana.

Literatura

- [1] Gibson I., Rosen D. W., Stucker B.: *Additive manufacturing technologies, rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Springer, Boston 2010.
- [2] Chua C. K., Leong K. F.: *3D Printing and additive manufacturing, principles and applications*, World Scientific, Singapur 2016.
- [3] Bandyopadhyay A., Bose S.: *Additive manufacturing* - 2th edition, CRC Press, Floryda 2019.
- [4] Zhang J., Jung Y-G.: *Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications* - 1st edition, Butterworth-Heinemann, Oksford 2018.
- [5] Holzmann P., Robert J., Breitenecker A., Soomro A., Erich J. S.: *User entrepreneur business models in 3D printing*, Journal of Manufacturing Technology Management **28** (1), 2017, str. 75-94.
- [6] Syed A. M. T., Elias P. K., Amit B., Susmita B., Lisa O., Charitidis C.: *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*, Materials Today **1**, 2017, str. 1-16.
- [7] Ze-Xian L., Yen T. C., Ray M. R., Mattia D., Metcalfe I. S., Patterson D. A.: *Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques*, Journal of Membrane Science **523** (1), 2016, str. 596-613.
- [8] ASTM F2792-12a: *Standard terminology for additive manufacturing technologies*.
- [9] Yuanbin W., Blache W., Xun X.: *Selection of additive manufacturing processes*, Rapid Prototyping Journal **23** (2), 2017, str. 434-447.
- [10] <https://www.thefabricator.com> – dostęp dnia 08. 08. 2020.
- [11] Ugur M. D., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M.: *The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0*, Procedia Manufacturing **11**, 2017, str. 545-554.
- [12] <https://www.ey.com> – dostęp dnia 08. 08. 2020.
- [13] Stansbury J. W., Idacavage M. J.: *3D Printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*, Dental Materials **32**, 2016 str. 54-64.
- [14] <http://canadamakes.ca/what-is-material-jetting/> – dostęp dnia 08. 08. 2020.
- [15] Tiwari S. K., Pande S., Agrawal S., Bobade S. M.: *Selection of selective laser sintering materials for different applications*, Rapid Prototyping Journal **21** (6), 2015, str. 630-648.
- [16] Ventola C. L.: *Medical application for 3D printing: current and projected uses*, Medical Devices **39** (10), 2014, str. 1-8.

- [17] Vikayavenkataraman S., Jerry Y. H. F., Wen F. L.: *3D printing and 3D bioprinting in pediatrics*, Bioengineering **4** (63), 2017, str. 1-11.
- [18] Low Z., Chua Y. T., Ray B. M., Mattia D., Metcalfe I. S., Patterson D. A.: *Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques*, Journal of Membrane Science **523** (1), 2017, str. 596-613.
- [19] <https://www.think3d.in> – dostęp dnia 08. 08. 2020.
- [20] Horst D. J., Duvoisin C. A., Viera R. A.: *Additive manufacturing at Industry 4.0: a review*, International Journal of Engineering and Technical Research **8** (8), 2018, str. 1-8.
- [21] Martin J. H., Yahata B. D., Hundley J. M., Mayer J. A., Schaedler T. A., Pollock T. M.: *3D Printing of high-strength aluminium alloys*, Nature **549** (7672), 2017, str. 356-369.
- [22] Hitzler L., Alifui-Segbaya F., William P., Heine B., Heitzmann M., Hall W., Merkel M., Ochner A.: *Additive manufacturing of cobalt based dental alloys: analysis of microstructure and physicochemical properties*, Advances in Materials Science and Engineering **8**, 2018, str. 1-12.
- [23] Murr L. E.: *Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication*, Journal of Materials Sciences and Technology **3** (10), 2016, str. 987-995.
- [24] DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Beese A. M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W.: *Additive manufacturing of metallic components -process, structure and properties*, Progress in Materials Science **92**, 2018, str. 112-224.
- [25] Uhlmann E., Kersting R., Klein T. B., Cruz M. F., Borille A. V.: *Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components*, Procedia CIRP **35**, 2015, str. 55-60.
- [26] Trevisan F., Calignano F., Aversa A., Marchese G., Lombardi M., Biamino S., Ugues D., Manfredi D.: *Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications*, Journals Indexing and Metrics **16** (2), 2018, str. 57-67.
- [27] Caminero M. A., Chacon J. M., Garcia-Moreno I., Rodriguez G. P.: *Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling*, Composite Part B: Engineering **148**, 2018, str. 93-103.
- [28] Dizon J. R. C., Jr A. H. E., Chen Q., Advincula R. C.: *Mechanical characterization of 3d-printed polymers*, Additive Manufacturing **20**, 2018, str. 44-67.
- [29] Xin W., Man J., Zuowan Z., Jihua G., David H.: *3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective*, Composites Part B **110**, 2017, str. 442-458.
- [30] Baldassarre F., Ricciardi F.: *The additive manufacturing in the Industry 4.0 era: the case of an italian FabLab*, Journal of Emerging Trends in Marketing and Management **1** (1), 2017, str. 1-11.

- [31] Owen D., Hickey J., Cusson A., O. Ayeni I., Rhoades J., Yifan D., Limmin W., Hye -Yeong, Nishant P. H., Raikar P., Yeon-Gil P., Jing Z.: *3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer*, Progress in Additive Manufacturing **1**, 2018, str. 1-7.
- [32] Zocca A., Lima P., Günster J.: *LSD-based 3D printing of alumina ceramics*, Journal of Ceramic Science and Technology **8** (1), 2017, str. 141-148.
- [33] Gmeiner R., Deisinger U., Schonherr J., Lenchner B.: *Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics*, Journal of Ceramics Science and Technology **6** (2), 2015, str. 75-86.
- [34] Lanko T., Panov S., Sushchyns'ky O., Pylypenko M., Dmytrenko O.: *Zirconium alloy powders for manufacture of 3D printed particles used in nuclear power industry*, Problems of Atomic Science and Technology **1** (113), 2018, str. 148-153.
- [35] Xueyuan T., Yuxi Y.: *Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio*, Ceramics International **41** (8), 2017, str. 9232-9238.
- [36] Hao W., Liu Y., Zhou, Chen H. H., Fang D.: *Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composite*, Polymer Testing **65**, 2018, str. 29-34.
- [37] Sathishkumar T. P., Satheeshkumar S., Naveen J.: *Glass fiber-reinforced polymer composites – a review*, Journal of Reinforced Plastics and Composites **33** (13), 2014, str. 1-14.
- [38] Liu Z., Zhang L., Yu E., Ying Z., Zhang Y., Liu X., Eli W.: *Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites challenges and opportunities: from organic chemistry perspective*, Current Organic Chemistry **19** (11), 2015, str. 991-1010.
- [39] Jian-Yuan L., Jia A., Chee K. C.: *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*, Applied materials today **7**, 2017, str. 120-133.
- [40] Van H. J.: *Additive manufacturing of shape memory alloy*, Shape Memory and Superelasticity **4** (2), 2018, str. 309-312.
- [41] Yang Y., Chen, Y. Wei Y., Li Y.: *3D Printing of shape memory polymer for functional part fabrication*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology **84** (9), 2015, str. 2079-2095.
- [42] Lili L., Yuanyuan M., Ke C., Yang Z.: *3D printing complex egg white protein objects: properties and optimization*, Food and Bioprocess Technology **1**, 2018, str. 1-11.
- [43] Singh P., Raghav A.: *3D food printing: a revolution in food technology*, Acta Scientific Nutritional Health **2** (2), 2018, str. 1-2.
- [44] Goulas A., Friel R. J.: *3D printing with moondust*, Rapid Prototyping Journal **22** (6), 2016, str. 864-870.