

Farma drukarek 3D – założenia funkcjonalne i techniczne oraz wykorzystanie w dydaktyce

The 3D Printer Farm – function and technology requirements and didactic use

PIOTR SKAWIŃSKI
PRZEMYSŁAW SIEMIŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.117>

Opisano laboratorium wydruków 3D uruchomione na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Przedstawiono jego założenia funkcjonalne i techniczne oraz obecne i przyszłe wykorzystanie w procesie kształcenia studentów. Omówiono także kilka podobnych rozwiązań integracji drukarek 3D budowanych i testowanych na świecie.

SŁOWA KLUCZOWE: laboratorium druku 3D, FDM, FFF, techniki przyrostowe, integracja

Described in the article is a 3D print lab, as launched at the Warsaw University of Technology, at the Faculty of Automotive and Machinery Engineering. Presented are its functional and technical requirements and the current and future use for students' education. Also, several similar arrangements of the worldwide installed and tested 3D printers are described.

KEYWORDS: 3D print lab, FDM, FFF, additive manufacturing, integration

W dniu 12 maja 2017 r. na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej (dalej: SiMR PW) uroczyście otwarto rozbudowane laboratorium 3D, zwane potocznie farmą drukarek 3D. Ta nazwa oznacza zgromadzenie w jednym miejscu i zintegrowanie ze sobą znacznej liczby maszyn stosujących technologię przyrostową.

Pomysł na farmę drukarek 3D zaczerpnięto z Politechniki Śląskiej w Gliwicach, która rok temu otworzyła takie laboratorium w zabytkowym budynku, w którym mieściło się Laboratorium Obróbki Skrawaniem [1]. Wtedy maszyny prototypujące w technologii FFF [2] dostarczyła firma 3DGence [1].

Historia druku 3D na Wydziale SiMR PW

Nowo otwarta farma drukarek 3D była pomyślana jako element rozbudowy Laboratorium 3D, działającego od ok. 2008 r. W tamtym czasie w ramach grantu KBN zakupiono profesjonalną drukarkę 3D firmy Stratasy – model Dimension 1200BST (stosujący metodę FDM [2]) oraz optyczny skaner 3D firmy Smarttech, model ScanBright wraz z oprogramowaniem. Laboratorium 3D było i jest wykorzystywane w kształceniu studentów, zwłaszcza na specjalności „Wspomaganie Komputerowe Prac Inżynierskich” na kierunku „Mechanika i Budowa Maszyn”. Każdy ze studentów tego kierunku (w ramach zaliczenia przedmiotu „Integracja Projektowania i Wytwarzania Wspomagane Komputerowo”) musiał wykonać projekt części lub mechanizmu, który następnie był wytwarzany za pomocą druku 3D metodą FDM. Ograniczeniem było zużycie maksymalnie kilkunastu cm³ materiału modelowego i podporowego, co studenci sprawdzali w oprogramowaniu 3D CAM. Tak powstało wiele interesujących obiektów.

* Dr hab. inż. Piotr Skawiński, prof. PW (psk@simr.pw.edu.pl), dr inż. Przemysław Siemiński (psieminski@simr.pw.edu.pl) – Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej

Wspomniana maszyna prototypująca była wykorzystywana na potrzeby wielu prac dyplomowych, a niektóre wyniki opisywane w tych pracach doczekały się publikacji w artykułach naukowych, m.in. w [3–5].

Łatwo dostępne w Polsce publikacje stały się impulsem do rozpoczęcia szerszej współpracy z kilkoma lekarzami z Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. W związku z tym w 2014 r. laboratorium 3D zaopatrzone w dwie drukarki 3D: Prime 3D firmy Monkeyfab oraz Builder Dual Feed. Obie maszyny mają otwarte sterowanie i korzystają z oprogramowania 3D CAM, które ma niekomercyjne wersje. Dzięki temu można było zwiększyć liczbę prac studenckich i zakres prac badawczych, a także ograniczyć koszty materiałowe oraz rozpocząć testowanie zmodyfikowanego kodu sterującego i nowych materiałów modelowych, np. polimeru PCL. W tym czasie powstało też kilkanaście modeli fizycznych kości dla dwóch szpitali. Modele zostały wykonane na potrzeby konkretnych operacji chirurgicznych i służyły lekarzom do planowania przedoperacyjnego. Część tych prac opisano w publikacjach naukowych, m.in. w [6, 7].

W połowie 2016 r. prof. Stanisław Radkowski, dziekan Wydziału SiMR PW, podjął decyzję o rozbudowie laboratorium 3D do postaci farmy drukarek 3D oraz włączeniu jej w proces kształcenia studentów na wszystkich kierunkach Wydziału SiMR PW.

Założenia funkcjonalne farmy drukarek 3D

Zdecydowano, że do pracy na maszynach prototypujących będą mogli przystąpić – po odpowiednim przeszkoleniu – studenci, którzy w ramach wybranych przedmiotów projektowych oraz prac semestralnych (tzw. przejściowych) i dyplomowych będą realizować wydruki. Ze względów BHP zdecydowano się na technologię FDM/FFF, ponieważ nie są w niej stosowane niebezpieczne dla operatorów maszyny lasery, lampy UV czy toksyczne żywice. Istotne były również kwestie organizacyjne – metoda FDM/FFF nie wymaga takiej staranności w obsłudze maszyn jak inne technologie przyrostowe, wykorzystujące żywice (SLA, PJM) czy proszki (CJP, SLS) [2], a ponadto nie potrzebuje kosztownego oprzyrządowania dodatkowego, tj. myjek ciśnieniowych, komór pyłoszczelnych, wyciągów czy odkurzaczy. Dla studentów, którzy dopiero poznają technologię druku 3D, widoczny na powierzchni efekt schodkowy oraz niższa dokładność wydruków nie mają decydującego znaczenia, dlatego technologia FDM/FFF jest wystarczająca.

Na Wydziale SiMR PW studiuje ponad 1000 studentów, dlatego ważne było, aby powstająca farma drukarek 3D oferowała dużą wydajność. Postanowiono więc kupić kilkanaście mniejszych maszyn prototypujących zamiast kilku o dużej przestrzeni roboczej. Takie rozwiązania są już testowane (a nawet sprzedawane) przez kilka firm [8–11]. Zwykle są to zintegrowane instalacje osobnych,



Rys. 1. Ultimaker Print Management System [8]



Rys. 2. Vertical 9 units 3D Printer [9]



Rys. 3. Voodoo Manufacturing [12]



Rys. 4. Continuous Build 3D Demonstrator firmy Stratasys [13]

małych drukarek, np. Ultimaker Print Management System [8] (rys. 1) czy chiński Vertical 9 units 3D Printer [9] (rys. 2). Podejmowane są także próby zautomatyzowania procesu obsługi, np. z zastosowaniem robota (jak w Voodoo Manufacturing [10] – rys. 3). Innym godnym uwagi rozwiązaniem jest zastosowanie druku na arkuszach folii podmodelowych, które są potem wysuwane i odcinane – ContinuousBuild 3D Demonstrator firmy Stratasys [11] (rys. 4). Taki system ciągłego wytwarzania jest w pełni skalowalny. Jedną z instalacji jest właśnie testowana w Szkole Sztuki i Projektowania w Savannah w USA. Wydaje się, że

w porównaniu z innymi technologiami metoda FDM lepiej nadaje się do integracji i automatyzacji druku 3D. Takie farmy drukarek 3D pozwalają na produkcję setek lub tysięcy części (w seriach) lub indywidualnych projektów i mogą być jedną z dróg rozwoju druku 3D.

Wykorzystanie druku 3D w dydaktyce

Aby określić wymagania techniczne, jakie ma spełniać farma drukarek 3D, przeanalizowano dotychczasowe zastosowanie maszyn prototypujących w procesie kształcenia studentów na Wydziale SiMR PW.

Od kilku lat druk 3D jest nauczany w ramach przedmiotu „Zaawansowane Modelowanie Geometryczne” (dalej: ZMG), który jest prowadzony w formie laboratorium komputerowego na trzecim semestrze studiów inżynierskich [14], na wszystkich kierunkach studiów. Zwykle grupy studenckie liczą ok. 25–30 osób, więc zajęcia komputerowe są prowadzone przez dwóch nauczycieli akademickich. Na studiach stacjonarnych trwają one trzy godziny lekcyjne tygodniowo i składają się z dwóch części praktycznych: pierwsza odbywa się w sali komputerowej, a druga w farmie drukarek 3D. Dla kilku modeli 3D CAD studenci generują pliki STL i uczą się programowania druku 3D w środowisku 3D CAM – poznają wpływ orientacji modelu STL na układ włókien w warstwach i jakość powierzchni (tzw. efekt schodkowy) oraz rozmieszczenie struktur podporowych, analizują wpływ parametrów druku na czas wydruku oraz zużycie materiału modelowego i podporowego. Prowadzący zajęcia wspólnie ze studentami realizują wydruk dwóch obiektów. Pierwszym obiektem jest mała, lita kolumna (w kształcie litery L), drukowana w trzech podstawowych orientacjach względem stołu maszyny. Każdy student dostaje do ręki trzy takie wydruki i próbuje je złamać. Drugim obiektem jest cienkościenna opakowanie (pojemnik opisany w rozdz. 8.1 w [2]) w dwóch wersjach: z wypustkami niepodpartymi (dużo trudniej jest usunąć strukturę podporową z wnętrza obiektu) oraz z fazą 45° (brak potrzeby stosowania podpór). Jego kształt studenci samodzielnie modelują w systemie 3D CAD. W ramach pokazu drukowanych jest kilka obiektów w dwóch wersjach. Docelowo mają być drukowane projekty (i przekazywane autorom) przynajmniej pięciu studentów, którzy najszybciej wykonają zadanie. Ocenia się, że do przeprowadzenia zajęć potrzebne są cztery maszyny o przestrzeni roboczej ok. 200 × 200 × 150 mm. Ze względu na fakt, że w różnych grupach dziekańskich ćwiczenia z druku 3D w ramach zajęć z ZMG odbywają się przez 10 tygodni, pięć maszyn w semestrze zimowym musi być zarezerwowanych do tego celu (patrz tablica).

Od ok. pięciu lat zajęcia pt. „Integracja Projektowania i Wytwarzania Wspomaganego Komputerowo”, prowadzone na III roku w ramach specjalności „Wspomaganie Komputerowe Prac Inżynierskich”, obejmują projekty studenckie. W semestrze letnim ten kurs przechodzą zwykle dwie lub trzy grupy dziekańskie liczące po ok. 25 studentów, a w semestrze zimowym – jedna grupa. Modelowane w 3D CAD i drukowane projekty to w większości proste mechanizmy lub pojedyncze elementy o bardziej skomplikowanych kształtach. Wszystkie podlegają następującym ograniczeniom: maksymalna objętość zużytych materiałów – 25 cm³, maksymalna przekątna jednego wydruku – 150 mm, maksymalny czas wydruku – 2 h. Dotychczas używano dwóch maszyn o przestrzeni roboczej ok. 200 × 200 × 150 mm. Modele drukowano zazwyczaj z polimeru PLA w ostatnim miesiącu semestru, więc w tym czasie następowało spiętrzenie prac.

W najbliższych latach na Wydziale SiMR PW planuje się wykorzystanie druku 3D także w ramach innych zajęć projektowych. Ponadto za rok lub dwa w każdym semestrze w farmie drukarek 3D będzie prowadzonych kilkanaście prac dyplomowych. Ocenia się, że średnia objętość całkowita elementów wyniesie 1 dm³, co daje 15 kg materiału PLA, a w sumie z wydrukami testowymi i błędnymi – 40 kg. Zakładany czas procesu wydruku (z uwzględnieniem obsługi maszyny) jednego projektu to 40 h, zatem czasowe obciążenie maszyn w semestrze szacuje się na ok. 600 h. Ponieważ większość projektów w semestrze będzie wykonywana w ostatnich pięciu tygodniach, a tygodniowy czas pracy obsługi to ok. 30 h, na potrzeby prac dyplomowych trzeba będzie zapewnić minimum cztery maszyny. Obecnie zajęcia z ZMG odbywają się w I połowie semestru, więc obiekty do dyplomów można wytwarzać na tych samych maszynach w II połowie semestru (patrz tablica).

TABLICA. Szacowana minimalna liczba drukarek 3D o przestrzeni roboczej 200×200×150 mm potrzebnych do realizacji procesu dydaktycznego w semestrze (15 tygodni zajęć) oraz prognozowane zużycie materiału modelowego

Przedmiot	Minimalna liczba drukarek 3D w poszczególnych tygodniach			Zużycie filamentu, kg
	1.–5. tydzień	6.–10. tydzień	11.–15. tydzień	
Laboratorium ZMG	5	3	0	2
Zajęcia „Integracja Projektowania i Wytwarzania Wspomagane Komputrowo”	0	0	3	3
Inne zajęcia	0	0	3	3
Prace dyplomowe	1	3	4	20
Rezerwa	1	1	1	2
SUMA	7	7	11	30

Według tablicy prognozowane zużycie materiału modelowego w semestrze może wynieść 30 kg, co oznacza wydatki rzędu kilku tys. zł, a w przypadku zastosowania Dimension 1200 BST – ponad 20 tys. zł. W procesie kształcenia studentów można jednak stosować tańsze materiały modelowe, najlepiej w kilku podstawowych kolorach (białym – ze względu na łatwość pomiaru optycznym skanerem 3D – oraz szarym i czarnym, ponieważ na wydrukach nie widać brudnych śladów obróbki skrawaniem i montażu w budowanych prototypowych urządzeniach). Farmę drukarek 3D należy więc wyposażać w maszyny, które nie wymagają stosowania specjalnie do nich przeznaczonych, zabezpieczonych elektronicznie materiałów modelowych.

Szersze wykorzystanie farmy drukarek 3D w procesie kształcenia studentów wymaga zmian w programach zajęć. Najlepiej gdyby farma służyła do zajęć projektowych, ponieważ wtedy można zarezerwować osobny czas na konsultacje dotyczące systemów 3D CAD/CAM i technologii przyrostowych.

W najbliższych latach farma drukarek 3D będzie intensywniej wykorzystywana na potrzeby badań naukowych i do wytwarzania części potrzebnych na innych stanowiskach dydaktycznych lub naukowych budowanych na Wydziale SiMR PW. W przypadku badań polimeru PCL dla Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego oprócz specjalnego, wydajnego chłodzenia konieczna jest niższa niż standardowa temperatura druku. Wydajność takiego procesu jest bardzo niska, więc do tego celu należałoby przeznaczyć kilka osobnych maszyn, które nie mogłyby być stosowane do wykonywania wydruków z innych materiałów.

Do wymienionych zadań zwykle wystarczają drukarki 3D z jednym ekstruderem, choć do specyficznych projektów potrzebne są maszyny z dwoma ekstruderami – tak aby w pojedynczym procesie można było wykonywać wydruki z dwóch materiałów – modelowego i podporowego – albo z jednego materiału w dwóch kolorach.

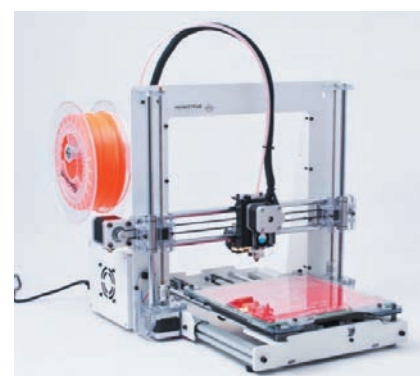
Planując wyposażenie farmy drukarek 3D, zdecydowano się na maszyny prototypujące z otwartym sterowaniem, aby umożliwić ręczną modyfikację kodu sterującego procesem druku 3D oraz zmianę ustawień fabrycznych i tym samym prowadzenie szerszych badań różnych materiałów oraz wpływu parametrów technologicznych na wytrzymałość mechaniczną i dokładność metrologiczną wydruków. Otwarte systemy mają zwykle drukarki 3D ze sterowaniem numerycznym wywodzącym się z projektu RepRap. Maszyny tego typu mogą być programowane za pomocą wielu różnych programów 3D CAM (takich jak: Slic3r, CURA, KISSlicer), pozwalających na modyfikację znacznie większej liczby parametrów technologicznych niż w przypadku zamkniętego oprogramowania, a ponadto są stosunkowo tanie w naprawie i modernizacji.

Zdecydowano, że maszyny powinny być pozbawione osłon (co stanowiłoby ograniczenie w przypadku druku z użyciem polimerów z większym skurczem przetwórczym, np. ABS) bądź wyposażone w osłony przezroczyste, uwidaczniające konstrukcję maszyn, aby ułatwić proces kształcenia.

Wytyczne funkcjonalne i techniczne dotyczące maszyn

Uwzględniając potrzeby Wydziału SiMR PW oraz posiadane fundusze, w 2016 r. rozpisano przetarg na 15 drukarek 3D stosujących technologię FDM/FFF, o otwartym sterowaniu i bez zabezpieczenia zasobników z filamentem. Określono, że każda maszyna powinna umożliwiać wydruki z różnych materiałów modelowych (m.in. z: PLA, ABS, TPE, PET i HIPS), zatem temperatura dyszy musi osiągać 260°C, a filament nie powinien być podawany przez rurkę Bowdena (ze względu na ewentualne zastosowanie TPE). Kilka maszyn musi umożliwiać druk z użyciem PCL, mieć dwie głowice przystosowane do filamentu o średnicy $\varnothing 1,75$ mm (z opcją dostosowania do $\varnothing 3$ mm), używanego w pozostałych maszynach, oraz pozwalać na zmianę dyszy w zakresie średnicy 0,1÷1,2 mm. Minimalna przestrzeń robocza maszyny to 200×200×150 mm. Wskazane jest, aby maszyny były zintegrowane i można było nimi sterować z jednego komputera (bez używania kart pamięci lub przepinania kabla USB). Do przetargu stanęły dwie firmy. Wybrano ofertę na drukarki 3D – model Prime 3D – firmy Monkeyfab [15, 16] (rys. 5).

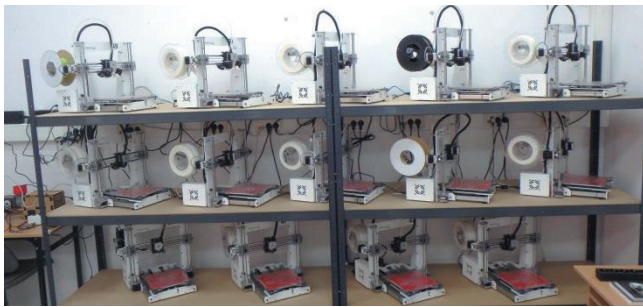
Zakupione maszyny pracują w osobnej, zabezpieczonej sieci komputerowej – skonfigurowanej tak, że spoza



Rys. 5. Drukarka 3D – model Prime 3D firmy Monkeyfab [15]



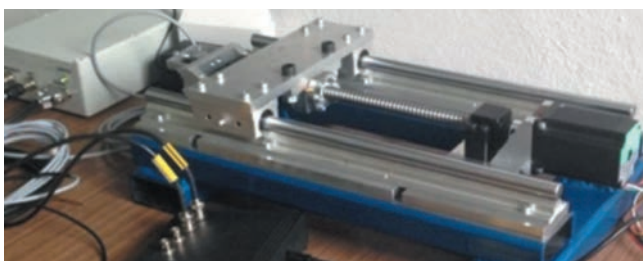
sieci Wydziału SiMR PW można monitorować stopień zaawansowania wydruku lub zatrzymać maszynę. Drukarki umieszczono na dwóch stalowych regałach (rys. 6), zapewniających swobodny dostęp. Obecnie w pomieszczeniu oprócz 20 maszyn prototypujących (w tym profesjonalnej drukarki oraz dwóch konstrukcji zbudowanych przez studentów) znajdują się dwa skanery 3D. Laboratorium 3D ma stałego opiekuna technicznego. W sali zainstalowano wydajną klimatyzację, skutecznie odprowadzającą ciepło wydzielane przez drukarki 3D. Przygotowano też dwa stanowiska warsztatowe do czyszczenia wydruków ze struktur podporowych.



Rys. 6. Farma drukarek 3D na Wydziale SiMR PW

Maszyny są sterowane przez protokół HTTP, czyli przez przeglądarkę internetową z dowolnego komputera w lokalnej sieci LAN (gdzie są podłączone drukarki). W sieć jest włączony router Wi-Fi, umożliwiający sterowanie drukarkami przez smartfony podłączone do sieci bezprzewodowej. Aby zalogować się do danej maszyny, w przeglądarce internetowej należy wpisać jej numer IP. Następnie można sterować parametrami maszyny (np. ustawić bazowanie osi czy wstępne wygrzanie dyszy i stołu) oraz wgrać programy NC (kody G).

W wydziałowym laboratorium do przygotowywania programów sterujących drukarkami 3D najczęściej używa się programu KISSlicer, a do modelowania 3D CAD – systemu SolidWorks (rzadziej CATIA V5 lub Siemens NX). Do przygotowania filamentów złożonych z różnych materiałów stosuje się wyciągarkę Filastruder, a wydrukowane struktury są badane na maszynie wytrzymałościowej o zakresie pomiarowym siły od 1 N do 1 kN (rys. 7), zaprojektowanej i wykonanej przez mgr. P. Mężyldo w ramach dyplomowej pracy magisterskiej [17].



Rys. 7. Maszyna wytrzymałościowa o zakresie siły od 1 N do 1 kN, wykorzystywana do badania próbek wytwarzanych w technologii druku 3D [17]

Podsumowanie

W najbliższym czasie kilka maszyn z farmy drukarek 3D zostanie wyposażonych w przezroczyste osłony z poliakrylu, aby można było wytwarzać obiekty z ABS. Ponadto planuje się zamontowanie kamery IP (na stałe włączonej do sieci komputerowej) monitorującej przestrzeń roboczą maszyn, aby w razie problemów z wydrukiem umożliwić awaryjne zatrzymanie danej maszyny.

Wyzwaniem wydaje się organizacja działalności farmy drukarek 3D obejmująca: przyjmowanie, rejestrację i akceptację projektów do wytworzenia; wybór materiału modelowego; sprawdzanie poprawności plików STL; ustalanie orientacji drukowanego modelu oraz parametrów technologicznych; uruchomienie procesu druku i jego nadzór; usunięcie obiektu ze stołu roboczego i ewentualne oczyszczenie go ze struktur podporowych po zakończeniu procesu. W tym celu planowane jest uruchomienie pracy semestralnej (przejściowej) lub dyplomowej, w ramach której zostanie zbudowany system bazodanowy uwzględniający wszystkie wymienione czynności. System pozwalałby na generowanie raportów dotyczących każdej maszyny z osobna – czasu jej pracy, zużycia materiałów modelowych, stosowanych parametrów druku, nazw i autorów drukowanych obiektów. System sprawdzałby, czy do rozpoczynanego procesu wystarczy załadowanego filamentu, sugerowałby wykonanie testowych wydruków w celu sprawdzenia powtarzalności kalibracji maszyny, a także przypominałby o terminach działań serwisowych. Docelowo system mógłby raportować całościowe wykorzystanie farmy drukarek 3D w ciągu semestru, aby ułatwić: modyfikację organizacji zajęć, planowanie zaopatrzenia w materiały modelowe, a nawet wnioskowanie o ewentualną rozbudowę farmy o kolejne maszyny.

LITERATURA

1. Ślusarczyk P. „3DGence tworzy wspólnie z Politechniką Śląską farmę drukarek 3D”. Centrum Druku 3D: <http://centrumdruku3d.pl/3dgence-tworzy-wspolnie-politechnika-slaska-farme-drukarek-3d/> (dostęp: 07.06.2017 r.).
2. Budzik G., Siemiński P. „Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2015.
3. Tomczuk M., Siemiński P. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonywanych wybranymi metodami szybkiego prototypowania”. *Mechanik*. 2 (2013): s. 1–20.
4. Rajch A., Siemiński P. „Wpływ orientacji warstw i wypełnienia wnętrza na sztywność części wykonywanych techniką FDM z tworzywa ABS oraz wpływ wymiarów geometrii STL na występowanie szczelin we wnętrzu modelu”. *Mechanik*. 2 (2014), CD.
5. Skawiński P., Siemiński P., Błazucki P. „Zastosowanie przyrostowej metody FDM/FFF do wytwarzania kół przekładni zębatych”. *Mechanik*. 12 (2015): s. 173–179.
6. Piękoś J., Dominiak K., Siemiński P. „Zastosowanie bezpłatnych wersji programów do drukowania modeli kości”. *Mechanik*. 4 (2016): s. 320–321.
7. Piękoś J., Siemiński P., Grygoruk R. „Propozycja metody zwiększenia dokładności wymiarowej obiektów wykonywanych technikami przyrostowymi”. *Mechanik*. 12 (2016): s. 1910–1911.
8. Ślusarczyk P. „The Ultimaker Experience”. Centrum Druku 3D: <http://centrumdruku3d.pl/the-ultimaker-experience/> (dostęp: 07.06.2017 r.).
9. Strona <http://item.winbo.top/47547.html> (dostęp: 07.06.2017 r.).
10. Strona <https://voodooomfg.com/> (dostęp: 07.06.2017 r.).
11. „Continuous Build 3D Demonstrator” firmy Stratasys, www.stratasys.com/en/demonstrators (dostęp: 07.06.2017 r.).
12. Przychodniak M. „Kolejna próba automatyzacji procesu druku 3D – tym razem przy zastosowaniu manipulatora robotycznego”. Centrum Druku 3D: <http://centrumdruku3d.pl/kolejna-proba-automatyzacji-procesu-druku-3d-tym-razem-przy-zastosowaniu-manipulatora-robotycznego/> (dostęp: 07.06.2017 r.).
13. Blog firmy ProSolutions: <http://blog.prosolutions.pl/2017/05/16/stratasys-continuous-build-3d-demonstrator-nowy-system-do-masowej-produkcji-3d/> (dostęp: 07.06.2017 r.).
14. Katalog ECTS Politechniki Warszawskiej: <https://ects.pw.edu.pl/> (dostęp: 07.06.2017 r.).
15. Strona www.monkeyfab.com (dostęp: 07.06.2017 r.).
16. Walczak A. „Monkeyfab PRIME – recenzja drukarki 3D”. Centrum Druku 3D: centrumdruku3d.pl/monkeyfab-prime-recenzja-drukarki-3d/ (dostęp: 07.06.2017 r.).
17. Mężyldo P. „Projekt i wykonanie maszyny wytrzymałościowej do badań w zakresie obciążeń 1÷1000 N”. Praca dyplomowa magisterska obroniona na Wydziale SiMR PW w czerwcu 2015 r. ■