

Katarzyna MYDŁOWSKA, Zenon TARTAKOWSKI

Zakład Tworzyw Polimerowych, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin; zenon.tartakowski@zut.edu.pl

Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM z poliamidu

Streszczenie. Modelowanie uplastycznionym tworzywem (FDM) jest jedną z technologii szybkiego prototypowania i wytwarzania pozwalającą na uzyskanie wyrobów bezpośrednio na podstawie jego trójwymiarowego modelu. Przy wykorzystaniu materiałów z tworzyw sztucznych o dużej wytrzymałości możliwe jest wykonywanie części zastępczych, prototypów funkcjonalnych lub gotowych wyrobów bez konieczności stosowania dodatkowego oprzyrządowania i obróbki wykańczającej. Do tworzyw termoplastycznych o dobrych właściwościach wytrzymałościowych zaliczyć można poliamidy. W artykule przedstawiono porównanie właściwości mechanicznych wyrobów wykonanych technologią FDM z 3 różnych poliamidów. Analizowano wpływ stopnia wypełnienia oraz grubości warstw zewnętrznych na badane właściwości.

Słowa kluczowe: szybkie prototypowanie, FDM, właściwości mechaniczne, poliamid

MECHANICAL PROPERTIES OF ARTICLES PRODUCED BY THE FDM TECHNIQUE OF POLYAMIDE

Abstract. Fused deposition modeling (FDM) is one of rapid prototyping and manufacturing technique allowing to obtain a product directly from the three-dimensional model of the product. With the use of plastic materials with high tensile properties is possible to make replacement parts, functional prototypes or finished products without the use of additional equipment and finishing machines. The thermoplastic materials having good mechanical properties can include polyamides. The paper presents a comparison of the mechanical properties of articles produced by the FDM technique of 3 different polyamide. There was analyzed the influence of filling and the thickness of the outer layers on the tested properties.

Keywords: rapid prototyping, FDM, mechanical properties, polyamide

1. Wstęp

Proces wytwarzania wyrobów z tworzyw polimerowych jest wieloetapowy. Rozpoczyna się od modelowania wyrobu, następnie zaprojektowania i wykonania narzędzia formującego – formy aż do wytworzenia wyrobu przy użyciu urządzeń przetwórczych. Uzyskany produkt nie zawsze spełnia oczekiwane wymagania, co powoduje konieczność wprowadzania poprawek, a tym samym wydłuża cykl produkcyjny.

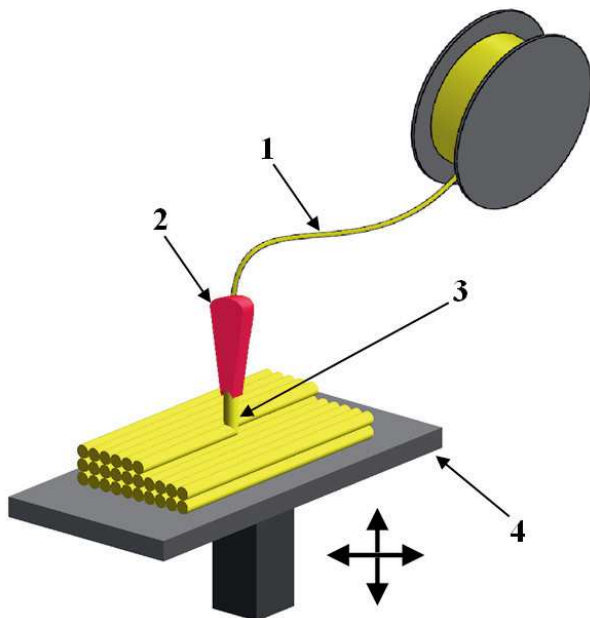
W celu przyspieszenia procesu produkcyjnego oraz obniżenia jego kosztów na etapie projektowania, wprowadzono techniki szyb-

kiego prototypowania (ang. rapid prototyping). Wielokierunkowy rozwój tych technik pozwolił na wyodrębnienie z nich różnych technologii: FDM (fused deposition modeling), SLA (stereolithography), SLS (selective laser sintering), PJM (PolyJet Matrix), LOM (laminated object manufacturing), EBM (electron beam melting). Użyty w tych technologiach materiał podstawowy może być w postaci: proszkowej, ciekłej lub drutu (ang. filament) [1,2]. Wraz z rozwojem urządzeń drukujących powiększył się również asortyment wykorzystywanych materiałów [3].

Do jednej z najszybciej rozwijającej się technologii szybkiego prototypowania należy druk

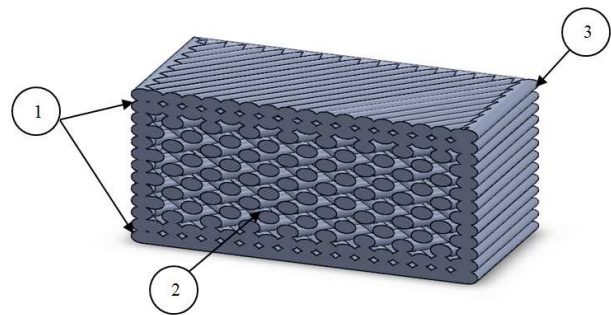
FDM (ang. fused deposition modeling). Rozwój tej techniki wiąże się z niskim kosztem urządzeń i materiałów oraz kompaktową budową drukarek.

Zasada wykonywania elementów technologią FDM jest pokazana na rys. 1. Materiał drukujący w postaci drutu (1) podawany jest do ekstrudera (głowicy) (2) skąd poprzez dyszę (3) o określonej średnicy nakładany jest na stół roboczy (4) [4]. Stół roboczy oraz głowica drukująca w zależności od konstrukcji drukarki mogą wykonywać różne ruchy w osiach X, Y i Z. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest głowica poruszająca się w płaszczyźnie XY (poziomej) oraz stół poruszający się w osi Z.



Rys. 1. Schemat wytwarzania wyrobów technologią FDM, 1 – drut (filament), 2 – głowica drukująca, 3 – dysza, 4 – stół drukujący [5]

Uzyskanie wyrobu następuje poprzez osadzenie kolejnych warstw roztopionego tworzywa (technologia addytywna – przyrostowa). Górne i dolne warstwy są wykonywane ze 100% wypełnieniem, zaś wewnątrz wyrobu z wypełnieniem zadanym przez użytkownika. Model przekroju poprzecznego wyrobu wykonanego technologią FDM pokazany jest na rys. 2.



Rys. 2. Model przekroju poprzecznego elementu wykonanego technologią FDM: 1 – górna i dolna warstwa, 2 – warstwy pośrednie z zadaniem stopniem wypełnienia, 3 – kontur wyrobu

Do podstawowych materiałów wykorzystywanych w druku technologią FDM należą: ABS (terpolimer akrylonitryl-butadien-styren), PLA (poli(kwas mlekowy)) i PA (poliamid). Stosuje się również: PC (poliwęglan), PPSU (polifenylosulfon), PEI (polieteroimid), TPU (termoplastyczne poliuretany), PS (polistyren), PET (poliester) oraz wykorzystywany do drukowania elementów podporowych ze względu na swą rozpuszczalność w wodzie PVA (poli(alkohol winylowy)). Poza powszechnie wykorzystywanymi termoplastami stosowane są również kompozyty, np. tworzyw termoplastycznych z mączką drzewną lub materiałami ceramicznymi m.in. kredą oraz mieszanki ABS-u z innymi polimerami jak: HDPE lub PC [3,6].

Wśród wymienionych materiałów na uwagę zasługuje poliamid. Jest to semikrystaliczne tworzywo termoplastyczne charakteryzujące się wysoką wytrzymałością mechaniczną, twardością, sztywnością, wytrzymałością zmęczeniową, odpornością na ścieranie oraz dobrymi właściwościami ślizgowymi [7]. Z tego powodu znajduje on zastosowanie w produkcji części maszyn jak np. koła zębate, łożyska ślizgowe, tuleje kół itp.

Ze względu na powszechne wykorzystanie technologii FDM do wykonywania prototypów funkcjonalnych oraz możliwość wykorzystania do druku poliamidu zaistniała konieczność określenia właściwości otrzymanych

wyrobów w zależności od parametrów procesu drukowania. Ponadto szeroki wybór materiałów poliamidowych do druku skłania również do wykonania ich analizy porównawczej. Możliwość modyfikowania wielu parametrów wytwarzania jak: grubość nakładanej warstwy tworzywa, obecność i grubość warstw wierzchnich, stopień wypełnienia, kąt ułożenia wypełnienia, szybkość i temperatura druku, pozwala na uzyskiwanie wyrobów o różnych właściwościach [8,9].

Celem niniejszej pracy jest porównanie wybranych właściwości mechanicznych wyrobów wytworzonych z różnym stopniem wypełnienia i grubością warstw zewnętrznych dla trzech tworzyw poliamidowych.

2. Materiał badawczy

Jako materiał badawczy zastosowano:

- Nylon Bridge firmy Taulman3D, poliamid modyfikowany, gęstość $1,084 \text{ g/cm}^3$, średnica 1,75 mm – materiał oznaczono Nylon Bridge,
- Nylon 618 firmy Taulman3D, poliamid 618, gęstość $1,109 \text{ g/cm}^3$, średnica 1,75 mm – materiał oznaczono Nylon 618,
- poliamid 6 modyfikowany firmy Cellfast (żyłka techniczna), gęstość $1,102 \text{ g/cm}^3$, średnica 1,6 mm – materiał oznaczono Poliamid Cellfast.

Materiały wykorzystane do badań zostały określone wskaźnikiem szybkości płynięcia w zakresie temperatur: $220\pm 240^\circ\text{C}$ oraz gęstością. Właściwości mechaniczne określono wyznaczając: wytrzymałość mechaniczną przy rozciąganiu statycznym, udarność Charpy'ego i twardość. Próbkę wytwarzane były przy następujących parametrach druku:

- stopień wypełnienia próbek: 25, 50, 75, 100%,
- kąt orientacji włókien: 45° ,
- wysokość warstwy: 0,2 mm,
- grubość ścian górnej i dolnej: 0,3 mm,
- temperatura druku: 220°C ,
- prędkość wydruku: 20 mm/s,
- temperatura stołu: 70°C .

3. Metodyka badań

Pomiar objętościowego wskaźnika szybkości płynięcia (MVR) przeprowadzono przy użyciu plastometru obciążnikowego firmy Melt Flow T. Q Ceast 6841/048. Pomiar przeprowadzono dla obciążenia 2,16 kg i temperatur: 220°C , 230°C , 240°C .

Badania wytrzymałościowe zostały wykonane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 3366, przy prędkości rozciągania 50 mm/s w temperaturze $22\pm 1^\circ\text{C}$. Wyznaczone zostały: wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga.

Udarność z karbem wyznaczono za pomocą młota Charpy'ego. Wykonano karby o głębokości $2,0\pm 0,2 \text{ mm}$ i promieniu $0,25\pm 0,05 \text{ mm}$. Wykorzystano młot o energii uderzenia wynoszącej 2 J, kierunek badania krawędziowy.

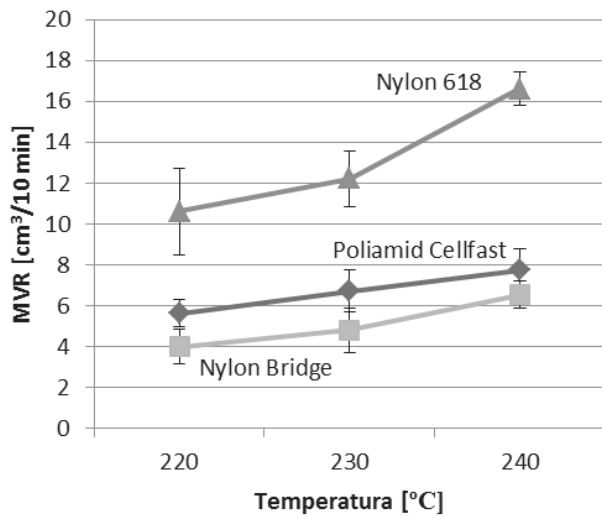
Twardość wyznaczono metodą Shore'a. Zastosowano wgłębnik zaokrąglony na końcu (typ D). Wykonano po trzy pomiary dla każdej próbki, badaniom poddano próbki ze 100% stopniem wypełnienia.

4. Wyniki badań

Poniżej przedstawiono w formie graficznej wyniki przeprowadzonych badań.

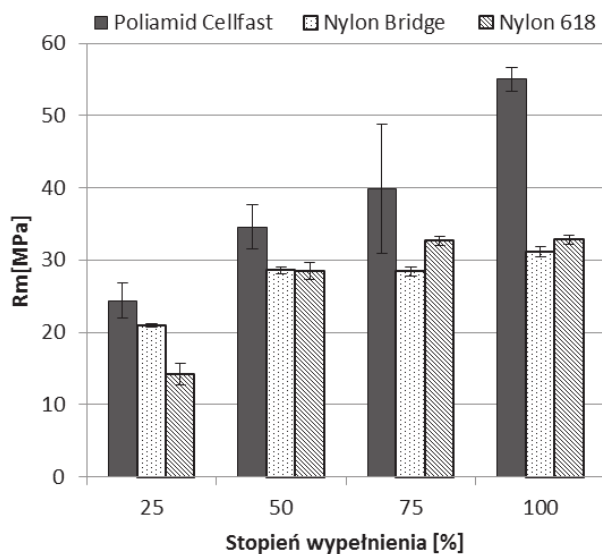
Wartości objętościowych wskaźników szybkości płynięcia (MVR) przedstawiono na rys. 3. Widoczna jest tendencja wzrostowa wartości wskaźnika płynięcia wraz ze zwiększaniem temperatury. Równocześnie Nylon 618 charakteryzuje się wyższymi wartościami MVR w porównaniu do pozostałych materiałów poliamidowych.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla wyrobów o różnym stopniu wypełnienia wykonanych z trzech materiałów poliamidowych. Najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie otrzymano dla tworzywa oznaczonego jako Poliamid Cellfast. Wartości otrzymane dla materiałów firmy Taulman (Nylon Bridge i Nylon 618) są porównywalne, a różnice pomiędzy nimi mieszczą się w zakresach odchylenia



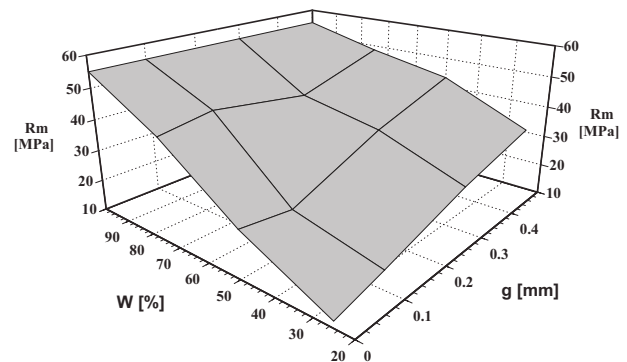
Rys. 3. Przebieg zmian MVR badanych materiałów w zależności od temperatury ($N = 2,16$ kg)

standardowego. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia wzrasta wartość wytrzymałości na rozciąganie. W przypadku elementów wykonanych z Poliamidu Cellfast i Nylonu 618 zaobserwowano ponad dwukrotne zwiększenie wytrzymałości przy zwiększeniu stopnia wypełnienia z 25% do 100%. Mniejsza wytrzymałość na rozciąganie dla wyrobów wykonanych z niższym stopniem wypełnienia związa-



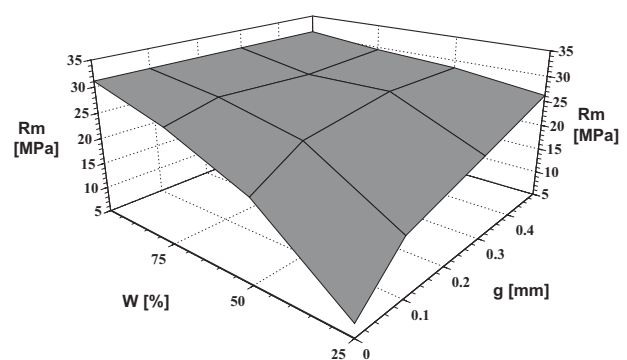
Rys. 4. Wpływ stopnia wypełnienia na wytrzymałość na rozciąganie próbek wykonanych z różnych materiałów poliamidowych

na jest z mniejszym przekrojem rzeczywistym w miejscu zerwania próbek poddawanych badaniu. Jednocześnie zastosowanie niepełnego wypełnienia ma swoje zalety w postaci krótszego czasu wykonywania elementów i zmniejszenia ich wagi.



Rys. 5. Wpływ stopnia wypełnienia (W) oraz grubości warstwy zewnętrznej (g) na wytrzymałość na rozciąganie (R_m) próbek wytworzonych z poliamidu Cellfast

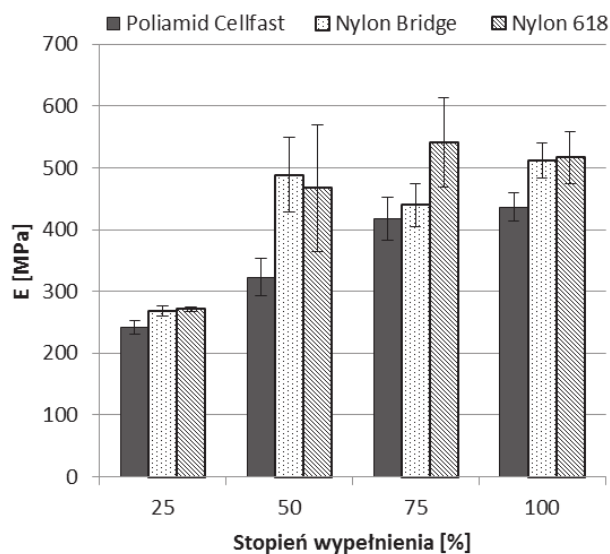
Przebieg zmian wytrzymałości na rozciąganie próbek wytworzonych z poliamidu 6 Cellfast i poliamidu Nylon Bridge w zależności od stopnia wypełnienia (W) oraz grubości warstw zewnętrznych (g) przedstawia rys. 5 i 6. Jak widać wraz ze wzrostem grubości warstw zewnętrznych następuje wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Podobna prawidłowość występu-



Rys. 6. Wpływ stopnia wypełnienia (W) oraz grubości warstwy zewnętrznej (g) na wytrzymałość na rozciąganie (R_m) próbek wytworzonych z poliamidu Nylon Bridge

je przy wzrastającym stopniu wypełnienia wyrobu. Analogiczne zmiany zachodzą dla trzeciego badanego materiału – Nylonu 618.

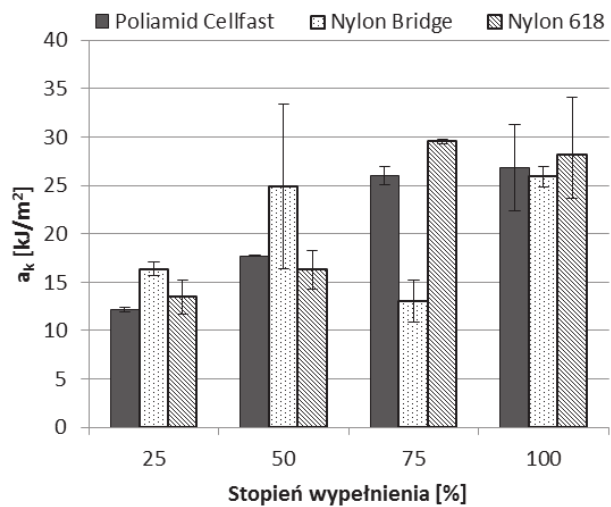
Wpływ stopnia wypełnienia na wartości modułu Younga dla próbek wykonanych z różnych tworzyw poliamidowych przedstawiono na rys. 7. Najwyższą sztywnością charakteryzują się materiały do druku firmy Taulman



Rys. 7. Wpływ stopnia wypełnienia na moduł Younga próbek wykonanych z różnych materiałów poliamidowych

(Nylon 618 i Nylon 645). Moduł Younga wzrasta wraz ze stopniem wypełnienia, przy czym próbki wydrukowane przy pełnym wypełnieniu charakteryzowały się prawie dwukrotnie wyższą sztywnością. Równocześnie zwiększenie stopnia wypełnienia z 75% do 100% nie powoduje już tak znacznej poprawy sztywności jak zmiana w przedziale 25÷75%.

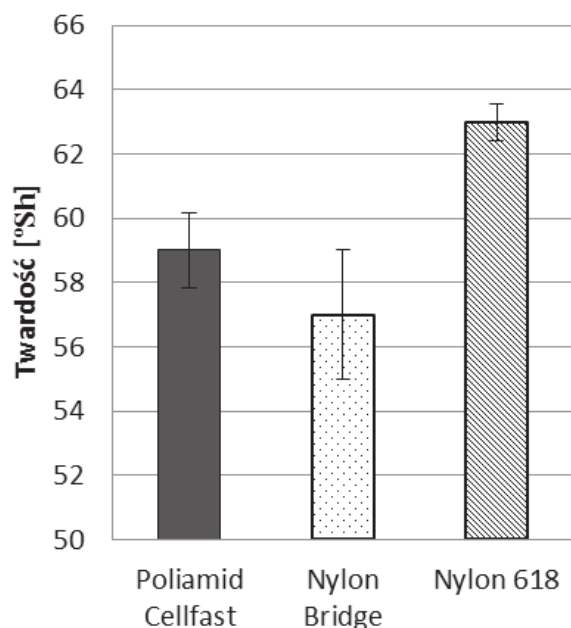
Przebieg zmian udarności Charpy'ego dla próbek z karbem o różnym stopniu wypełnienia przedstawia rys. 8. Można zauważyć, że udarność wyrobów zależy od stopnia wypełnienia. Najniższą udarnością cechują się próbki z zadaniem 25% wypełnieniem. Zbliżone udarności zauważono dla próbek wykonanych z Poliamidu Cellfast i Nylonu Bridge. Najbardziej odporne na pękanie pod wpły-



Rys. 8. Wpływ stopnia wypełnienia na udarność próbek z karbem wykonanych z różnych materiałów poliamidowych.

wem uderzenia okazały się być próbki wykonane z Nylonu 618 przy stopniu wypełnienia wynoszącym 75% (29,5 kJ/m²).

Twardość próbek o pełnym wypełnieniu wykonanych technologią FDM przedstawia rys. 9. Jak widać najwyższą twardość wykazują próbki wykonane z Nylonu 618 (63°Sh), a najniższą próbki wykonane z Nylonu Bridge



Rys. 9. Porównanie twardości próbek wykonanych z poliamidu

(57°Sh). Średnie wartości twardości próbek mieszczą się w przedziale 57÷63°Sh.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że właściwości wyrobów wytworzonych technologią FDM są zależne od stopnia ich wypełnienia oraz grubości warstw zewnętrznych. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia poprawiają się właściwości mechaniczne takie jak: wytrzymałość na rozciąganie, sztywność oraz udurowienie. Związane jest to ze zmniejszaniem się swobodnych przestrzeni w przekroju poprzecznym próbek. Właściwości mechaniczne handlowych materiałów wykorzystywanych do druku takich jak: Nylon Bridge, Nylon 618 są do siebie zbliżone. Równocześnie porównywalne wyniki badań otrzymano dla próbek wykonanych z modyfikowanego poliamidu 6 firmy Cellfast. Dodatkowo wyroby wykonane z tego materiału charakteryzowały się najwyższą wytrzymałością na rozciąganie. Z tego względu może on być stosowany również do wykonywania wytrzymałych wyrobów technologią FDM.

Bibliografia

1. Gebhardt A., *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*, Carl Hanser Verlag, München 2014.
2. Czerwiński K., Czerwiński M., *Drukowanie w 3D*, Wydawnictwo InfoAudit, Warszawa 2013, str. 21-34.
3. Oczko K. E., *Rozwój urządzeń i materiałów do kształtowania przyrostowego wyrobów*, Mechanik 2010, 83, 2, str. 81-84.
4. Bellini A., Güçeri S., *Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling*, Rapid Prototyping Journal 2003, 9, 4, str. 252-264.
5. <http://drukujemy3d.eu/technologie-druku-3d/>, dostęp dnia: 02.09.2015r.
6. Brzostek M., *Materiały: ABS, PLA, inne termoplastiki, kompozyty*. Artykuł dostępny na stronie: <http://pclab.pl/art57509-4.html>, dostęp dnia: 24.06.2015.
7. Szlezzyngier W., *Tworzywa sztuczne: chemia, technologia wytwarzania, właściwości, przetwórstwo, zastosowanie. T. 1. Tworzywa ogólnego zastosowania*, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012, str. 275-298.
8. Tartakowski Z., Mydłowska K., *Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM*, Przetwórstwo Tworzyw 2015, 2, str. 75-79.
9. Tartakowski Z., Mydłowska K., *Wpływ parametrów druku na wybrane właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM*, XVIII Profesorskie warsztaty naukowe, Poznań 2015, str. 72-73.
10. Wiśniewska K., *Charakterystyka materiałów poliamidowych stosowanych w druku FDM*, Praca inżynierska, Szczecin, ZUT, 2014.