

Andrzej Szymon SWINAREW<sup>a)</sup>, Beata SWINAREW<sup>b)</sup>, Magdalena POPCZYK<sup>a)</sup>, Jadwiga GABOR<sup>a)</sup>,  
Mateusz PRZYBYŁA<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup>Instytut Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski, ul. 75-go Pułku Piechoty 1A, 41-500 Chorzów

<sup>b)</sup>Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników,

ul. Marii Skłodowskiej-Curie 55, 87-100 Toruń

e-mail: andrzej.swinarew@us.edu.pl

## Druk 3 D – wpływ gęstości ułożenia warstw na parametry mechaniczne

**Streszczenie:** *Praca opisuje sposób przygotowania i modyfikacji filamentu wykorzystywanego w druku przestrzennym, a następnie sposób badania detali przygotowanych z wykorzystaniem technologii przyrostowej. Celem badania było wyznaczenie zależności pomiędzy zachowaniem się próbek podczas badania wytrzymałości na rozciąganie, a sposobem druku (gęstością ułożenia warstw).*

**Słowa kluczowe:** druk 3 D, badania mechaniczne, modyfikacja poliwęglanu

### 3 D PRINT - THE EFFECT OF LAYERING DENSITY ON MECHANICAL PARAMETERS

**Abstract:** *The work describes the method of preparation and modification of a filament used in spatial printing, and then a way to test the printed samples. The aim of the study was to determine the relationship between the behavior of the samples during the tensile strength test and the method of printing (density of the layering).*

**Keywords:** 3 D print, mechanical testing, modification of polycarbonate

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach nastąpił duży rozwój technologii przyrostowych (zwanej potocznie drukiem 3D). Choć za powstanie druku 3D uważa się rok 1984, kiedy to Carl Deckard stworzył pierwszą koncepcję użycia wiązki lasera lub elektronów do selektywnego przetapiania fragmentów warstw sproszkowanego materiału, to dopiero w tej dekadzie nastąpiło jego znaczne spopularyzowanie. Wyróżnia się wiele metod druku 3D (spiekanie proszków (SLS), drukowanie z żywic światłoutwardzalnych (SLA)), jednak najbardziej rozpowszechnioną metodą jest FDM (FusedDepositionModelling, co można przetłumaczyć jako osadzanie topionego materiału). Jest to metoda opierająca się na modelowaniu ciekłym tworzywem termoplastycznym.

Materiał osadzany jest przy pomocy ekstrudera, budującego warstwę w płaszczyźnie XY. Detal budowany jest poprzez nakładanie kolejnych warstw cienkiego włókna w osi pionowej (Z). Materiał (tzw. filament) ma postać cienkiej nitki, którą umieszcza się w głowicy drukarki 3D [1-7]. Jako filament najczęściej stosuje się tworzywa sztuczne [8-9]. Główną rolę odgrywają poli(akrylonitryl-co-butadien-co-styren) (ABS) i polilaktyd (PLA), choć coraz popularniejsze są inne materiały jak poliwęglany (PC) [10-11].

W ostatnich latach notuje się duże zainteresowanie modyfikacją matryc polimerowych, dzięki czemu można uzyskać tworzywa sztuczne o różnych właściwościach np. antibakteryjne bądź o poprawionej wytrzymałości. Modyfikując poliwęglan możemy otrzymać materiał o jeszcze lepszych właściwościach mechanicznych.

## 2. OPIS BADAŃ

Do przeprowadzenia próby wytrzymałości na rozciąganie użyto 3 próbki o zbliżonych wymiarach (Tab. 1). Próbki zostały wydrukowane z różną gęstością warstw, to znaczy zastosowano wypełnienie na poziomie odpowiednio 100%, 85%, 75% – w efekcie różniły się miarą ubytków. W związku z tym próbka pierwsza posiadała ich najmniej natomiast, próbka ostatnia najwięcej.

Materiał, z którego został wykonany filament wykorzystany do wydrukowania próbek to granulatu poliwęglanowy o średnicy 2,5 mm (makrolon 2407), który został zmodyfikowany poliolem (bazującym na cyklicznym heksamerze glicydolanu potasu) zgodnie z opatentowaną procedurą [12].

Do reaktora w postaci mieszalnika ze stali nierdzewnej o pojemności 3000 cm<sup>3</sup>, zaopatrzonego w system odprowadzania ładunku elektrycznego wprowadzono w temperaturze 25°C poliwęglan (800 g) oraz propoksylogowany cykliczny

heksamer glicydolanu potasu (8g). Całość mieszano z wykorzystaniem mieszadła teflonowego o łopatach zgarniających przez 30 minut, z prędkością 50 rpm, po czym mieszaninę suszono aerostatycznie w 100°C przez 24h. Następnie przy użyciu 4-strefowej wytłaczarki ślimakowej (L/D 32/1) przy zastosowaniu temperatur stref grzejnych odpowiednio na głowicy i kolejnych trzech strefach 265 °C, 230 °C, 210 °C i 160 °C i prędkości wyłoku 60 rpm. otrzymano filament (średnica 2,95 mm) do technologii przyrostowych.

Wydruk detali (Tab. 2) realizowano na prototypowej drukarce typu FDM z metalową głowicą o zakresie temperatur pracy do 380 °C z podwójnym kaptonowym grzonym stołem typu „sandwich” do temperatury 175 °C. z kontrolą temperatury czasu rzeczywistego typu PID.

Wydruki prowadzono przy następujących parametrach: średnica dyszy 0,2 mm, temperatura głowicy 285 °C, temperatura stołu 145 °C, prędkość druku do 120 mm/s, pierwsza warstwa 60 mm/s, bez chłodzenia.

**Tab. 1. Wymiary przekroju poprzecznego próbek przed próbą rozciągania**

**Tab. 1. The cross-sectional dimensions of the samples before the tensile test**

Rodzaj próbki	Wymiary 1 [mm]	Wymiary 2 [mm]
Próbka 100%	8,92 x 6,11	8,84 x 6,18
Próbka 85%	8,79 x 6,12	8,84 x 6,22
Próbka 75%	8,86 x 6,42	8,88 x 6,23

**Tab. 2. Pole przekroju poprzecznego roboczej części przed obciążeniem próbek**

**Tab. 2. Cross-sectional area of the working part before loading the samples**

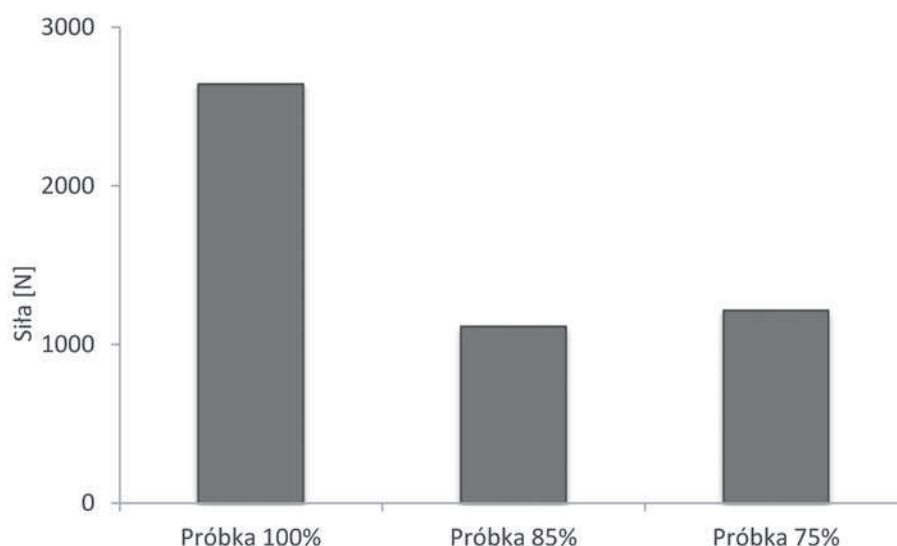
Rodzaj próbki	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
Próbka 100%	109,13
Próbka 85%	108,77
Próbka 75%	112,2

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki dla próbki nr 100%, która została wydrukowana z największą gęstością ułożenia warstw zdecydowanie odbiegają od pozostałych (rys. 2 a)), posiada najwyższą wytrzymałość na rozciąganie. Ponadto w trakcie próby rozciągania próbka wykazywała najmniejsze odkształcenia. Dopiero przed samym zerwaniem zaobserwowano pierwsze oznaki delaminacji poprzecznej, a następnie wzdłużnej, próbka uległa zniszczeniu przy sile wynoszącej ponad 2600 N (Rys. 1, Tab. 3). W przypadku dwóch pozostałych próbek delaminacje można było zaobserwować dużo wcześniej w trakcie próby. Opisane zachowanie wyraźnie odzwierciedlone jest w wy-

glądzie przełomu próbek. W przypadku próbki nr 100%, przełom wskazuje na pękanie kruche, które nastąpiło symetrycznie w miejscach o najmniejszym przekroju grubości ścianek, nie zaobserwowano znacznych delaminacji. W przypadku kolejnych dwóch próbek pęknięcia nastąpiły również w miejscach najwęższego przekroju jednakże zaobserwowano znaczny stopień delaminacji warstw, co w przypadku próbki 85% spowodowało pęknięcie tylko z jednej strony.

Poprzez taki sposób pęknięcia ściśle związane z metodą wydruku warstwa po warstwie, próbki uległy odkształceniu sprężystemu. Po zniszczeniu próbki 85% i 75% wróciły do swojego kształtu (rys. 2 b) i c)), natomiast próbka 100% niemal nie uległa odkształceniu, a w mo-



Rys. 1. Wytrzymałość na rozciągania

Fig. 1. Tensile test strength

Tab. 3. Siła z jaką nastąpiło zerwanie próbek

Tab. 3. The strength with which the samples were broken

Rodzaj próbki	Siła [N]
Próbka 100%	2641,7
Próbka 85%	1113
Próbka 75%	1215

mencie, kiedy rozpoczął się proces pęknięcia nastąpił on niemal jednocześnie dla wszystkich warstw (Rys. 3, 4, 5).

Małym zaskoczeniem okazał się fakt, że w momencie obniżania gęstości ułożenia warstw dla kolejnych próbek tzn. 85% i 75% nie zauważono różnicy wytrzymałości pomiędzy takimi próbkami (Tab. 4).

Dysponując powyższymi danymi można obliczyć wytrzymałość na rozciąganie próbek.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

gdzie:

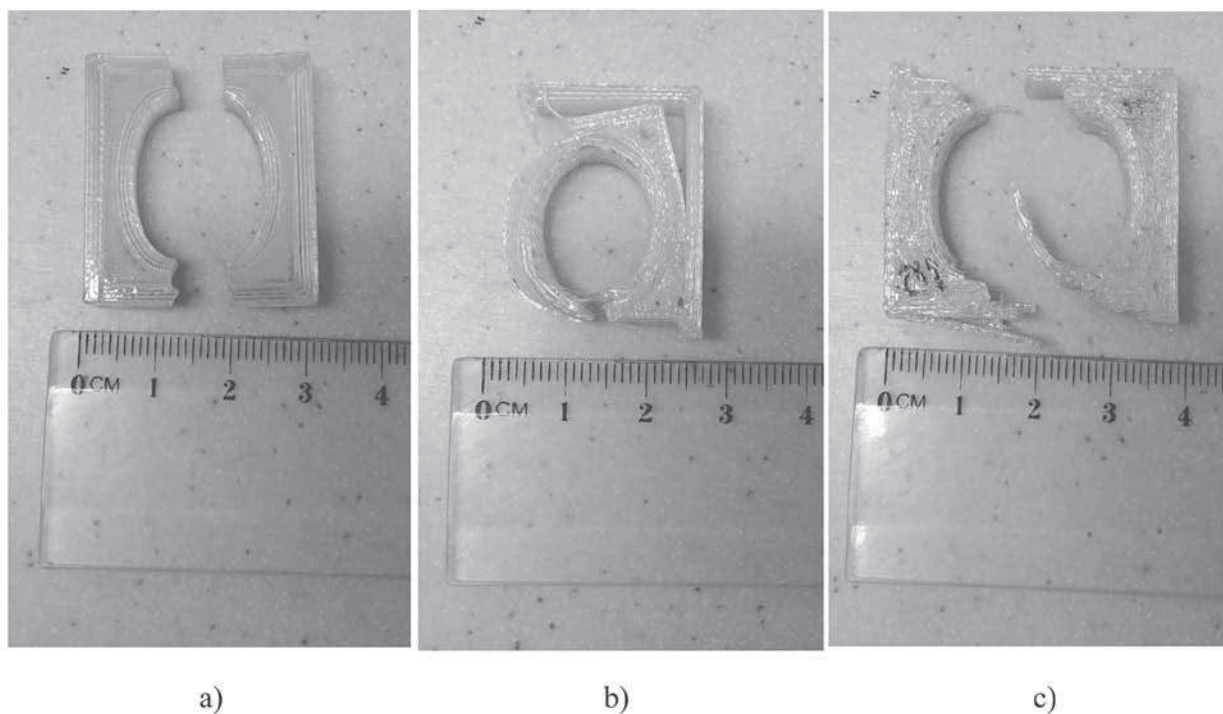
$F_m$  - największa siła rozciągająca niepowodująca przewężenia próbki,

$S_0$  - pole przekroju poprzecznego roboczej części przed obciążeniem próbki.

Tab. 4. Wytrzymałość na rozciąganie próbek

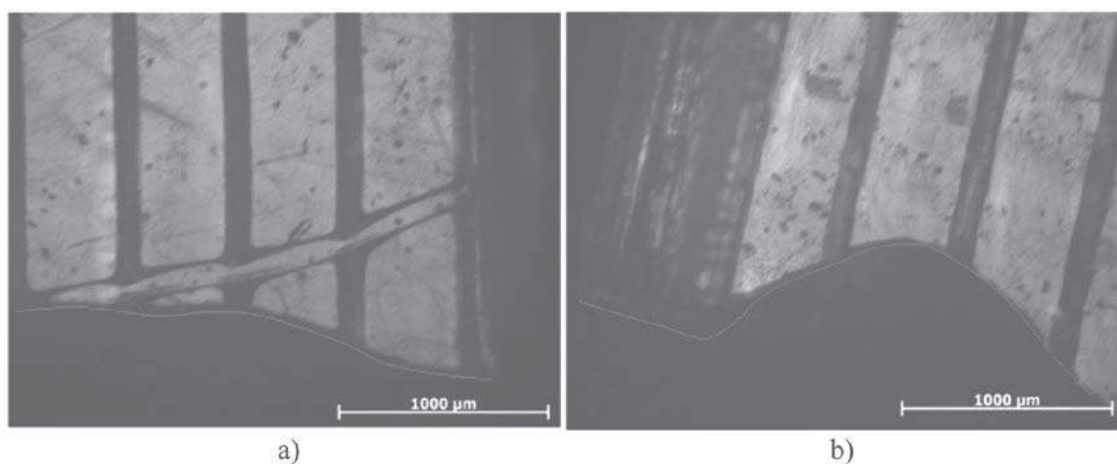
Tab. 4. Tensile strength of samples

Rodzaj próbki	$R_m$ [MPa]
Próbka 100%	24,21
Próbka 85%	10,23
Próbka 75%	10,83

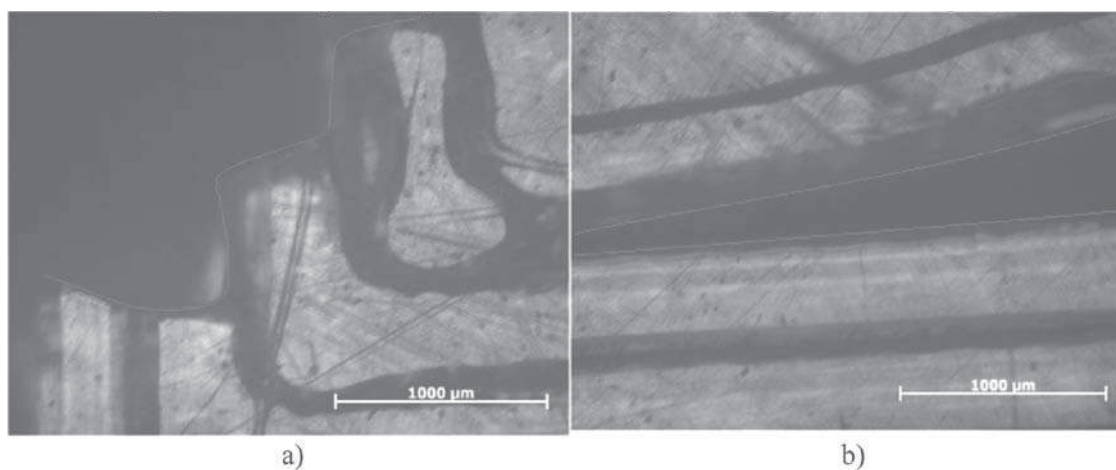


Rys. 2. Zdjęcia próbek po zerwaniu: a - próbka 100%, b - próbka 85% oraz c - próbka 75%

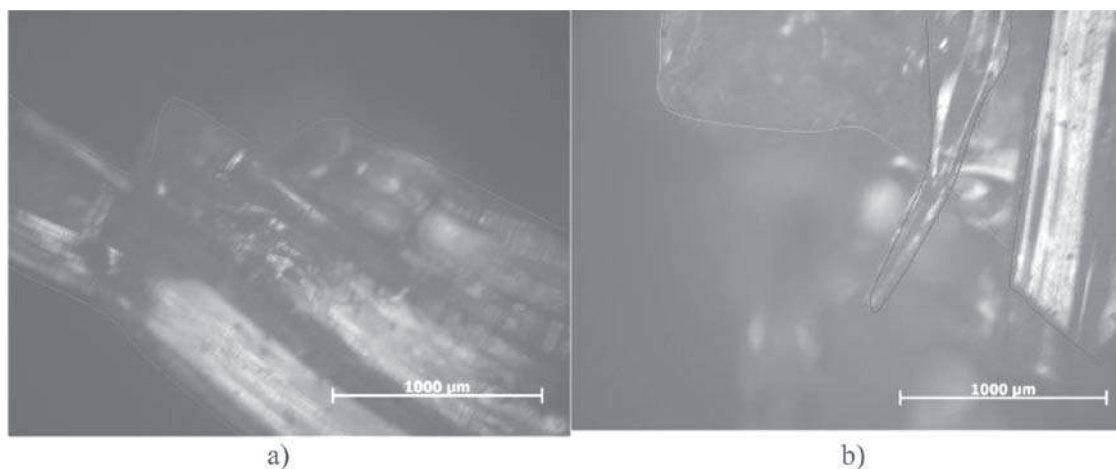
Fig. 2. Photographs of samples after breaking: a - sample 100%, b - sample 85% and c - sample 75%



Rys. 3. Przełom próbki 100% po zerwaniu: a – jedno miejsce, b – drugie miejsce  
Fig. 3. Breakthrough of sample 100% after breaking: a – one place, b – second place



Rys. 4. Przełom próbki 85% po rozerwaniu (a) oraz delaminacja próbki 85% po rozerwaniu (b)  
Fig. 4. Breakthrough of sample 85% after breaking (a) and delamination of sample 85% after breaking (b)



Rys. 5. Przełom próbki 75% po rozerwaniu (a) oraz delaminacja próbki 75% po rozerwaniu (b)  
Fig. 5. Breakthrough of sample 75% after breaking (a) and delamination of sample 75% after breaking (b)



Tab. 5. Właściwości materiałów wykorzystywanych w technologii przyrostowej [10]

Tab. 5. AM materials and their properties [10]

Rodzaj materiału	HDT (°C) (0.45 MPa)	HDT (°C) (1.82 MPa)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	Moduł Younga, E (MPa)	Wydłużenie przy zniszczeniu (%)	Moduł sprężystości (MPa)
Standard	ASTM D648		ASTM D638		ASTM D790	
ABS	55-104	50-100	28,2-75	1890-3650	1,3-40	1700-3240
PLA	54-88	54-88	57-110	3309-3596,30	3,9-100	1972
PC	51-138	51-138	52-68	2000-3100	4-13	2100-3000

Bazując na zestawieniu właściwości mechanicznych (tab. 5) można wywnioskować, że poliwęglany korzystnie wypadają na tle popularnych tworzyw takich jak PLA czy ABS gdyż odznaczają się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi i wysoką udarnością [10]. Ich wysoka sztywność wynika z obecności pierścieni w łańcuchach i sprawia, że mają one wysokie temperatury zeszklenia (145 °C) i topnienia (225 – 310 °C). Mogą być stosowane w szerokim zakresie temperatur od -40 °C do 210 °C. Poliwęglany wykazują bardzo dobrą przepuszczalność światła widzialnego i są odporne na działanie promieniowania jonizującego. Mogą być wyjaławiane metodami radiacyjnymi, termicznymi i chemicznymi.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wykonano 3 rodzaje próbek o tym samym kształcie, ale różnej gęstości ułożenia warstw. Pozostałe parametry druku pozostawały niezmiennione. Poddano je badaniu wytrzymałości na rozciąganie i porównano zachowanie w trakcie próby oraz wielkości siły podczas zniszczenia. Największą odporność na siłę rozciągającą wykazała próbka o największej gęstości ułożenia warstw. Wykazała niewielkie odkształcenie podczas badania a wszystkie warstwy uległy zniszczeniu niemal jednocze-

śnie co świadczy o właściwej laminacji warstw oraz o dobrze dobranej temperaturze procesu. Próbkę o mniejszej gęstości ułożenia warstw zachowywały się jak materiał warstwowy gdzie każda z warstw miała inne parametry mechaniczne, zjawisko to może być również wytłumaczone zbyt krótkim czasem laminacji warstw, zbyt niską temperaturą laminacji oraz zbyt luźnym ułożeniem warstw skutkującym przechłodzeniem skojarzenia. Wskutek takiego połączenia próbki wykazywały dość wysokie odkształcenie, jak się okazało po zerwaniu, odkształcenie to było w większości sprężyste. Obniżenie gęstości ułożenia warstw zmniejsza znacznie odporność na rozciąganie. Nie zauważono proporcjonalności pomiędzy wytrzymałością a gęstością ułożenia warstw. Dla próbki 85% i 75% pomimo różnych gęstości wytrzymałość była na takim samym poziomie około 1000N. To zjawisko także wytłumaczone może być słabą laminacją warstw przy ich zbyt luźnym ułożeniu. Aby uniknąć tego zjawiska należałoby podnieść temperaturę procesu wraz z zmniejszeniem gęstości warstw lub przyspieszyć proces nakładania kolejnych warstw. Należy jednak pamiętać, aby nie przekroczyć temperatury degradacji materiału, w tym celu zaleca się stosowanie drukarek z grzaną komorą wydruku oraz grzanym stołem roboczym w celu uniknięcia skurczu liniowego.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Ludwikowski F.: *Technologie druku 3D*. Elektronika Praktyczna – Automatyka i Mechatronika 2017, vol. 4, s. 65-67.
2. Caban J., Szala M., Kęsik J., Czuba Ł.: *Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive*. Autobusy – Eksploatacja i Testy 2017, vol. 6, s. 573-579.
3. Brans K.: *3D Printing, a Maturing Technology*. IFAC Proceedings Volumes 2013, vol. 46(7), s. 468-472.
4. Kalsoom U., Nesterenko P.N., Brett P.: *Current and future impact of 3D printing on the separation sciences*. Trends in Analytical Chemistry 2018, vol. 105, s. 492-502.
5. Duda T., Venkat Raghavan L.: *3D Metal Printing Technology*. IFAC-PapersOnLine 2016, vol. 49-29, s. 103-110.
6. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D.: *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering 2018, vol. 143, s. 172-196.
7. Lee J.Y., An J., Chua Ch.K.: *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*. Applied Materials Today 2017, vol. 7, s. 120-133.
8. Dizon J.R.C., Espera A.H., Chen Q., Advincula R.C.: *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. Additive Manufacturing 2018, vol. 20, s. 44-67.
9. Stansbury J.W., Idacavage M.J.: *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. Dental Materials 2016, vol. 32(1), s. 54-64.
10. Low Z.X., Chua Y.T., Ray B.M., Mattia D., Metcalfe I.S., Petterson D.A.: *Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques*. Journal of Membrane Science 2017, vol. 523, s. 596-613.
11. Pahonie R.C., Stefan A., Adochiei I.R., Costuleanu C.L., Andruseac G.G., Ungureanu G., Sardaru D.P.: *Experimental characterisation of the mechanical properties of lightweight 3D printed polymer materials for biomechanical application in ankle-foot orthosis*. Materiale Plastice 2017, vol. 54(2), s. 396-401.
12. *Sposób otrzymywania modyfikowanych poliestrów, zwłaszcza na bazie poliwęglanu, polilaktydu, lub modyfikowanych kopolimerów, w szczególności zawierających poli(akrylo-butadieno-styren), oraz modyfikowane poliestry lub modyfikowane kopolimery otrzymane tym sposobem*. Patent Polska, numer patentu: 227529, 2017

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 18-10-2018

Data akceptacji publikacji do druku: 13-12-2018