

Zenon TARTAKOWSKI<sup>a)</sup>, Katarzyna CIMANDER<sup>a)</sup>, Maksymilian BURZYŃSKI<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

e-mail: zenon.tartakowski@zut.edu.pl, katarzyna.cimander@zut.edu.pl

## Filament z kompozytu PVB do zastosowań w druku 3D (FDM)

**Streszczenie:** Techniki przyrostowe są coraz częściej stosowane w procesach produkcyjnych. Ich rozwój w znacznym stopniu determinowany jest nowymi materiałami. Najbardziej dynamicznie rozwija się druk w technologii FDM (ang. Fused Deposition Modelling) gdzie filament wytworzony jest z tworzywa termoplastycznego. W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania recyklatu PVB do wytworzenia kompozytu polimerowego przeznaczonego do druku 3D. Z materiału wytworzono techniką ekstruzji filament, wykonano wydruki próbek, które następnie poddano badaniom. Porównano również właściwości próbek drukowanych i wytwarzanych technologią przetwórstwa wtryskowego. Stwierdzono, że nowy materiał może mieć zastosowanie na wyroby elastyczne oraz jego adhezja do podłoża szklanego jest dobra.

**Słowa kluczowe:** FDM, recykling, PVB

### PVB COMPOSITE FILAMENT FOR 3D PRINTING APPLICATIONS (FDM)

**Abstract:** Additive techniques are increasingly used in manufacturing processes. Their development is determined mostly by new materials. FDM (Fused Deposition Modeling) is the most dynamically developing 3D printing technique where the filament is made of a thermoplastic. The paper presents the possibility of using recycle PVB to produce a polymer composite intended for 3D printing. Filament were prepared by the technique of extrusion and then prints of samples were made which were tested. The properties of printed samples and those produced by injection processing technology were compared. It has been found that the new material can be applied to flexible products and its adhesion to the glass substrate is good.

**Keywords:** FDM, recycling, PVB

## 1. WSTĘP

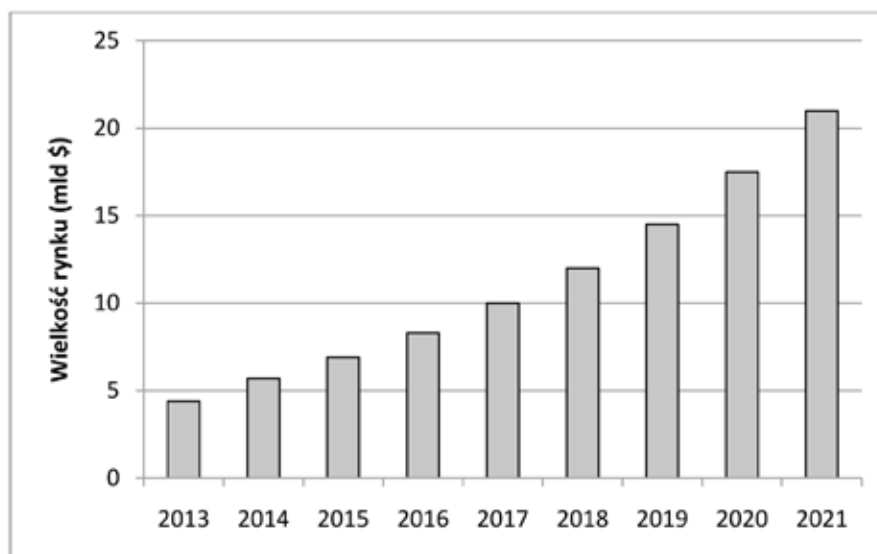
Techniki przyrostowe są najbardziej rozwijową metodą wytwarzania elementów zarówno z metalu, ceramiki oraz tworzyw i kompozytów polimerowych. Według aktualnych prognoz ich rozwój w zakresie materiałów, usług oraz drukarek w skali rocznej wynosi ok. 20% (rys. 1) [1].

Istnieje szereg metod technologii przyrostowych, w tym SLS, SLM, SLA oraz FDM (rys. 2). Ostatnia z wymienionych technologii (FDM) wykorzystuje do budowania modelu wytłaczanie uplastycznionego materiału termoplastycznego przez specjalną głowicę [2]. Ponad 50% rynku drukarek 3D stanowią urządzenia przyrostowe w technologii FDM [3]. Wynika to w większości z łatwiejszego dostępu do materiału (filamentu), możliwości jego modyfikacji oraz proekologicznego procesu wytwarzania (produkcja bezodpadowa).

Technologia druku jest szczegółowo przedstawiona w literaturze [2,4]. Również i właściwości uzyskiwanych wyrobów, wytwarzanych w szerokim zakresie różnych parametrów są przedstawiane w pracach krajowych i zagranicznych [5-9].

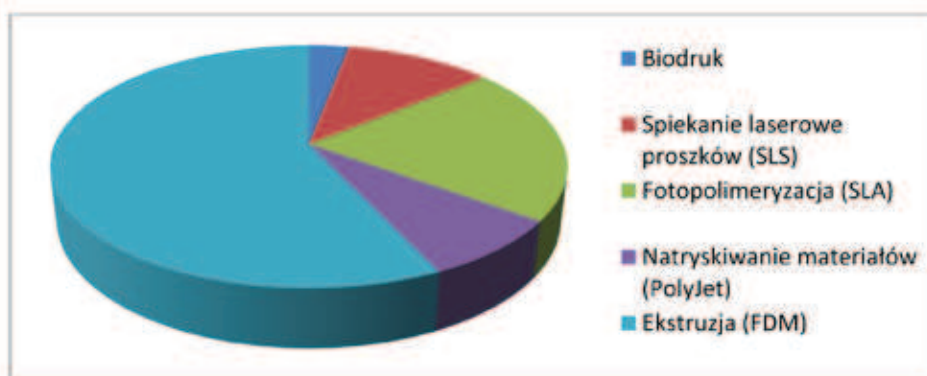
W procesach drukowania stosowane są różne materiały termoplastyczne, przy czym w większości wytwarzane na podstawie PLA, PA, ABS, PC/ABS. Stosowane są również kompozyty zawierające napełniacze w postaci pyłu drzewnego, związków metali, proszków ceramicznych [10-12]. Istotnym problemem drukowania jest uzyskiwanie dobrej adhezji pomiędzy podłożem a wytworem.

Wśród stosowanych materiałów do druku niewiele jest materiałów na bazie klasycznych poliolefin, jak polipropylen i polietylen. Mając na uwadze korzystne właściwości tych materiałów oraz ich powszechne wykorzystanie w przemyśle tworzyw sztucznych, w pracy przedstawiono



Rys. 1. Rynek druku 3D na świecie [1]

Fig. 1. The 3D printing market in the world [1]



Rys. 2. Rynek drukarek 3D ze względu na wykorzystywaną technologię [3]

Fig. 2. The market of 3D printers division according to the used technology [3]

możliwości wytworzenia oraz zastosowania filamentu do druku, będącego kompozytem na podstawie PP. Jako modyfikator wykorzystano poprodukcyjne odpady folii PVB (poliwinylobutyralu) [13]. Wykorzystanie tego materiału uzasadnić można jego korzystnymi właściwościami, obejmującymi [14]:

- wysoką adhezję do szkła (najczęściej stosowana platforma drukująca),
- korzystne właściwości mechaniczne (w tym wysoka elastyczność),
- dobre właściwości antystatyczne.

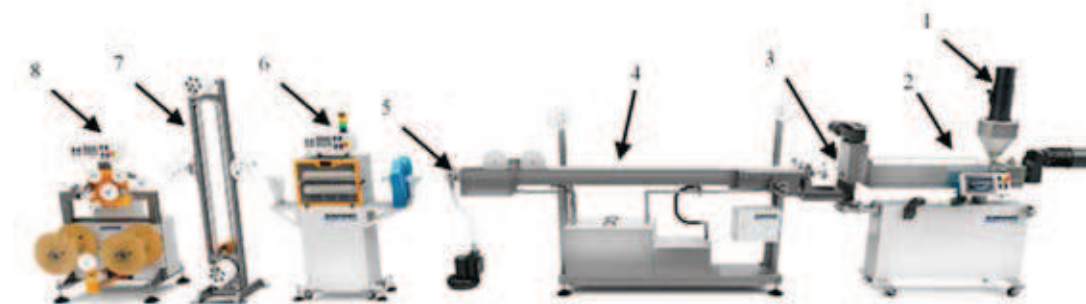
Na podstawie wcześniejszych badań kompozytów PVB/PP [15,16] wytypowano materiał zawierający 25% wag. PVB. W artykule dokonano charakterystyki nowego

materiału, poprzez określenie jego właściwości fizycznych, przetwórczych oraz mechanicznych. Przedstawiono również wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonanych technologią FDM i porównano je z wytworzonymi technologią wtryskową.

### 3. MATERIAŁ BADAWCZY

Do wytworzenia materiału badawczego wykorzystano:

1. Odpady technologiczne folii PVB w postaci nieregularnych skrawków, z zakładu produkującego szyby bezpieczne Glaspo, gęstość: 1,06 g/cm<sup>3</sup>,
2. Polipropylen MOPLEN HP648T, firmy LyondellBasell, 0,90 g/cm<sup>3</sup>.



Rys. 3. Linia technologiczna do produkcji filamentu [17]

Fig. 3. Technological line for the production of filament [17]



Rys. 4. Schemat przekroju wydrukowanych próbek

Fig. 4. Diagram of the cross section of printed samples

Filament do druku technologią FDM o średnicy 1,75 mm wytworzono w procesie wytłaczania (temp. wytłaczania: 175°C, prędkość obrotowa ślimaka: 30 obr/min) przy wykorzystaniu linii produkcyjnej ZAMAK Mercator (rys. 3), w skład której wchodzi:

- dozownik tworzywa (1),
- wytłaczarka jednoślindakowa (2),
- głowica formująca (3),
- wanna chłodząca (4),
- miernik laserowy średnicy (5),
- odciąg gąsienicowy (6),
- kompensator grawitacyjny (7),
- nawijarka (8).

Z wytworzonego filamentu wykonano próbki do badań, przy użyciu drukarki firmy Omni3D, RapCraft 1.3. Przyjęto następujące parametry druku:

- grubość pojedynczej warstwy: 0,2 mm,
- ilość warstw z pełnym wypełnieniem: 3,
- prędkość druku 10 mm/s,
- temperatura druku: 175°C,
- oprogramowanie wykorzystane do wykonania g-codu: Kisslicer,

- średnica dyszy drukującej: 0,4 mm,
- stopień wypełnienia: 25%, 50%, 75%, 100%.

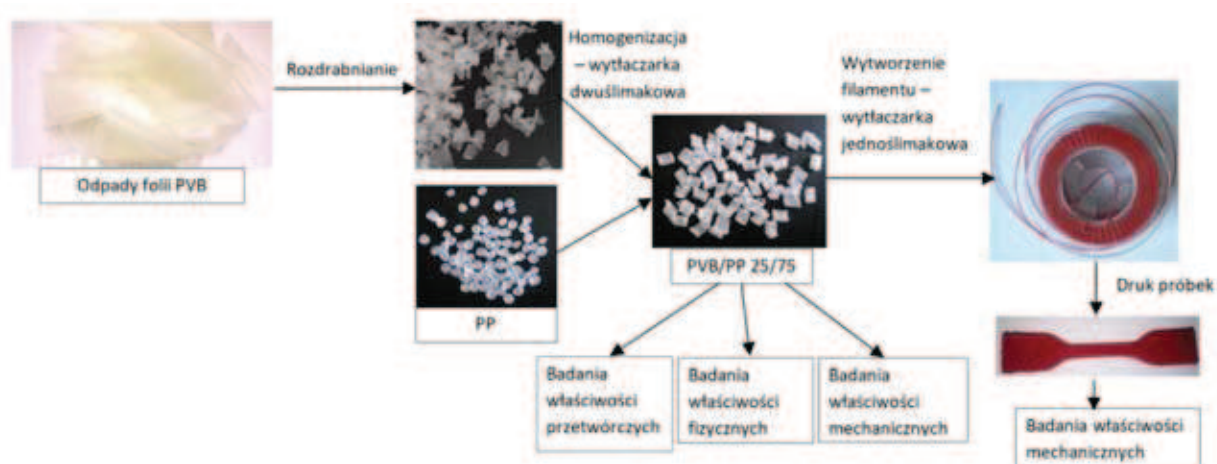
Przy wytworzeniu próbek przyjęto, że dla różnych stopni wypełnienia grubość warstw zewnętrznych będzie taka sama (rys. 4).

Do celów porównawczych wykonano również próbki technologią przetwórstwa wtryskowego z wykorzystaniem wtryskarki ślimakowej Boy 15 (temp. wtrysku 190/180/180°C, ciśnienie wtrysku 50 MPa, ciśnienie do-cisku 25 MPa).

## 2. METODYKA BADAWCZA

Badania przeprowadzono wg schematu przedstawionego w formie graficznej na rys. 5. Program obejmował:

- przygotowanie materiału badawczego,
- przetwórstwo na wtryskarce ślimakowej granulatu (wykonanie próbek),
- wytworzenie filamentu,
- druk próbek,
- badania próbek.



Rys. 5. Program wykonywanych badań

Fig. 5. Program of done tests

Jak przedstawiono na rys. 5 w pierwszej kolejności scharakteryzowano materiał badawczy, wyznaczając jego następujące właściwości:

1. Gęstość – metoda hydrostatyczna, waga AXIS, norma: PN-EN ISO 1183.
2. Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (MFR) – plastometr: MeltFlow T.Q. Ceast 6841/048, norma: PN-EN ISO 1133, warunki badania: temperatura – 180, 190, 200°C, obciążenie – 1,2; 2,16; 3,36 kg.
3. Udarność wg Charpy'ego – młot wahadłowy ZWICK B5102.201, norma: PN-EN ISO 179, parametry badania: próbki bez karbu, kierunek uderzenia krawędziowy.
4. Twardość wg Shore'a – twardościomierz FRANK 104, norma: PN-EN ISO 868, wgłębnik zaokrąglony na końcu (typ D).
5. Próba statycznego rozciągania – uniwersalna maszyna testująca Shimadzu AG-X plus, norma: PN-EN ISO 527, parametry badania: prędkość rozciągania 50 mm/min, wyznaczone wielkości:
  - krzywe naprężenie – odkształcenie,
  - wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ),
  - moduł Younga ( $E$ ),
  - odkształcenie podczas pęknięcia ( $\epsilon$ ).

#### 4. WYNIKI I DYSKUSJA

Podstawowe właściwości nowego materiału kompozytowego PVB/PP oraz materiałów wyjściowych (PVB i PP) określono na podstawie badań znormalizowanych próbek wytworzonych w technologii przetwórstwa wtryskowego (tab. 1).

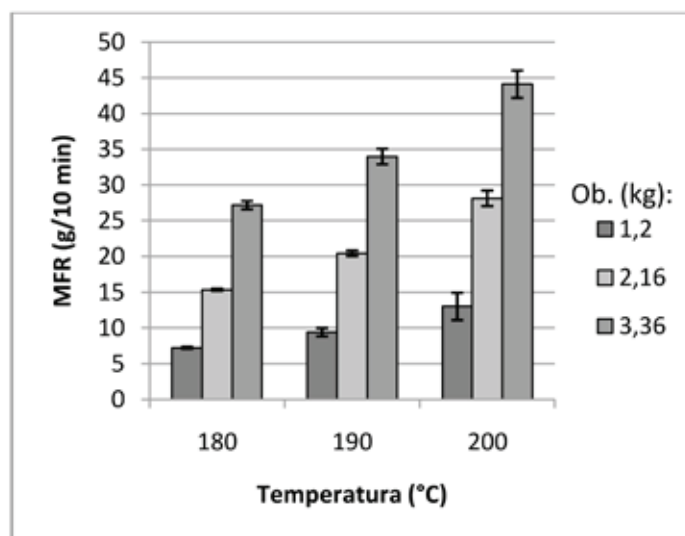
Przebieg zmian masowego wskaźnika szybkości płynięcia MFR kompozytu PVB/PP w zależności od temperatury i obciążenia przedstawia rys. 6.

Na podstawie uzyskanych wyników badań (tab. 1, rys. 6) stwierdzono, że materiał posiada korzystne właściwości mechaniczne oraz przetwórcze. Zastosowanie PVB jako modyfikatora PP spowodowało zwiększenie jego elastyczności o 128% w porównaniu z czystym polipropylenem oraz czterokrotny wzrost twardości w stosunku do PVB.

**Tab. 1. Właściwości kompozytu PVB/PP oraz PVB i PP (próbki wykonane technologią przetwórstwa wtryskowego)**

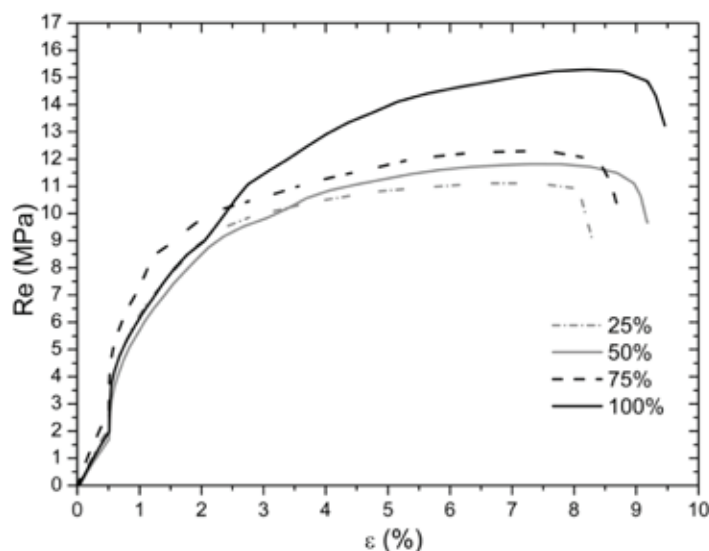
**Tab. 1. Properties of PVB/PP composite, PVB and PP (samples made with injection moulding)**

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$a_n$ (kJ/m <sup>2</sup> )	HSH (°Sh D)	$R_m$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
PP	0,90	56,87	69,67	38,35	1481,4	26,17
PVB/PP 25/75	0,94	13,92	61,27	20,38	1681,5	59,75
PVB	1,06	-	14,90	18,10	4,48	199,94



Rys. 6. Wpływ warunków badania na wartości MFR kompozytu PVB/PP (25/75)

Fig. 6. The influence of test conditions on MFR values of PVB/PP (25/75) composite



Rys. 7. Przykładowe krzywe naprężenie-odkształcenie dla próbek wytworzonych technologią FDM

Fig. 7. Exemplary stress-strain curves for samples made with FDM technology

Badania MFR kompozytu PVB/PP w zakresie temperatur 180÷200°C przy obciążeniu 1,2 kg wykazały, że jest on korzystny dla procesu drukowania (jest w przedziale 5÷30 g/10 min [18]). Pozwala to prowadzić proces w zakresie temperatur 175÷190°C.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe wydrukowanych próbek pozwoliły na określenie wpływu stopnia ich wypełnienia na przebieg krzywych naprężenie-odkształcenie (rys. 7).

Istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe wytworzonych techniką druku 3D próbek ma ich stopień

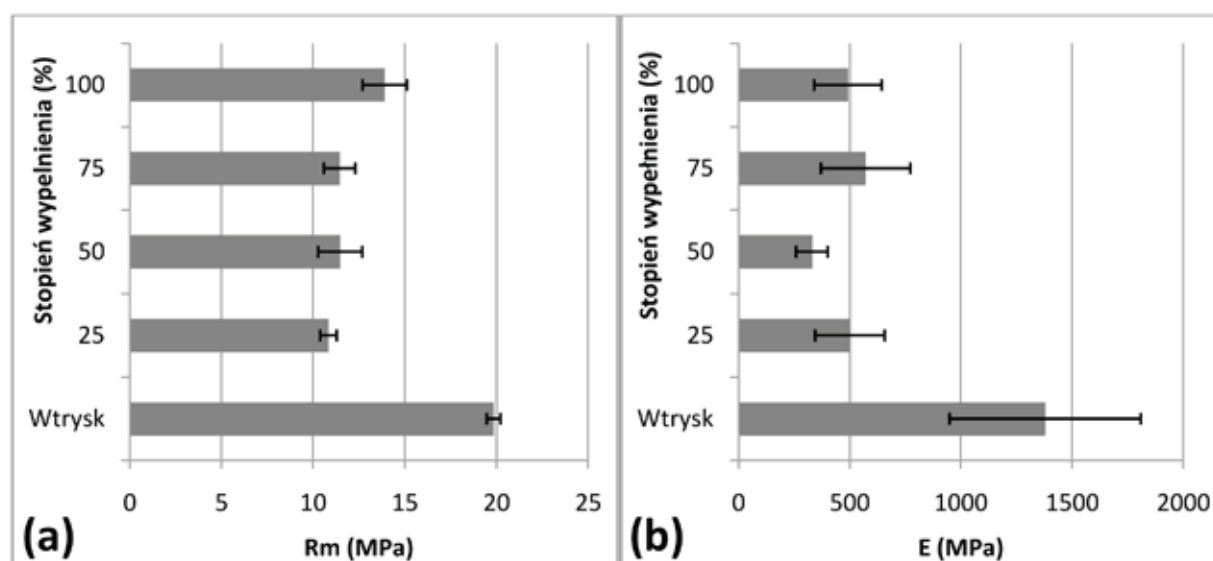
wypełnienia (rys. 8). Najwyższą wytrzymałość posiadają próbki drukowane przy pełnym stopniu wypełnienia, a najniższą przy 25% stopniu wypełnienia. Zmniejszenie stopnia wypełnienia nie wpływa równocześnie na odkształcenie podczas pęknięcia, pozwalając równocześnie skrócić czas drukowania oraz zmniejszyć ilość wykorzystanego materiału.

Przedstawione na rys. 8 zdjęcia przekrojów próbek po procesie statycznego rozciągania pokazują, jak wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia następuje zmniejszenie ilości pustych przestrzeni w próbce.





Rys. 8. Przełomy próbek wydrukowanych przy różnym stopniu wypełnienia  
 Fig. 8. Breakthroughs samples printed with different degrees of filling



Rys. 9. Właściwości mechaniczne próbek wykonanych technologią przetwórstwa wtryskowego i technologią FDM, przy różnym stopniu wypełnienia: (a) wytrzymałość przy rozciąganiu, (b) moduł Younga

Fig. 9. Mechanical properties of samples made with injection moulding and FDM technology, with different filling degree: (a) tensile strength, (b) Young's modulus

Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga próbek wykonanych w technice przyrostowej oraz technologią przetwórstwa wtryskowego przedstawiono na rys. 9.

Analizując wyniki właściwości mechanicznych (rys. 9) stwierdzić można, że próbki drukowane posiadają średnio wytrzymałość mechaniczną wynoszącą: 11,9 MPa. Zwiększenie stopnia wypełnienia powodowało wzrost wytrzymałości z 10,8 MPa, dla próbek wydrukowanych z 25% stopniem wypełnienia do 13,9 MPa, dla próbek wydrukowanych ze 100% stopniem wypełnienia. Przy czym wytrzymałość próbek wydrukowanych przy pełnym stopniu wypełnienia utrzymywała się na poziomie 70% wartości osiąganych przez próbki wytworzone technologią przetwórstwa wtryskowego.

Znaczące różnice pomiędzy próbkami drukowanymi a wtryskiwanymi zauważono w przypadku wartości odkształcenia oraz Modułu Younga. Próbki drukowane posiadały średnio odkształcenie wynoszące 10%. Równocześnie zmiana stopnia wypełnienia próbek nie powodowała różnic w ich sztywności (moduł Younga) oraz odkształceniu podczas pęknięcia. Różnice obu tych parametrów mieściły się w przedziale odchyłeń standardowych.

## 5. WNIOSKI

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania kompozytu PVB/PP (25/75), jako materiału do druku. Materiał ten posiada dobre właściwości mechaniczne oraz wysoki wskaźnik szybkości płynięcia, pozwalający

na wykorzystanie go jako filamentu do druku. Wydruki wykazują się dużą stabilnością, dobrą dokładnością wymiarową, zaś proces może być prowadzony bez podgrzewania platformy drukującej. Korzystnym jest również obniżenie temperatury druku do 175°C w porównaniu do innych materiałów. W konsekwencji prowadzi to do skrócenia czasu chłodzenia oraz zredukowania kosztów produkcji.

## LITERATURA

6. *Wohlers Report: Additive Manufacturing and 3D Printing, State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohler's Associates, Inc., 2016.
7. Gebhardt, A., Kessler, J., & Thurn, L. (2016). *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des additive manufacturing (AM)*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
8. <https://www.aniwaa.com>, dostęp dnia: 14.11.2018 r.
9. Czerwiński, K., & Czerwiński, M. (2013). *Drukowanie w 3D*. InfoAudit.
10. Górski, F., Wichniarek, R., Andrzejewski, J. (2012). *Wpływ orientacji części na wytrzymałość modeli z ABS wytwarzanych techniką modelowania uplastycznionym tworzywem polimerowym*. *Przetwórstwo tworzyw*, 18(5), 428-435.
11. Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., Marinescu, R. (2018). *FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review*. *Polymer Testing*, 69, 157-166.
12. Tartakowski, Z., Mydłowska, K. (2015). *Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM*. *Przetwórstwo Tworzyw*, 21(2), 171-175.
13. Mydłowska, K., & Tartakowski, Z. (2015). *Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM z poliamidu*. *Przetwórstwo Tworzyw*, 21 (6), 467-472.
14. Czyżewski, P., Bieliński, M., Sykutera, D., Jurek, M., Gronowski, M., Ryl, Ł., Hoppe, H. (2018). *Secondary use of ABS co-polymer recyclates for the manufacture of structural elements using the FFF technology*. *Rapid Prototyping Journal*, 24(9), 1447-1454.
15. Novakova-Marcincinova, L., Novak-Marcincin, J., Barna, J., Torok, J. (2012). *Special materials used in FDM rapid prototyping technology application*. In *Intelligent Engineering Systems (INES), 2012 IEEE 16th International Conferenc.* 73-76.
16. Novakova-Marcincinova, L., & Kuric, I. (2012). *Basic and advanced materials for fused deposition modeling rapid prototyping technology*. *Manuf. and Ind. Eng*, 11(1), 24-27.
17. Dudek, P. F. D. M. (2013). *FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements*. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1415-1418.
18. Tartakowski Z., Mydłowska K., *Materiał do druku techniką modelowania uplastycznionym tworzywem sztucznym*, PL 230118 B1 (2015).
19. Carrot, C., Bendaoud A., Pillon, C. (2016). *Polyvinyl Butyral*, w: *Handbook of Thermoplastics*, red. Olabisi, O., Adewale, K., ACRC Press, 89-138.
20. Tartakowski, Z., Cimander, K. (2017). *Nowe materiały kompozytowe z recyklatu PVB*. *Nowoczesne materiały polimerowe i ich przetwórstwo*, pod red. Klepka, T., Politechnika Lubelska, 191-208.
21. Tartakowski, Z., Cimander, K., & Bursa, J. (2018). *New polymer construction materials for applications in electrical engineering*. In *Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering (i-MITEL)*, IEEE.
22. <http://www.zamakmercator.pl>, dostęp dnia 22.11.2018 r.
23. Hopkins P. E., *Material and method for three-dimensional modeling*, US 6869559 B2 (2003).

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 17-11-2018

Data akceptacji publikacji do druku: 29-11-2018