

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz.¹⁾

ORCID: 0000-0001-5114-7932

dr inż. Jarosław Kalinowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-8922-4788

dr inż. Mariusz Kosin^{1)*)}

ORCID: 0000-0003-2683-7784

Wytrzymałość na rozciąganie elementów drukowanych z materiałów ABS, PA6+CF15, PA12+CF15

Tensile strength of elements printed from ABS, PA6+CF15, PA12+CF15 materials

DOI: 10.15199/33.2022.10.21

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie próbek filamentów ABS i modyfikowanych włóknem węglowym filamentów PA6 i PA12 wykonanych w technologii druku przestrzennego. Badania mają na celu określić właściwości mechaniczne struktur 3D, z których będą realizowane planowane modele konstrukcyjne. Przedstawiono sposób wykorzystania druku 3D do prototypowego wytworzenia montażowej wkładki usztywniającej ceowe profile zimnogięte stosowane w budownictwie szkieletowym.

Słowa kluczowe: druk 3D; filament, badania wytrzymałościowe; profile zimnogięte.

Abstract. The article presents the results of tensile strength tests of samples made in the 3D printing technology for ABS filaments and PA6 and PA12 filaments modified with carbon fiber. The performed tests are aimed at determining the mechanical properties of 3D structures from which the planned structural models will be implemented. A method of using 3D printing for the prototype production of an assembly insert that stiffens C-shaped cold-bent profiles used in frame construction is presented.

Keywords: 3D printing; filament; strength tests; cold-formed profiles.

Technologia druku przestrzennego 3D znalazła zastosowanie m.in. w procesie wytwarzania elementów prototypowych. Zastosowanie jej do tworzenia elementów konstrukcyjnych wymaga poznania parametrów mechanicznych materiałów, z których te elementy będą wykonane. Należy wykorzystywać materiały, które charakteryzują się jak największą wytrzymałością mechaniczną, ale wiąże się to z dużym kosztem materiału oraz wydruku. Powszechnie stosowane filamenty ABS i PLA cechuje łatwość wykonania druku oraz niewielki koszt. Są one wykorzystywane w technologii przyrostowej druku 3D FDM (*fused deposition modeling*). Dostępne są również filamenty na bazie nylonu wzmocnionego ciętym włóknem węglowym, które charakteryzuje zwiększona wytrzymałość, ale są droższe od filamentów ABS czy PLA oraz trudniejszy jest proces druku.

W artykule zaprezentowano wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie próbek filamentów ABS i modyfikowanych włóknem węglowym filamentów

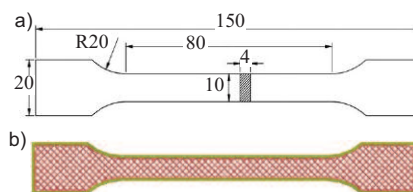
PA6 i PA12, wykonanych w technologii FDM. Badania przeprowadzono na próbkach o założonej strukturze wewnętrznej i różnej gęstości ich wypełnienia. Przedstawiono również sposób wykorzystania małowagowego druku 3D do prototypowego wytworzenia montażowej wkładki usztywniającej ceowe profile zimnogięte stosowane w budownictwie szkieletowym.

Materiał, struktura i przygotowanie próbek

Próbki do badań, wg normy PN-EN ISO 527-2:2012 [1] przedstawione na rysunku 1a, wykonano w technologii wytwarzania przyrostowego FDM, która polega na nakładaniu filamentu warstwowo podgrzanego do odpowiedniej temperatury. Do wydruku próbek przyjęto trzy filamenty: ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren), który jest otrzymywany w procesie polimeryzacji butadienu i kopolimeryzacji akrylonitrylu ze styrenem oraz PA6 i PA12 wykonane z poliamidu (nylonu) [2, 3]. Różnica pomiędzy nylonem PA6 a PA12 wynika z budowy struktury chemicznej [4]. Oba zastosowane w badaniach filamenty z poliamidu wzmocniono ciętymi

włóknami węglowymi w ilości 15%, uzyskując w ten sposób filamenty PA6+CF15 oraz PA12+CF15. Zawartość włókien węglowych w nylonie sprawia, że proces drukowania staje się bardziej wymagający i kosztowny.

Głównym celem druku przestrzennego jest przekształcenie modelu przygotowanego w programie Slicer (rysunek 1b) na obiekt fizyczny [5]. W tym celu należy przyjąć odpowiednią strukturę druku i dokonać podziału modelu 3D na warstwy poziome wg programu wzoru wybranego z bibliotek. Następnie trzeba określić grubość poszczególnych warstw,



Rys. 1. Próbkę do badania wytrzymałości: a) model próbki wg PN-EN ISO 527-2:2012 [1], wymiary [mm]; b) struktura wewnętrzna wydruku przygotowana w programie Slicer

Fig. 1. Sample for strength tests: a) sample model according to PN-EN ISO 527-2:2012 [1], dimensions [mm]; b) internal structure of the printout set in the Slicer software

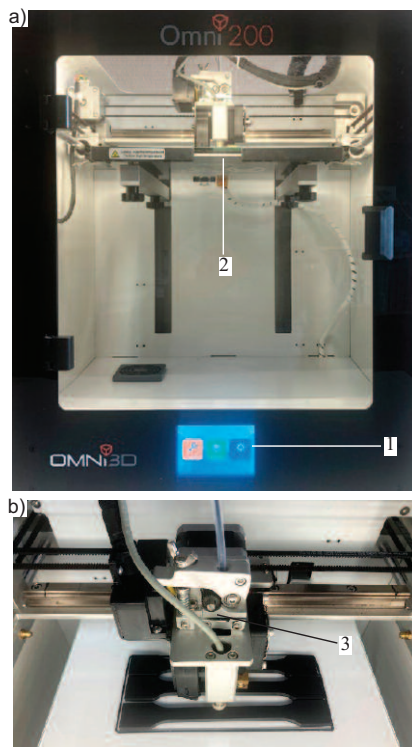
¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa
^{*)} Adres do korespondencji: mariusz.kosin@pcz.pl

a także zdefiniować prędkość oraz temperaturę, z jaką ma pracować głowica drukarki. Dzięki tym ustawieniom możemy wpływać na tworzone struktury przestrzenne odzwierciedlające obiekty 3D, mając na uwadze fakt, że ich wytrzymałość będzie inna niż materiału, z którego zostaną wykonane [6, 7]. Wewnętrzna struktura badanych próbek bazuje na liniach równoległych, drukowanych na każdej warstwie w jednym kierunku, przy czym naprzemiennie linie każdej kolejnej warstwy obracane są o 90° (rysunek 1b). Przyjęte wypełnienie pozwala na szybkie drukowanie, ponieważ głowica drukarki porusza się wyłącznie linowo. Gęstość wypełnienia ustawionym wzorem uzyskano na trzech poziomach odpowiednio 37, 55 i 100%. Założony stopień wypełnienia miał na celu określenie jego wpływu na wytrzymałość badanych próbek, dając tym samym możliwość określenia optymalnej gęstości próbki do praktycznego jej zastosowania i ściśle określonych oddziaływań. Przyjęto, że mniejszy stopień wypełnienia można zastosować w przypadku elementów poddanych niewielkim obciążeniom.

Modele próbek przygotowane zostały w programie AutoCad zgodnie z normą PN-EN ISO 527-2:2012 [1] i wydrukowane na drukarce Omni 200CF (fotografia 1), charakteryzującej się średnicą dyszy 0,75 mm, umożliwiającej pracę głowicy w temperaturze do 400°C. Ustawienia drukowania każdego filamentu, z wyjątkiem temperatury głowicy, były takie same. Wysokość warstw wynosiła 0,2 mm, natomiast grubość ścianek wzoru wewnętrznego 0,45 mm. Elementy drukowano z maksymalną prędkością: 90 mm/s – w przypadku filamentu ABS, 60 mm/s – PA6+CF15, a 48 mm/s – PA12+CF15. Temperatura badanych filamentów wynosiła odpowiednio: ABS – 230°C; PA6+CF15 – 280°C; PA12+CF15 – 290°C.

Statyczna próba rozciągania

Próbę rozciągania przeprowadzono zgodnie z PN-EN ISO 527-2:2012 [1] na dwukolumnowej maszynie wytrzymałościowej LG LIANGONG TESTING o największym obciążeniu 100 kN (fotografia 2). Długość mocowania próbek w zaciskach maszyny wynosiła 21,77 ± 5 mm, a prędkość testowania 2 mm/min.



Oznaczenia:
1 – wyświetlacz, 2 – platforma robocza, 3 – ekstruder

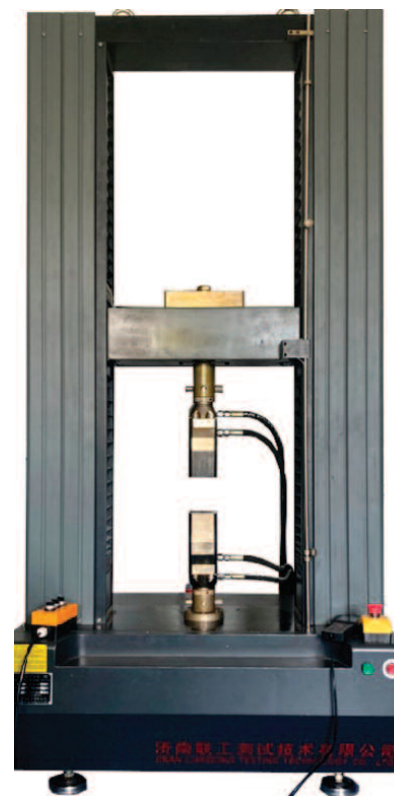
Fot. 1. Drukarka Omni 200CF zastosowana do druku próbek w technologii FDM: a) widok drukarki; b) widok modułu drukującego i drukowanych próbek

Photo 1. The Omni 200CF printer used to print samples in the FDM technology: a) view of the printer; b) view of the printing module and printed samples

Celem statycznej próby rozciągania było porównanie wytrzymałości na rozciąganie próbek o założonej gęstości wypełnienia wynoszącej odpowiednio 37, 55 i 100%, wydrukowanych z filamentów ABS, PA6+CF15 oraz PA12+CF15. Zakres przeprowadzonych badań obejmował wykonanie próby rozciągania pięciu próbek z każdego wymienionego filamentu. Pozwoliło to na ocenę powtarzalności wytwarzania próbek w następnym wykonaniu druku z uwzględnieniem użytego materiału oraz przyjętego stopnia zagęszczenia ich struktury wewnętrznej.

Wyniki i ich analiza

Uzyskane wyniki z przeprowadzonych prób rozciągania próbek wykonanych w technologii FDM z filamentów: ABS,



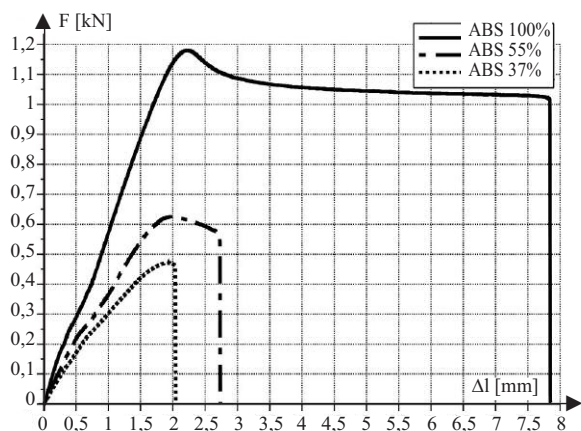
Fot. 2. Maszyna wytrzymałościowa LG LIANGONG TESTING zastosowana do próby rozciągania wydrukowanych próbek
Photo 2. LG LIANGONG TESTING machine used for tensile test of printed samples

PA6+CF15 oraz PA12+CF15, w przypadku założonej gęstości wypełnienia wynoszącej odpowiednio: 37, 55 i 100%, przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunkach 2 ÷ 4. Są to minimalne wartości uzyskane w badaniu rozciągania próbek każdego z badanych filamentów.

Wszystkie próbki analizowanych materiałów o gęstości wypełnienia 100% wykazały największą wytrzymałość na rozciąganie, co niewątpliwie jest wynikiem przewidywalnym. W przypadku

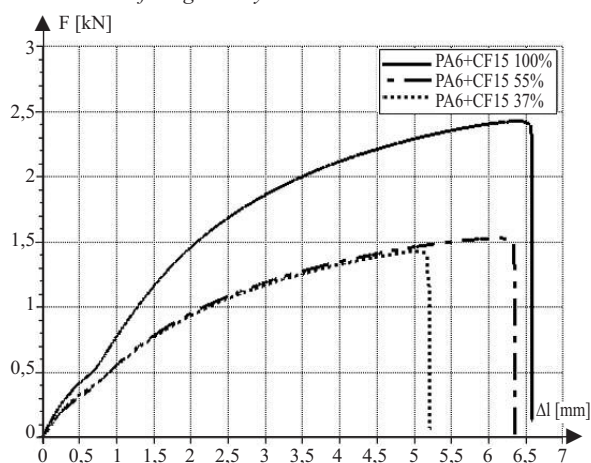
Wyniki uzyskane w statycznej próbie rozciągania
Results obtained in a static tensile test

| Filament | Założona gęstość wypełnienia [%] | Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] | | | | Cena filamentu [PLN/kg] |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|--------|---------|------------------------|-------------------------|
| | | min | max | średnia | odchylenie standardowe | |
| ABS | 37 | 11,800 | 12,550 | 12,200 | 0,015177 | 72 |
| | 55 | 15,625 | 16,475 | 15,900 | 0,013307 | |
| | 100 | 28,925 | 29,500 | 29,275 | 0,012097 | |
| PA6+CF15 | 37 | 35,625 | 37,925 | 36,925 | 0,046130 | 299 |
| | 55 | 33,775 | 38,175 | 35,750 | 0,089370 | |
| | 100 | 57,600 | 60,650 | 59,525 | 0,067241 | |
| PA12+CF15 | 37 | 31,100 | 31,200 | 31,125 | 0,002082 | 178 |
| | 55 | 30,800 | 31,275 | 30,975 | 0,010214 | |
| | 100 | 44,025 | 45,350 | 44,550 | 0,027979 | |



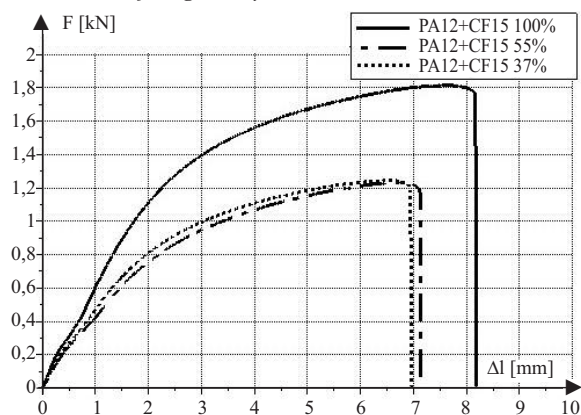
Rys. 2. Trawersy maszyny w przypadku próbek z filamentu ABS o wypełnieniu 37, 55 i 100% – zależność między siłą a przemieszczeniem

Fig. 2. Graph showing the relationship between force and displacement for samples made of ABS filament with 37, 55 and 100% filling density



Rys. 3. Trawersy maszyny w przypadku próbek z filamentu PA6+CF15 o wypełnieniu 37, 55 i 100% – zależność między siłą a przemieszczeniem

Fig. 3. Graph showing the relationship between force and displacement for PA6+CF15 filament samples with 37, 55 and 100% filling density



Rys. 4. Trawersy maszyny w przypadku próbek z filamentu PA12+CF15 o wypełnieniu 37, 55 i 100% – zależność między siłą a przemieszczeniem

Fig. 4. Graph showing the relationship between force and displacement for PA12+CF15 filament with samples 37, 55 and 100% filling density

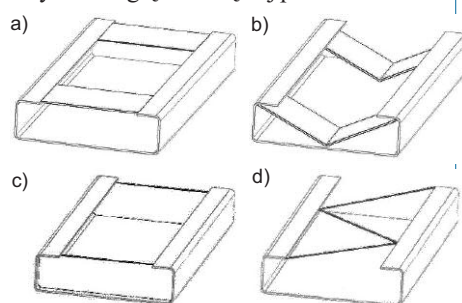
próbek wydrukowanych z filamentu ABS o gęstości wypełnienia 100%, wytrzymałość na rozciąganie jest prawie dwukrotnie większa niż próbek o gęstości wypełnienia 55%. Próbkę wzmocnioną ciętym włóknem węglowym PA6+CF15 o gęstości wypełnienia 100% wykazały wytrzymałość na rozciąganie o ok. 60% większą w porównaniu z próbkami wypełnionymi w 55%, a próbki wydrukowane z PA12+CF15 charakteryzowały się zwiększeniem wytrzymałości na rozciąganie na poziomie 43% w porównaniu z próbkami o gęstości wypełnienia 55%. W przypadku filamentu ABS wytrzymałość na rozciąganie próbki o gęstości wypełnienia 55% jest o ok. 22% większa od próbki wypełnionej w 37%. Próbkę wydrukowaną z filamentów PA6+CF15 i PA12+CF15, tj. z poliamidu wzmocnionego ciętymi włóknami węglowymi w ilości 15%, przy gęstości wypełnienia odpowiednio 37 i 55% wykazały ok. trzykrotnie większe wydłużenie w porównaniu z próbkami z filamentu ABS. Ponadto analizując wyniki rozciągania próbek z filamentów PA6+CF15 i PA12+CF15 o gęstości wypełnienia 37 i 55% zauważono, że nie ma między nimi istotnej różnicy, co potwierdzają rysunki 3 i 4.

W przypadku próbek wydrukowanych z poliamidu wzmocnionego włóknem węglowym o trzech analizowanych gęstościach wypełnienia, stwierdzono, że uzyskane wykresy charakteryzują się przebiegiem krzywej bez wyraźnej granicy plastyczności (rysunki 3 i 4). Inaczej wygląda przebieg krzywej w przypadku próbek wydrukowanych z filamentu ABS o gęstości

wypełnienia 100%. Próbkę po osiągnięciu maksymalnej siły rozciągającej nie ulega natychmiastowemu zerwaniu, jak ma to miejsce w przypadku pozostałych próbek wydrukowanych z tego samego filamentu o gęstości wypełnienia wynoszącej 37 i 55%.

Przykład zastosowania druku 3D do usztywnień stalowych profili cienkościennych

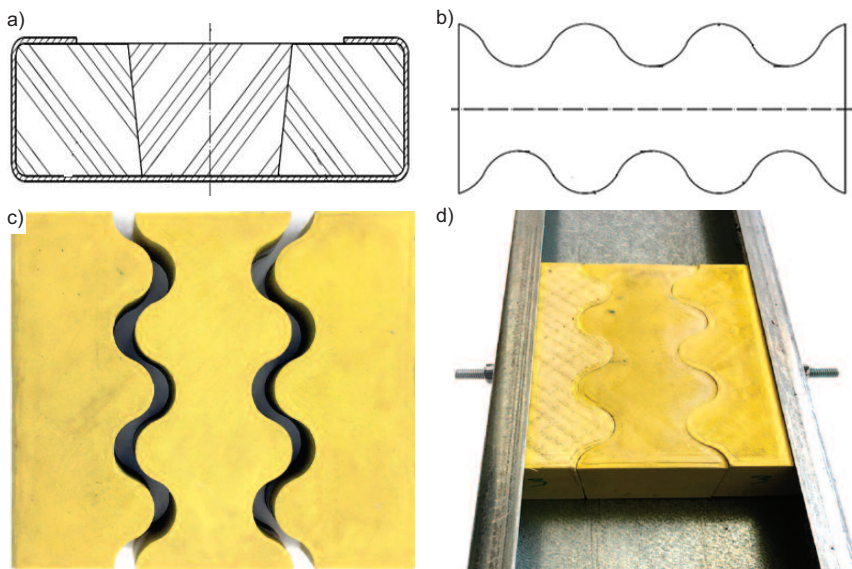
Usztywnienie prętów cienkościennych o przekroju otwartym może odbywać się na całej długości profilu lub punktowo w postaci przedstawionej na rysunku 5. Tego typu usztywnienia ograniczają deplanację przekroju poprzecznego pręta, zmniejszając siły wewnętrzne i przemieszczenia [8]. Wymienione sposoby usztywnienia można stosować z powodzeniem podczas wykonywania konstrukcji, ale podczas prac naprawczych budynku może to naruszyć antykorozyjną ochronę profili tworzących szkielet konstrukcyjny. W związku z tym opracowaliśmy alternatywny sposób usztywnienia profili zimnogiętych, bazujący na trójsegmentowej wkładce montażowej, umożliwiającej osadzenie usztywnienia w przestrzeni profilu w dowolnym momencie realizacji konstrukcji, w tym także podczas remontu istniejącego obiektu. W artykule [9] wykazano, na podstawie wykonanych analiz numerycznych, że z chwilą zdjęcia poszycia zewnętrznego w postaci płyt OSB uzasadnione jest zastosowanie stężeń w celu zachowania stateczności bryły budynku. W następstwie tego opracowano metodę naprawczą, której celem jest zwiększenie sztywności giętno-skrętnej profili zimno-



Rys. 5. Sposoby punktowych usztywnień zimnogiętych profili ceowych: a) przewiązka klasyczna; b) przewiązka zmodyfikowana; c) przepona; d) skratowanie [8]

Fig. 5. Methods of point stiffening of cold-formed C-profiles: a) classic brace; b) modified brace; c) diaphragm; d) lattice [8]

giętych typu C, stanowiących nośny szkielet konstrukcji. Wykorzystano wynalazek wykonany w technologii druku przestrzennego, zgłoszony do Urzędu Patentowego w Polsce pod numerem 234488, który uzyskał ochronę patentową 11.02.2020 r., opublikowaną 30.04.2020 r. w Wiadomościach Urzędu Patentowego 04/20 [10]. Opracowane usztywnienie przedstawiono na rysunku 6. Jest ono wykonane z trzech segmentów o wymiarach dopasowanych do przestrzeni wewnętrznej profilu zimnogiętego, określonej geometrią kształtu profilu.



Rys. 6. Rozwiązanie usztywnienia ceowych stalowych profili zimnogiętych: a) przekrój w płaszczyźnie pionowej; b) widok z góry środkowego elementu klinującego wkładkę; c) widok trzech segmentów tworzących usztywnienie; d) widok usztywnienia w profilu [9, 10]
Fig. 6. The solution for stiffening C-shaped steel cold-bent profiles: a) section in the vertical plane; b) top view of the central element wedging the insert; c) view of the three segments forming the stiffener; d) view of the stiffening in the profile [9, 10]

Materiałem wykorzystanym do wydrukowania opracowanej wkładki usztywniającej był filament ABS. Badania giętno-skrętne tak wytworzonego elementu przeprowadzono na profilach zimnogiętych typu C. Celem analizy było określenie sztywności giętno-skrętnej profilu zimnogiętych bez usztywnienia i z usztywnieniem opracowaną wkładką montażową. Uzyskane wyniki jednoznacznie wykazały zwiększoną sztywność profili wzmocnionych elementami wykonanymi w technologii druku 3D w porównaniu z profilami nieusztywnionymi [9].

Podsumowanie

Technologia druku przestrzennego dobrze sprawdza się w przypadku wytwarzania produktów nieseryjnych lub proto-

typowych, czego przykładem jest prezentowany wynalazek montażowej wkładki usztywniającej do usztywnienia zimnogiętych profili ceowych. Stosując technologię druku przestrzennego, należy mieć na uwadze fakt, że wytworzone elementy zmieniają swoje właściwości mechaniczne w zależności od użytego materiału, przyjętej struktury i gęstości wypełnienia. Wydaje się więc zasadne wykonywanie badań określających właściwości mechaniczne struktur 3D, z których będą realizowane modele konstrukcyjne, w celu ich weryfikacji doświadczalnej.

nych, prototypowych lub przeznaczonych do konkretnych jednostkowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Potwierdzone badaniami [9] zwiększenie sztywności giętno-skrętnej profili zimnogiętych, wzmocnionych wkładką montażową wytworzoną w technologii druku 3D z filamentu ABS może sugerować, że zastosowanie filamentów PA6+CF15 oraz PA12+CF15, tj. z materiałów z dodatkiem włókna węglowego, wpłynie również na zwiększenie sztywności profilu zimnogiętego z wykonaną z tych filamentów wkładką montażową. W ramach projektu Inkubator Innowacyjności 4.0 podejmujemy dalsze badania nad wkładką usztywniającą.

Literatura

- [1] PN-EN ISO 527-2:2012, 2013. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania.
- [2] Hwang S, Moon K, Rumpf R. Thermo-mechanical characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials*, Springer Science+Business Media 2015.
- [3] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. 2018. *Composites Part B* 143.
- [4] Kelar K, Jurkowski B, Mencil K. Struktura i właściwości mieszaniny poliamidu 6 z poliamidem 12, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. 2009; 29, nr 1. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [5] Tankielna N, Wittbrodt B, Pearce J. Tensile Strength of Commercial Polymer Materials for Fused Filament Fabrication 3D Printing, *Additive Manufacturing*, 2017; DOI: 10.1016/j.addma.2017.03.005.
- [6] McMillis Z. 3D printing basics for entertainment design. Taylor & Francis Ltd Florida, 2017.
- [7] Harshit K, Dave J, Davim P. Fused Deposition Modeling Based 3D Printing, Springer. 2021.
- [8] Gosowski B. Zginanie i skręcanie cienkościennych elementów konstrukcji metalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2015. Wrocław.
- [9] Kosiń M, Major I, Major M, Kalinowski J. Model Tests of Bending and Torsional Deformations of Thin-Walled Profiles Stiffened with Elements Made in 3D Printing Technology, *Case Studies in Construction Materials*. 2020; DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00401.
- [10] Major M, Kalinowski J, Kosiń M. Wkładka usztywniająca, zwłaszcza cienkościennych profili typu C, *Politechnika Częstochowska*, 234844, *Wiadomości Urzędu Patentowego* 04/2020.

Artykuł powstał w ramach realizowanego programu „Inkubator Innowacyjności 4.0” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Przyjęto do druku: 26.09.2022 r.