

Łukasz PEJKOWSKI, Angela ANDRZEJEWSKA

**WYTRZYMAŁOŚĆ POJEDYNCZEJ WARSTWY
POLILAKTYDU (PLA) WYKONANEJ METODĄ DRUKU 3D
W WARUNKACH MONOTONICZNEGO ROZCIĄGANIA**

Streszczenie: Druk trójwymiarowy jest jedną z najprężniej rozwijających się technik wytwarzania prototypów i małoseryjnych wyrobów. Właściwości mechaniczne elementów konstrukcyjnych wytwarzanych metodą druku 3D zależą od rodzaju użytego materiału oraz przyjętych parametrów, takich jak wysokość warstwy i ukierunkowanie włókien materiału. W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości mechanicznej w warunkach jednoosiowego rozciągania pojedynczej warstwy wydruku trójwymiarowego, wykonanego z polilaktydu (PLA).

Słowa kluczowe: polilaktyd, próba monotonicznego rozciągania, druk 3D

1. WSTĘP

Poszukiwanie nowych materiałów i metod ich obróbki doprowadziło w ostatnich latach do szybkiego rozwoju addytywnych technik wytwarzania. Wśród metod takich, jak selektywne spiekanie proszków (SLS), stereolitografia (SLA), topnienie za pomocą wiązki elektronów (EBM), jedną z najczęściej wykorzystywanych metod addytywnych jest drukowanie trójwymiarowe, zwane również metodą FDM. Jest to metoda szybkiego prototypowania lub szybkiego wytwarzania, dostępna zarówno dla użytkowników indywidualnych, jak również w zastosowaniach komercyjnych. Druk 3D stosowany jest m.in. w tworzeniu prototypów nowych rozwiązań inżynierskich [5], wyrobów wzorniczych, a także coraz częściej w planowaniu przedoperacyjnym [1] lub w inżynierii tkankowej [2]. Wśród materiałów termoplastycznych, wykorzystywanych w drukowaniu trójwymiarowym wykorzystuje się głównie kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy (ABS) oraz biodegradowalny polikwas mlekowy, czyli polilaktyd (PLA).

Wytrzymałość mechaniczna wydruków trójwymiarowych determinowana jest przez parametry wydruku, takie jak: orientacja ekstrudowanych włókien, wysokość pojedynczej warstwy, a także stopień wypełnienia powierzchni wydruku [3]. W podejściu przemysłowym istotna jest znajomość zachowania pojedynczej warstwy drukowanego wyrobu [4], a także wpływ liczby warstw na jego wytrzymałość mechaniczną [4].

dr inż. Łukasz PEJKOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
e-mail: lukasz.pejkowski@utp.edu.pl

mgr inż. Angela ANDRZEJEWSKA, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
e-mail: angela.andrzejewska@utp.edu.pl

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań wytrzymałości mechanicznej pojedynczej warstwy wydruku, wykonanej z polilaktydu w próbie jednoosiowego rozciągania.

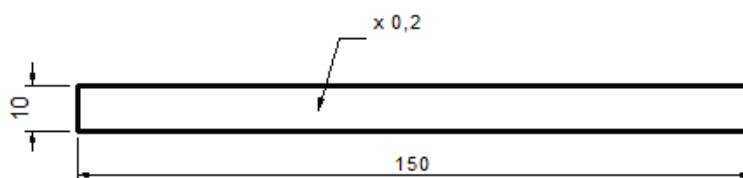
Zakres badań obejmował przeprowadzenie próby monotonicznego rozciągania na próbkach wykonanych w dwóch wariantach ułożenia ścieżek wypełniających wydruk: pod kątem 45° i 90° w stosunku do osi próbki. Wykonano pięć sztuk próbek na wariant.

2. MATERIAŁY I METODY

Próbki do badań wykonano w technologii druku 3D, z użyciem drukarki DaVinci 1,0 A firmy XYZ Printing, wyposażonej w ekstruder o średnicy 0,4 mm. Jako materiał do wykonania próbek zastosowano oryginalny filament firmy XYZ Printing, bez dodatku pigmentów, o średnicy 1,75 mm. Druk przeprowadzono dla następujących paramentów technologicznych:

- wysokość warstwy: 0,2 mm,
- szerokość obwiedni: „normal” (dwie ścieżki),
- prędkość wydruku: „slow” (zalecana przez producenta dla wydruków o dużej jakości),

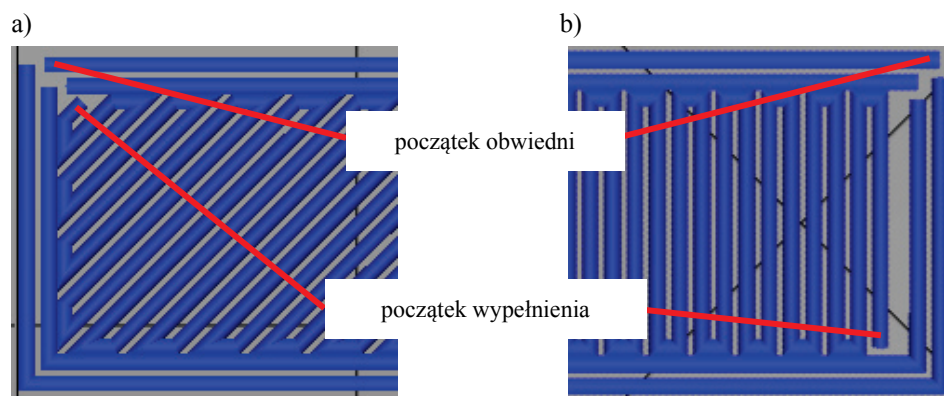
Do przeprowadzenia badań zastosowano procedurę opisaną w normie EN ISO 527-1. Ze względu na małą grubość próbek, ich geometrię opracowano na podstawie normy EN ISO 527-3, dotyczącej folii i płyt. Wymiary próbki typu 2 wg wspomnianej normy przedstawiono na rysunku 1. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron ElectroPuls E3000, o zakresie siły ± 3000 N, z prędkością przemieszczenia trawersu wynoszącą 1 mm/min. Próby prowadzono do zniszczenia próbki.



Rys. 1. Wymiary próbek do badań

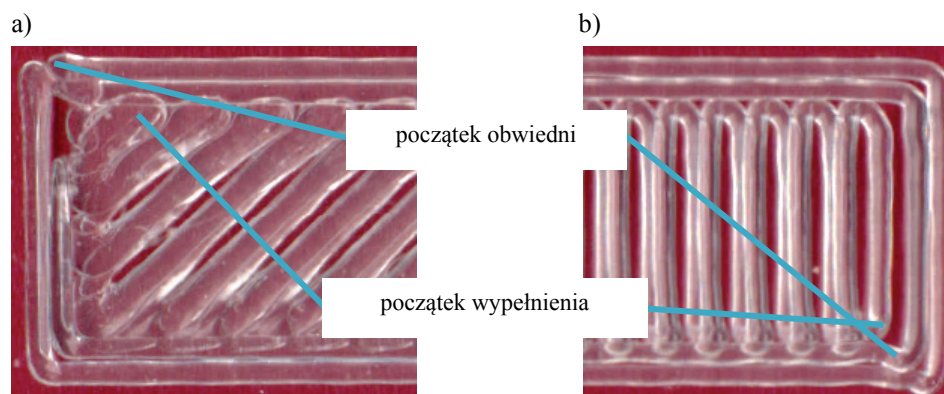
Fig. 1. Specimens dimensions

Próbki wydrukowano w dwóch wariantach (rys. 2 i 3). W pierwszym, ścieżki stanowiące wypełnienie, ułożone zostały pod kątem 45° w stosunku do osi próbki, a w drugim pod kątem 90° .



Rys. 2. Zrzut ekranu z programu XYZware, służącego do generowania ścieżki wydruku; fragmenty dwóch wariantów próbek zastosowanych do badań: a) ścieżki wypełniania ułożone pod kątem 45° do osi próbki i b) pod kątem 90°

Fig. 2. Screenshot of XYZware used to generate the toolpath; fragments of two specimen print variants: a) toolpaths positioned at 45° angle to the specimen's axis and b) at 90° angle



Rys. 3. Zdjęcie fragmentu próbki po wydruku: a) ścieżki wypełniania ułożone pod kątem 45° do osi próbki i b) pod kątem 90°

Fig. 3. Printed specimen fragment: a) toolpaths positioned at 45° angle to the specimen's axis and b) at 90° angle

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

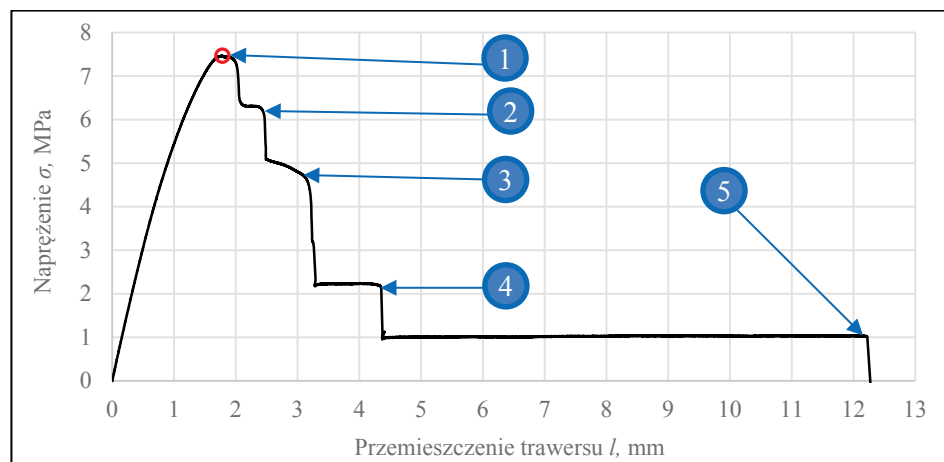
W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono maksymalną siłę F_{max} , wskazaną przez siłomierz maszyny wytrzymałościowej, odpowiadającą wytrzymałości na monotoniczne rozciąganie σ_M (czerwony punkt na rys. 4-6). Mimo że materiał nie jest jednorodny założono, że siłę F_{max} należy odnieść do pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki, podobnie jak ma to miejsce w przypadku materiałów porowatych, np. kości [6].

Oprócz wymienionych powyżej punktów, na wykresach zauważyć można inne charakterystyczne punkty, oznaczone cyframi od 1 do 5. Punkt 1 odpowia-

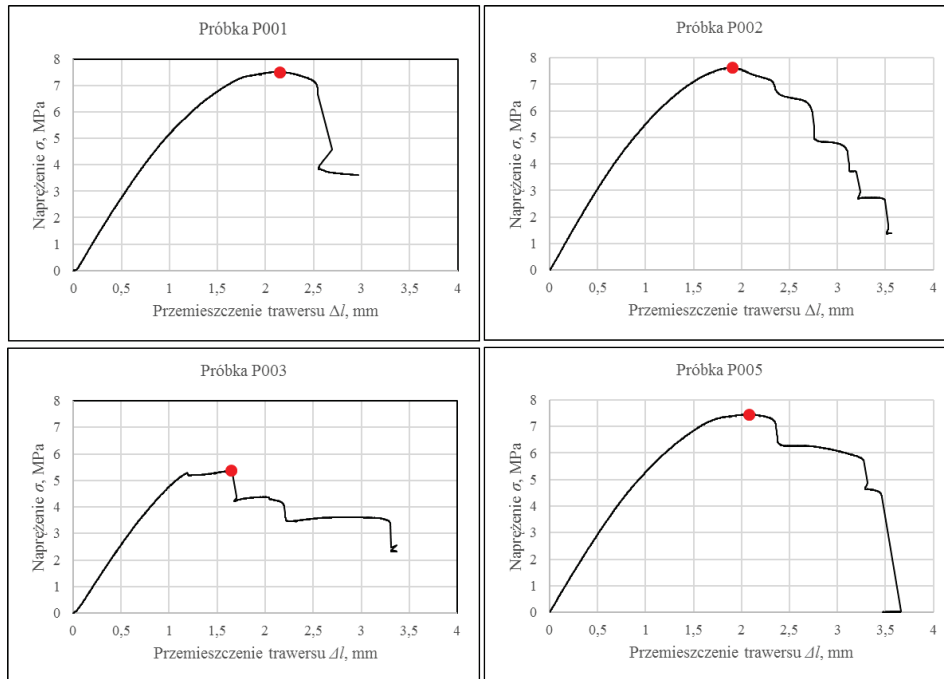
da zniszczeniu połączenia pomiędzy ścieżkami wypełnienia (rys. 3) i należy go jednocześnie uznać za koniec próby. Kolejne punkty zostały przypisane do chwili pęknięcia kolejnych pasm obwiedni. Kolejność ich pęknięcia ma charakter losowy. Nie dla wszystkich próbek punkty od 2 do 5 są zauważalne. W niektórych przypadkach zniszczenie kilku pasm obwiedni występowało jednocześnie, przykłady przedstawiono na rysunkach 5 i 7.

Wyniki dla wszystkich przeprowadzonych prób zamieszczono w tabeli 1. Dla obu wariantów próbek otrzymano wysoką powtarzalność wyników. W przypadku próbek wariantu pierwszego, średnia wartość σ_M wyniosła 7,52 MPa, a odchylenie standardowe 0,08 MPa (z pominięciem próbki P003, dla której otrzymano znacząco różne wyniki). Dla próbek wariantu 2 było to odpowiednio 5,32 MPa i 0,21 MPa. Wartość średnia i odchylenie standardowe dla σ_y wyniosły 5,16 MPa i 0,33 MPa. Średnia wartość σ_M okazała się być większa dla próbek wariantu 1 o 2,20 MPa, co stanowi ok. 41%.

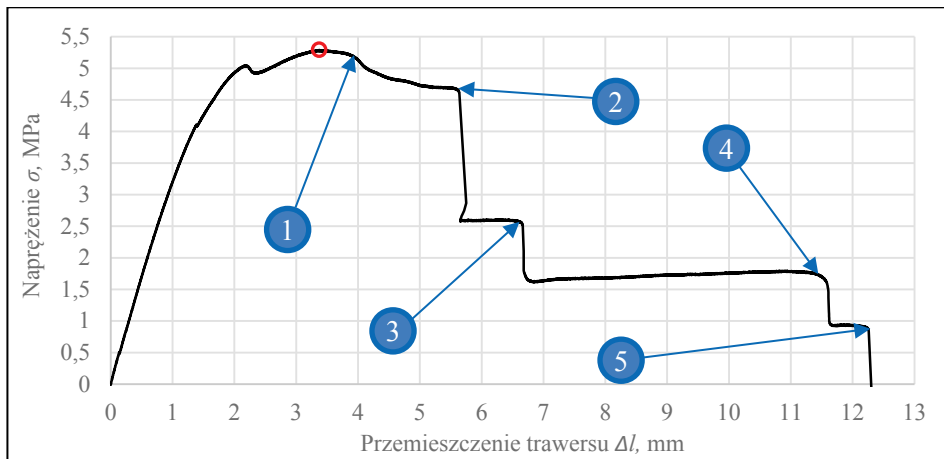
Prawdopodobną przyczyną różnicy w wytrzymałości są różnice w przenoszeniu naprężenia normalnego przez wypełnienie. W przypadku próbek wariantu pierwszego naprężenie to przenoszone jest zarówno przez połączenie między pasmami jak i przez same pasma. Natomiast w przypadku próbek wariantu drugiego naprężenie normalne przenoszą tylko połączenia pomiędzy pasmami wypełnienia.



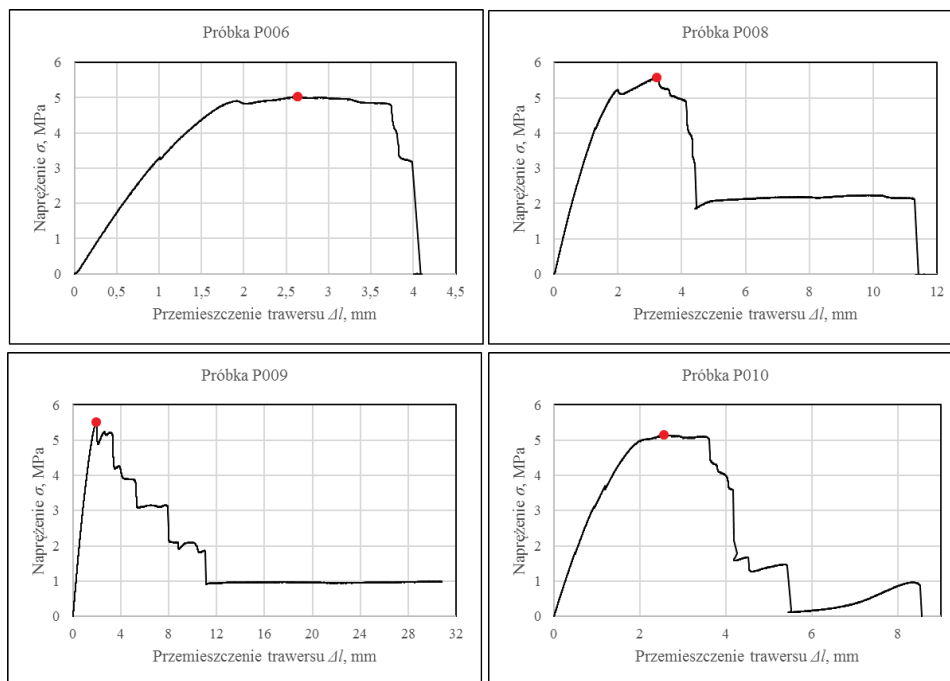
Rys. 4. Wykres próby monotonicznego rozciągania próbki 004 (patrz tab. 1)
Fig. 4. Monotonic tensile test chart for specimen 004 (see tab. 1)



Rys. 5. Wykres próby monotonicznego rozciągania próbek 001-003 i 005 (patrz tab. 1)
Fig. 5. Monotonic tensile test chart for specimen 001-003 and 005 (see tab. 1)



Rys. 6. Wykres próby monotonicznego rozciągania próbki 007 (patrz tab. 1)
Fig. 6. Monotonic tensile test chart for specimen 007 (see tab. 1)



Rys. 7. Wykres próby monotonicznego rozciągania próbki 006 i 008-010 (patrz tab. 1)

Fig. 7. Monotonic tensile test chart for specimen 006 and 008-010 (see tab. 1)

Tabela 1. Wyniki badań

Nr próbki	Kąt nachylenia włókien do osi próbki	Maksymalna siła F_{max} , N	Maksymalne naprężenie σ_M , MPa	Średnia arytmetyczna $\bar{x}$, MPa	Odchylenie standardowe s , MPa
P001	45°	50,65	7,52	7,52	0,08
P002	45°	48,40	7,63		
P003	45°	32,61	5,37		
P004	45°	48,71	7,47		
P005	45°	48,40	7,46		
P006	90°	34,23	5,04	5,32	0,23
P007	90°	36,30	5,29		
P008	90°	36,64	5,59		
P009	90°	39,85	5,52		
P010	90°	35,38	5,15		

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zbadana została wytrzymałość mechaniczna pojedynczej warstwy wydruku trójwymiarowego z PLA o dwóch wariantach ułożenia ekstrudowanych włókien wypełnienia. Próba jednoosiowego rozciągania wykazała, że ukierunkowanie ekstrudowanych włókien pod kątem 45° do osi próbki, przekłada się na wyższą wy-

trzymałość rozciąganego materiału niż w przypadku włókien ułożonych pod kątem 90°. Zaobserwowano, że na obniżenie wytrzymałość warstwy drukowanej wpływa zjawisko powierzchniowego łączenia ukierunkowanych włókien materiału. Ekstrudowane włókna w trakcie procesu drukowania układane są równo obok siebie, pozwalając tym samym na sklejenie, jednakże nie dochodzi do pełnego przetopu materiału poszczególnych włókien. Pod względem zapewnienia oceny wytrzymałości mechanicznej, elementy drukowane należy projektować w taki sposób, aby połączenie między włóknami było możliwie najmniej obciążone.

Na podstawie badań zauważa się, że jednoznaczne określenie właściwości mechanicznych wyrobów drukowanych trójwymiarowo wiąże się z koniecznością przeprowadzenia dodatkowych prób wytrzymałościowych, obejmujących zmienną geometrię próbek, tzn. alternatywne opcje ukierunkowania włókien, a także grubość pojedynczej warstwy wydruku.

LITERATURA

- [1] CHO-PEI Jiang.: Vessel phantom fabrication using rapid prototyping technique for investigating thermal dosage profile in HIFU surgery. *Rapid Prototyping Journal* 16(6), 2010, 417-423.
- [2] DOMINGOS M., CHIELLINI F., GLORIA A., AMBROSIO L., BARTOLO P., CHIELLINI E.: Effect of process parameters on the morphological and mechanical properties of 3D Bioextruded poly(ϵ -caprolactone) scaffolds. *Rapid Prototyping Journal* 18(1), 2012, 56-67.
- [3] IBRAHIM U., IRFAN M.A.: Dynamic crack propagation and arrest in rapid prototyping material. *Rapid Prototyping Journal* 18(2), 2012, 154-160.
- [4] LETCHER T., RANKOUHI B., JAVADPOUR S.: Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters. *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE 2015*, IMECE2015-52634.
- [5] SCHMUTZLER C., ZIMMERMANN A., ZAEH M.F.: Compensating Warpage of 3D Printed Parts Using Free-form Deformation. *Procedia CIRP* 41, 2016, 1017-1022.
- [6] TOPOLINSKI T., CICHANSKI A., MAZURKIEWICZ A., NOWICKI K.: Applying a stepwise load for calculation of the S-N curve for trabecular bone based on the linear hypothesis for fatigue damage accumulation. *Fatigue Failure And Fracture Mechanics* 726, 2012, 39-42.
- [7] TYMRAKA B.M., KREIGERB M., PEARCE J.M.: Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design* 58, 2014, 242-246.

TENSILE MONOTONIC STRENGTH DETERMINATION OF 3D PRINTED SINGLE POLYLACTIDE (PLA) LAYER

Summary: 3D printing is one of the fastest developing technologies of prototypes and small-batch products manufacturing technologies. Mechanical properties of 3D printings depends on the type of material used and applied parameters, like layer height and direction of material fibers. In this work, the results of research on the uniaxial monotonic tensile strength of single 3D printed later made of polylactide (PLA), have been presented.

Key words: polylactide, monotonic tensile test, 3D printing