

Experimental study of the design of strength properties of polymeric support structures

Eksperymentalne studium kształtowania właściwości wytrzymałościowych polimerowych konstrukcji wspornikowych



DOI: 10.15199/62.2024.12.29

A static uniaxial tensile test of specimens obtained from PLA using 3D printing in FDM technol. was carried out. The specimens differed in 3D printing parameters such as the type of filling, filling d ., and the angular orientation of the sample printout. Five filling patterns and 4 angular orientations of the specimens were assessed, in the direction of the printer's X axis, and at an angle of 15° , 30° , and 45° to the X axis. The best strength parameters were characterized by samples with 100% density, with a cubic filling pattern and an angular orientation of 30° .

Keywords: 3D printing, strength of materials, additive manufacturing, FEM analysis

Przeprowadzono statyczną próbę jednoosiowego rozciągania próbek otrzymanych z PLA za pomocą druku 3D w technologii FDM. Próbkę różniły się parametrami druku 3D, takimi jak rodzaj wypełnienia, gęstość wypełnienia oraz orientacja kątowa wydruku próbki. Ocenie poddano 5 wzorów wypełnienia oraz 4 orientacje kątowe kształtów, w kierunku osi X drukarki oraz pod kątem 15° , 30° i 45° względem osi X . Najlepszymi parametrami wytrzymałościowymi charakteryzowały się próbki o 100-proc. gęstości, z wzorem wypełnienia cubic i orientacją kątową 30° .

Słowa kluczowe: druk 3D, wytwarzanie przyrostowe, wytrzymałość materiałów, analiza MES

Technologie addytywne od kilku dekad odgrywają wiodącą rolę w rozwoju przemysłu wytwórczego. Intensyfikacja procesów przyrostowych, powszechnie określanymi mianem druku 3D, spowodowała swego rodzaju rewolucję, która pozwoliła na zastąpienie tradycyjnych metod wytwarzania, takich jak odlewnictwo i obróbka ubytkowa, na rzecz technik przyrostowych do szybkiego prototypowania RP (*rapid prototyping*). Początkowo techniki przyrostowe były wykorzystywane do tworzenia prototypów docelowych modeli, jednak dynamiczny rozwój sprawił, że drukowanie 3D nabiera coraz większego znaczenia w produkcji małoseryjnej. Najbardziej powszechną i niskobudżetową metodą przyrostową jest druk 3D w technologii FDM (*fused*

deposition modelling). Technika ta opiera się na uplastycznianiu tworzywa sztucznego i nanoszeniu warstw materiału, aż do momentu otrzymania finalnego elementu.

Zastosowanie technologii druku 3D FDM do wykonania trwałych części z tworzyw termoplastycznych znacznie ułatwia ostateczne kształtowanie elementów¹. Części o skomplikowanych kształtach umożliwiają efektywne wykorzystanie przestrzeni oraz osiągnięcie dużego stopnia upakowania elementów w przestrzeni roboczej. Takim przykładem może być prototypowe koło łazika marsjańskiego, w którym znajduje się silnik elektryczny oraz dwie przekładnie. Kryterium minimalizacji masy konstrukcji skłoniło autorów do podparcia układu napędowego wspornikiem polimerowym.



Inż. Kamila WILCZYŃSKA w roku 2024 ukończyła studia I stopnia na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych w Warszawie.



Dr inż. Damian MARKUSZEWSKI (ORCID: 0000-0002-4974-0128) w roku 2004 ukończył studia na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych w Warszawie. W 2013 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym Wydziale. Jest adiunktem w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

* Adres do korespondencji:

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, tel.: (22) 234-85-25, e-mail: damian.markuszewski@pw.edu.pl

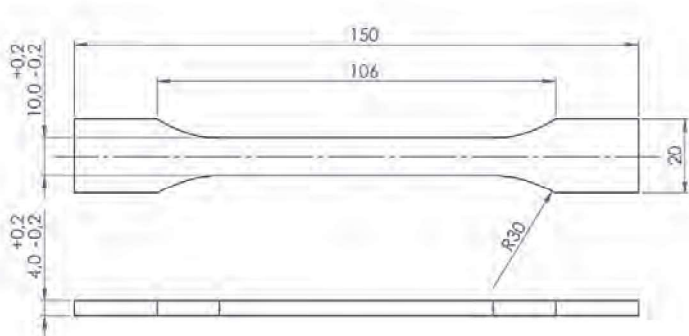


Fig. 1. Sample dimensions

Rys. 1. Wymiary próbki

Celem pracy był modyfikacja i analiza wytrzymałościowa wspornika układu napędowego łożka marsjańskiego^{2, 3}. Mając na uwadze występujące ograniczenia projektowe dotyczące masy wspornika oraz wymiarów geometrycznych pozostałych komponentów, zaproponowano wspornik układu napędowego z filamentu PLA.

Część doświadczalna

Materiały

Do wydruku próbki zastosowano filament z PLA prod. Colorfil, koloru szarego, o średnicy 1,75 mm i dopuszczalnych temperaturach: druku 220°C i stołu 60°C.

Metodyka badań

Druk kształtki

Model kształtki 3D zaprojektowano w programie Solidworks 2023 Dassault Systèmes. Wymiary geometryczne kształtek przyjęto wg normy⁴, która opisuje warunki i sposób przeprowadzenia próby rozciągania tworzyw sztucznych (rys. 1). Następnym krokiem było wygenerowanie geometrii siatkowej w postaci pliku STL. Format pliku STL przedstawia geometrię powierzchni w sposób uproszczony, dopasowując ją do siatki przestrzennej, złożonej z małych trójkątów⁵. W zależności od szczegółowości modelu można dopasować wielkość generowanej siatki⁴. Gotowy plik STL wyeksportowano do oprogramowania typu *slicer* – UlitMaker Cura 5.4.0, przeznaczonego dla stosowanej w badaniu drukarki 3D, celem otrzymania kodu maszynowego. *G-code* to szereg poleceń zapisanych w języku czytelny dla drukarek 3D typu FFF (FDM)⁶. Proces wydruku próbek przeprowadzono za pomocą drukarki 3D Creality Ender 3. Stosowana drukarka była wyposażona w nagrzewany stół roboczy, który podczas badania utrzymywał temp. 60°C i dyszę o średnicy 0,4 mm, pozwalającą na rozgrzanie się do maksymalnej temp. 255°C. Dla najistotniejszych parametrów wydruku próbek i ich powtarzalności przyjęto następujące wartości: wysokość warstwy 0,2 mm, liczba warstw 20, prędkość drukowania 50 mm/s, wysokość górnej i dolnej warstwy 0,8 mm, grubość ścian bocznych 0,8 mm. Każda próbka była drukowana osobno, dla indywidualnych parametrów procesu. Procedura wydru-

ku próbek miała miejsce w zamkniętym pomieszczeniu, w którym panowała stała temp. 22°C. Wszystkie próbki zostały wydrukowane z jednej szpuli filamentu. Kształtki drukowane były w orientacji poziomej, na płaszczyźnie *XY*.

Podczas badania dokonano wyboru trzech parametrów, które wg subiektywnej opinii autorów pracy były najistotniejsze z punktu widzenia wytrzymałości. Wzięto pod uwagę wpływ rodzaju wypełnienia, gęstość (procent) wypełnienia, a także orientację kątową wydruku próbki. Szczegółowe przedstawienie ustawień zestawiono w tabeli. W celu uniknięcia problemów z identyfikacją poszczególnych kształtek, przyjęto schemat oznaczeń każdej z nich wg wzorca (rys. 2). Rodzaj wypełnienia istotnie wpływa na parametry wytrzymałościowe modelu. Jest to struktura wewnątrz modelu, którą stosuje się w celu wzmocnienia, zmniejszenia zużycia materiału, a także skrócenia czasu wydruku⁷. W oprogramowaniu przeznaczonym do drukarki dostępnych było 14 różnych wzorów. Na podstawie literatury^{8, 9} oraz doświadczenia autorów wytypowano 5 wypełnień, które odznaczają się największą wytrzymałością mechaniczną. Rodzaje wypełnień stosowanych do wydruku kształtek przedstawiono na rys. 3. Każdą z otrzymanych kształtek poddano ocenie wizualnej, zwracając szczególną uwagę na odwzorowanie wymiarów geometrycznych modelu, a także sprawdzając je pod kątem wystąpienia ewentualnych defektów powierzchniowych, takich jak ukruszenie materiału oraz oddzielanie się warstw.

Badania wytrzymałościowe

Próba rozciągania jest podstawowym źródłem informacji o właściwościach mechanicznych badanego materiału. Statyczna próba rozciągania jednoosiowego próbek z filamentu PLA została przeprowadzona za pomocą laboratoryjnej maszyny wytrzymałościowej LabTest Z1484 firmy LaborTech. Badanie przeprowadzono w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy docelo-

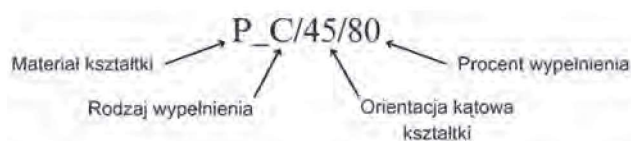


Fig. 2. Schematic of sample determination

Rys. 2. Schemat oznaczania próbek

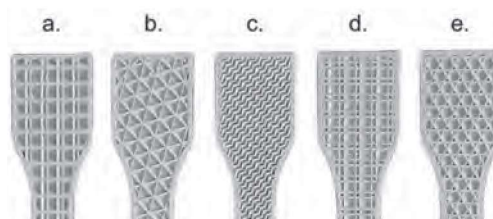


Fig. 3. Types of infill: a) octet, b) cubic subdivision, c) gyroid, d) quarter cubic, e) cubic

Rys. 3. Rodzaje wypełnień: a) octet, b) cubic subdivision, c) gyroid, d) quarter cubic, e) cubic

Table. Cross-sectional dimensions and process parameters for individual PLA samples and a summary presentation of the results obtained during the test

Tabela. Wymiary przekroju poprzecznego i parametry procesu dla poszczególnych próbek PLA

Oznaczenie	Rodzaj wypełnienia	Grubość, mm	Szerokość, mm	Pole S_0 , mm ²	E , MPa	σ_{max} , MPa	ε , %	F_{np} , N	F_p , N	Orientacja, °	Wypełnienie, %
P_C/00/40	cubic	3,90	10,32	40,25	31	1,85	1256,6	1256,6	31	0	40
P_C/15/40	cubic	3,78	10,27	38,82	33	3,20	1242,4	1200,2	33	15	40
P_C/30/40	cubic	3,67	10,36	38,02	32	5,07	1241,0	1149,4	32	30	40
P_C/45/40	cubic	3,92	10,20	39,98	31	2,73	1207,2	1054,6	31	45	40
P_QC/45/40	quarter cubic	3,71	10,31	38,25	28	2,27	1080,0	1054,6	28	45	40
P_G/45/40	gyroid	3,49	10,30	35,95	28	2,06	1013,8	981,4	28	45	40
P_CS/45/40	cubic subdivision	3,83	10,32	39,53	29	2,29	1161,8	1146,2	29	45	40
P_O/45/40	octet	3,53	10,36	36,57	29	2,22	1050,0	1024,0	29	45	40
P_C/45/20	cubic	3,91	10,34	40,43	27	2,21	1089,8	1080,0	27	45	20
P_C/45/60	cubic	3,83	10,38	39,76	34	3,00	1367,0	1326,0	34	45	60
P_C/45/80	cubic	3,94	10,28	40,50	39	2,73	1574,2	1546,0	39	45	80
P_C/45/100	cubic	3,92	10,12	39,67	49	3,27	2051,2	1935,4	49	45	100

wego modelu, w temp. 20°C i wilgotności powietrza na poziomie 57%.



Fig. 4. Sample with extensometer attached

Rys. 4. Próbką z zamocowanym ekstensometrem

Pomiar rzeczywistego wydłużenia próbki wykonano za pomocą tensometrycznego czujnika wydłużenia MFA 2 (rys. 4). Siła, z jaką obciążane były poszczególne próbki była uzyskiwana poprzez ruch platformy w osi pionowej, ze stałą prędkością równą 3 mm/min. Zebrane dane pomiarowe umieszczono w tabeli.

Podstawą analiz wytrzymałościowych jest próba doświadczalna rozciągania metali¹⁰), w wyniku której otrzymywana jest charakterystyka naprężenia rozciągającego σ w funkcji wydłużenia względnego ε . Parametry te obliczane są na podstawie początkowych wymiarów próbki opisanych zależnościami (1) i (2):

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

w których F oznacza siłę rozciągającą, ΔL wydłużenie próbki, S_0 pole przekroju poprzecznego próbki, a L_0 długość pomiarową ekstensometru.

Wyznaczone wartości na podstawie wzorów (1) i (2) są wartościami umownymi, gdyż w procesie rozciągania następuje ciągła zmiana pola przekroju poprzecznego, należy więc mieć na uwadze zakładane uproszczenie. Na rys. 5

przedstawiono wykresy naprężenia w funkcji wydłużenia względnego, zawierające charakterystyczne punkty, których znajomość jest niezbędna do zrozumienia zachodzących zjawisk oraz do właściwej analizy wytrzymałościowej.

Wyniki badań

Podstawą do analiz wytrzymałościowych była charakterystyka naprężenia w funkcji wydłużenia względnego. Wyniki przedstawiono na trzech oddzielnych wykresach, biorąc pod uwagę: wzór wypełnienia, procent wypełnienia (gęstość) próbek oraz położenie katowe w przestrzeni roboczej drukarki. Pierwsza wyraźna zmiana na wykresach to moment, w którym program zatrzymywał przebieg badania w celu zdjęcia ekstensometru z próbki. Następnie próba była kontynuowana, aż do zerwania badanej próbki. Należy

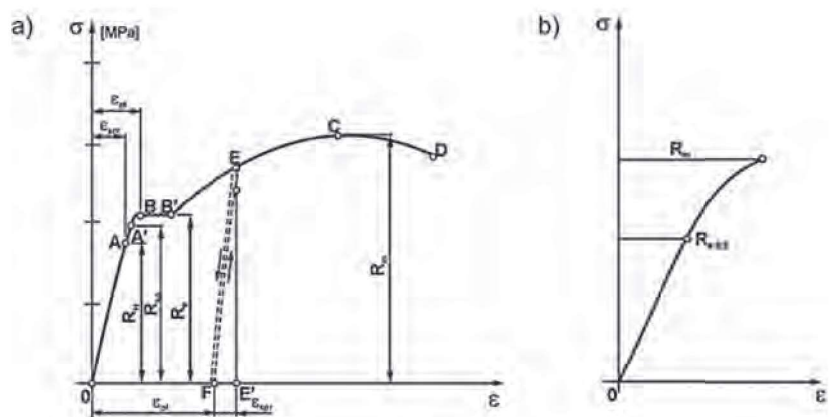


Fig. 5. Stress characteristics as a function of relative elongation for: a) elastic-plastic, b) elastic-brittle materials⁷⁾

Rys. 5. Charakterystyka naprężenia w funkcji wydłużenia względnego dla materiałów: a) sprężysto-plastycznych, b) sprężysto-kruchych⁷⁾

podkreślić, że siła rozciągająca próbki działała równoległe do płaszczyzny XY wydruku.

Wzór wypełnienia

Badanie umożliwiło zweryfikowanie wpływu wzoru wypełnienia na wytrzymałość na rozciąganie próbek wykonanych w technologii FDM. Ocenie poddano 5 wzorów wypełnień przedstawionych na rys. 3. Każda próbka budowana była warstwowo, w orientacji 45° do osi X drukarki oraz dla takiej samej gęstości wypełnienia równej 40%. Wyraźnie największe wartości naprężeń osiągnęła próbka o wypełnieniu cubic oznaczona $P_C/45/40$. Najgorszym wypełnieniem z punktu widzenia wytrzymałości okazała się próbka ze wzorem gyroid, której moduł Younga był o ok. 12% mniejszy niż wypełnienia cubic. Wydłużenie względne próbki $P_C/45/40$ było o 25% większe niż próbki $P_G/45/40$. Pozostałe próbki, dla których przeprowadzono próbę statycznego rozciągania były drukowane z wypełnieniem cubic, które okazało się najbardziej wytrzymałe spośród wytypowanych wzorów. W przypadku próbki o oznaczeniu $P_C/15/40$ występowała zauważalnie największa symetria osiowa w ułożonych pasmach (rys. 6).

W przelomach widocznych na rys. 7 były zauważalne szczeliny powietrzne. Dla różnych wzorów wypełnienia, w zależności od symetrii pasm, występowały mniej lub bardziej regularne szczeliny, co miało duży wpływ na wytrzymałość kierunkową. Przy największych szczelinach powietrznych w przekroju występował najwyższy współczynnik koncentracji naprężeń, co w konsekwencji zwiększenia obciążenia doprowadziło do inicjacji procesu pęknięcia.

Procent wypełnienia

W celu uzyskania największych wartości parametrów wytrzymałościowych modeli drukowanych w technologii FDM należy ustawić wartość gęstości wypełnienia modelu na poziomie 100%. Jednocześnie należy podkreślić, że to pełne wypełnienie jest niemożliwe z punktu widzenia technologii budowania modeli. Pomiedzy kolejno nakładanymi włóknami tworzą się wolne przestrzenie, czyniąc gotowy wydruk komponentem nie w pełni jednorodnym. Niemniej jednak większy procent wypełnienia wpływa na wzmocnienie struktury oraz poprawę rozkładu naprężeń występujących w próbce i na zwiększenie rzeczywistego przekroju poprzecznego próbki. Z przedstawionej charakterystyki wynika, że większy procent (gęstość) wypełnienia istotnie wpływał na poprawę właściwości wytrzymałościowych, ale zwiększał też zużycie materiału i wydłużał czas wydruku. Dla prototypowych elementów zaleca się wypełnienie na poziomie 40–60%, gdzie naprężenia osiągały wartość ok. 34 MPa, a wartość wydłużenia

względne przekraczała 2,6%. Przy wypełnieniu 20% była zauważalna porowata struktura próbki, która zgodnie z przedstawionym wykresem odzwierciedlała niskie wartości przenoszonych obciążeń. Próbka, która przeniosła największe naprężenia wykazywała również największą wartość wydłużenia względnego (3,27%). Dla próbki $P_C/45/100$, o najlepszych parametrach wytrzymałościowych, odnotowano wartość naprężenia granicznego równą 49 MPa. Na rys. 8 można zaobserwować nieregularny przebieg procesu rozciągania próbki $P_C/45/80$. W początkowej fazie proces przebiegał zgodnie z przewidywanymi wartościami, a po osiągnięciu wydłużenia 2,73% nastąpiło zerwanie próbki. Doświadczenia z poprzednich prób wskazywałyby na osiągnięcie wartości w okolicach 3,15% wydłużenia względnego. Przyczyną zaburzenia może być defekt wewnętrzny struktury filamentu, który nie był widzialny podczas etapu weryfikacji wizualnej wydrukowanych kształtek. W przypadku próbki o wypełnieniu 80% (rys. 9) wystąpił niewielki odprysk na brzegu przelomu, który nie został odnaleziony w wyniku pęknięcia.

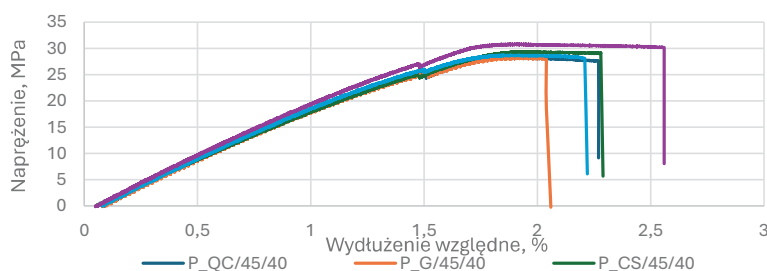


Fig. 6. Stress characteristics as a function of relative elongation for printed shapes with different infill patterns

Rys. 6. Charakterystyka naprężenia w funkcji wydłużenia względnego dla kształtek drukowanych z różnym wzorem wypełnienia

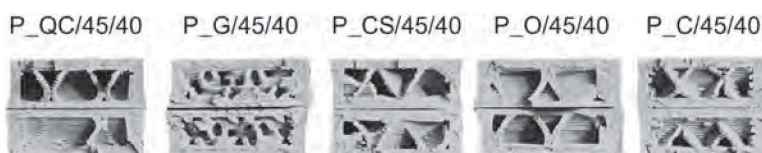


Fig. 7. Breakthroughs of samples with different filling patterns

Rys. 7. Przelomy próbek o różnym wzorze wypełnienia

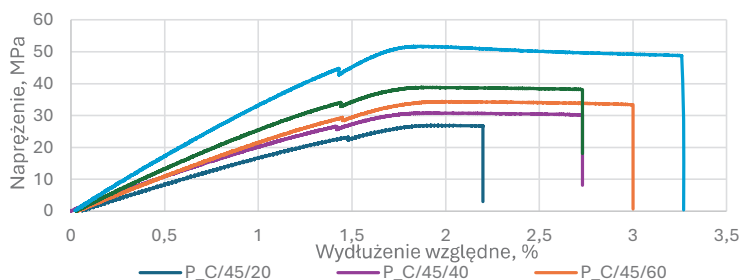


Fig. 8. Stress characteristics as a function of relative elongation for printed shapes with different percentages of infill

Rys. 8. Charakterystyka naprężenia w funkcji wydłużenia względnego dla kształtek drukowanych z różnym procentem wypełnienia

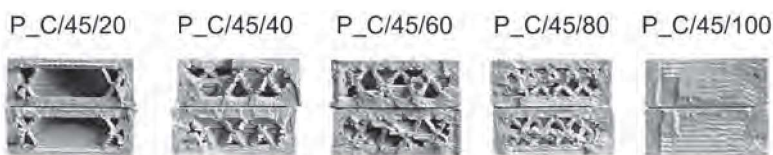


Fig. 9. Breakthroughs of samples with different percentages of filling

Rys. 9. Przelomy próbek o różnym procencie wypełnienia

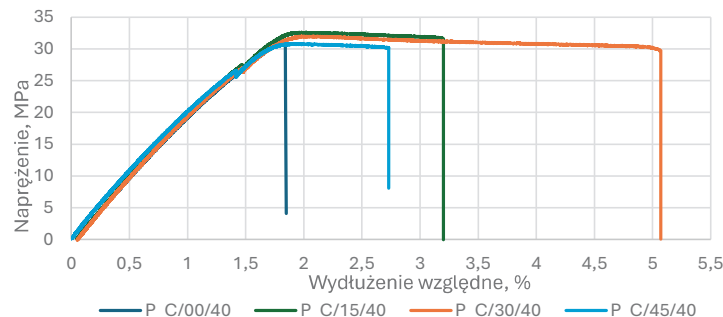


Fig. 10. Stress characteristics as a function of relative elongation for specimens printed in different angular orientations

Rys. 10. Charakterystyka naprężenia w funkcji wydłużenia względnego dla próbek drukowanych w różnej orientacji kątowej

Orientacja kątowa

Przeprowadzona próba pozwoliła na analizę wpływu orientacji kątowej wydruku w przestrzeni roboczej drukarki na późniejszy aspekt wytrzymałościowy (rys. 10). Pod uwagę wzięto cztery orientacje kątowe kształtek: pierwszą próbkę ułożono w kierunku osi X drukarki, kolejne trzy zorientowane były pod kątem odpowiednio 15° , 30° oraz 45° do osi X . Każdy z wariantów próbek miał jednakowy procent wypełnienia, ustalony na 40%, oraz ten sam wzór wypełnienia (cubic). Badane kształtki budowane były na płaszczyźnie XY drukarki warstwa po warstwie, wzdłuż osi pionowej Z .

Każda z próbek poddana badaniu wykazywała zbliżone wartości modułu Younga, ok. 1880 MPa. Wyjątek stanowiła próbka, która była drukowana pod kątem 15° do osi X drukarki, gdzie zauważalne były większe wartości naprężenia, rzędu 33 MPa, oraz moduł Younga równy 1918 MPa.

Na podstawie przedstawionej charakterystyki stwierdzono, że największe naprężenia wytrzymały próbki o oznaczeniach P_C/15/40 oraz P_C/30/40. Próbka o najlepszych parametrach wytrzymałościowych P_C/15/40 wykazała stosunkowo małe wydłużenie względne w porównaniu z próbką P_C/30/40. Wpływ na to zjawisko mogły mieć występujące wewnątrz struktury defekty, które wpłynęły na mniejsze wydłużenie wskutek przyłożonej siły (rys. 11).

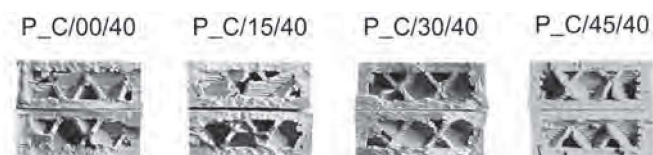


Fig. 11. Transfers of printed samples in different angular orientations

Rys. 11. Przelomy próbek drukowanych w różnej orientacji kątowej

Przeprowadzona próba dowodzi, że części otrzymywane w technologii FDM charakteryzują się różną wytrzymałością w zależności od kierunku wydruku, wykazują cechy ortotropowe. Wraz ze zwiększaniem kąta odchylenia pasma od osi symetrii próbki, obciążenie przenoszone jest w coraz mniejszym stopniu przez pasmo, a większym przez połączenie fuzyjne między pasmami.

Podsumowanie

Przeprowadzona statyczna próba rozciągania jednoosiowego wykazała, że ułożenie drukowanych włókien ma istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe. Każda z próbek, która została poddana badaniu jednoosiowego rozciągania uległa pęknięciu w obszarze pomiarowym, ale w różnych sekcjach, co świadczy o prawidłowym umieszczeniu w maszynie wytrzymałościowej. Można wywnioskować, że proces wydruku przebiegał poprawnie, bowiem struktura wewnętrzna próbek skupiała naprężenia w odpowiednich miejscach. Gęstość i rodzaj wypełnienia, a także położenie włókien drukowanych w technologii FDM ma istotny wpływ na zagadnienia związane z wytrzymałością materiałów. Poddając analizie otrzymane wyniki, stwierdzono, że podczas wydruku docelowego wspornika należy przyjąć następujące parametry wydruku: gęstość na poziomie 100%, wzór wypełnienia cubic oraz orientację kątową 30° .

Otrzymano: 14-10-2024

Zrecenzowano: 25-11-2024

Zaakceptowano: 03-12-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] K. Czerwiński, M. Czerwiński, *Drukowanie w 3D*, Wydawnictwo InfoAudit, Warszawa 2013.
- [2] D. Markuszewski, M. Wądołowski, M. Gorzym i in., *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2021, **15**, nr 4, 222, DOI: 10.12913/22998624/141213.
- [3] D. Markuszewski, M. Bielak, M. Wądołowski i in., *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2022, **16**, nr 6, 244, DOI: 10.12913/22998624/156300.
- [4] PN-EN ISO52-1:1998, *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Zasady ogólne*.
- [5] P. Siemiński, G. Budzik, *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
- [6] G. Budzik, J. Woźniak, Ł. Przeszlowski, *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.
- [7] C.K. Chua, K.F. Leong, *3D Printing and additive manufacturing, principles and applications*, World Scientific, Singapur 2016.
- [8] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. Garcia-Plaza, P.J. Nunez, *Mater. Des.* 2017, **124**, 143.
- [9] <https://www.swiatdruku3d.pl/pliki-stl/>, dostęp 18.11.2023 r.
- [10] K. Gołoś, W. Kocańda, *Laboratorium wybranych materiałów konstrukcyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019.