

Andrzej KATUNIN<sup>a)</sup>, Ewelina WACŁAWIK<sup>a)</sup>, Marcin BILEWICZ<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zakład Struktur Lekkich, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

<sup>b)</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

## Wpływ parametrów technologicznych na właściwości eksploatacyjne elementów wytwarzanych techniką przyrostową FDM

**Streszczenie:** Zastosowanie techniki przyrostowej FDM pozwala na wytwarzanie poszczególnych elementów i ich złożeń w oparciu wyłącznie o przygotowany wirtualny model w środowisku CAD. Dzięki temu, technika FDM, jako technika szybkiego prototypowania znalazła szerokie zastosowanie w wielu segmentach przemysłu. Poprawne wykonanie elementu zależy od szeregu parametrów technologicznych, ustawianych przed rozpoczęciem operacji wytwarzania. Niewłaściwe zdefiniowanie tych parametrów może prowadzić do wad wytwarzania, m.in. szczeliny oraz przegrzanie wytwarzanych elementów, co negatywnie wpływa na ich jednorodność i wytrzymałość. W niniejszym artykule opisano wyniki badań eksperymentalnych dla próbek o różnym stopniu wypełnienia przy różnych rodzajach wypełnienia – liniowym i heksagonalnym. Przeprowadzone badania eksperymentalne obejmowały quasi-statyczną próbę rozciągania oraz analizę modalną, na podstawie której określono częstotliwości własne drgań oraz odpowiadające im postacie własne oraz współczynniki tłumienia modalnego. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było opracowanie zaleceń dotyczących parametrów wytwarzania elementów techniką przyrostową FDM.

**Słowa kluczowe:** technika przyrostowa FDM, stopień wypełnienia, próba rozciągania, analiza modalna.

### INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON OPERATION PROPERTIES OF ELEMENTS MANUFACTURED USING THE ADDITIVE FDM TECHNIQUE

**Abstract:** Using the additive FDM technique allows manufacturing of particular elements and their assemblies basing on a virtual model prepared in the CAD environment only. Owing to this, the FDM technique, as a rapid prototyping technique found wide applicability on many segments of industry. The correct manufacturing of an element depends on series of technological parameters, defined before the beginning of manufacturing operation. Inadequate defining of these parameters may cause the manufacturing defects, e.g. gaps and overheating of manufacturing elements, which influences negatively on their homogeneity and strength. In the following paper the results of experimental studies for specimens with various degrees of filling for various types of filling – linear and hexagonal. The performed studies covered quasi-static tensile tests and the modal analysis, based on which the natural frequencies of vibration as well as accompanying modal shapes and coefficients of modal damping were determined. Based on the obtained results the elaboration of recommendations for the manufacturing parameters using the additive FDM technique was possible.

**Keywords:** additive FDM technique, degree of filling, tensile test, modal analysis.

## 1. WPROWADZENIE

Druk 3D jest jedną z najpopularniejszych metod szybkiego prototypowania (ang. Rapid prototyping). Polega ona na fizycznym wytwarzaniu obiektów, wykorzystując modele trójwymiarowe, zaprojektowane w oprogra-

mowaniu typu CAD (ang. Computer Aided Design). Element powstaje poprzez nanoszenie materiału warstwa po warstwie, stąd technika ta jest określana jako przyrostowa. W porównaniu do klasycznych metod obróbki materiału, szybkie prototypowanie pozwala na wykonanie produktu w krótkim czasie i w niskiej

cenie. Elementy wykonane metodą druku 3D, służą jako prototypy, na podstawie których wytwarzane są elementy części maszyn, z materiałów o znacznie lepszych właściwościach wytrzymałościowych, np. z węglików spiekanych lub stopów metali lekkich.

Najpopularniejszą metodą druku 3D jest technika FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Polega ona na modelowaniu elementu ciekłym, termoplastycznym tworzywem w postaci drutu (nazywanego również filamentem). Filament jest podawany do ekstrudera, gdzie następnie jest nagrzewany do odpowiedniej temperatury i jako stopiony materiał wypływa z głowicy. Następnie jest on osadzany warstwa po warstwie na stole roboczym drukarki. Dla elementów drukowanych, posiadających złożone kształty, możliwe jest zastosowanie podpór, które po zakończeniu druku odrywa się od bryły. Przy zastosowaniu dwóch głowic, możliwe jest wykorzystanie materiału na podpory, rozpuszczalnego w wodzie. Najczęściej stosowane materiały w tej metodzie to PLA (Polylactic acid), ABS (Acrylonitrile butadiene styrene), nylon oraz materiały kompozytowe, przypominające wygląd drewna, betonu i szkła. Do zalet wydruków 3D, otrzymanych techniką FDM, zaliczyć można wysoką dokładność wymiarową elementów, szeroki wybór stosowanych materiałów oraz możliwość obróbki elementów. Wadą tej metody jest wysoka chropowatość powierzchni, niejednorodność struktury elementu oraz konieczność stosowania podpór.

Ze względu na coraz szersze wykorzystanie techniki FDM w różnych branżach i gałęziach przemysłu, m.in. w medycynie [1–3], mechanice precyzyjnej i robotyce [4,5], prototypowaniu w militariach [6] i wielu innych, istotne jest określenie optymalnych parametrów wykonania elementów z wykorzystaniem tej techniki, które zapewnią minimalizację błędów technologicznych. Niemniej istotnym parametrem dla elementów wytwarzanych przy pomocy techniki FDM jest nadanie im odpowiedniej sztywności i wytrzymałości mechanicznej, bio-

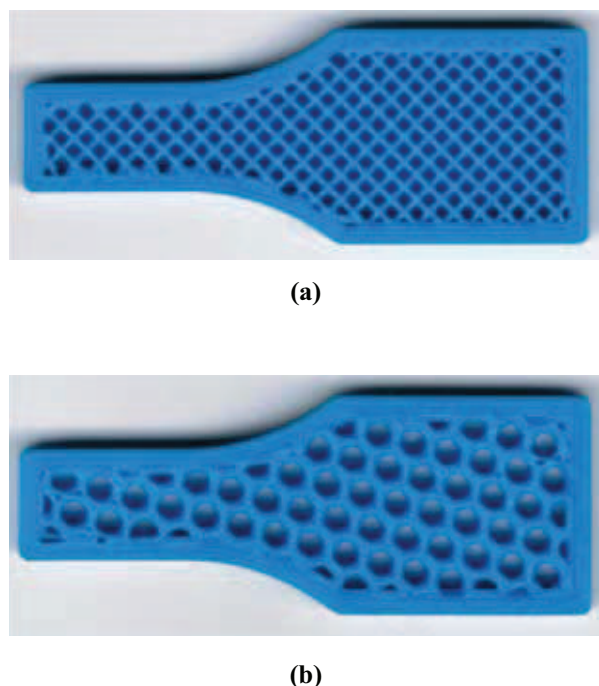
jąc pod uwagę warunki eksploatacyjne, w których docelowo takie elementy powinny być eksploatowane. W tym zakresie prowadzone są intensywne badania. Olszewski [7] badał wpływ typu tworzywa, z którego wytwarzane są elementy z wykorzystaniem techniki FDM oraz właściwości geometrycznych wypełnienia elementów na wytrzymałość w próbach rozciągania i zginania oraz na udarność. Podobne badania były prowadzone przez Wichniarka i in. [8,9]. Istotnym parametrem w elementach uzyskiwanych metodami przyrostowymi jest orientacja ścieżek tworzywa uplastycznionego nakładanych w procesie wytwarzania, co było przedmiotem badań tegoż zespołu [10,11], jak i innych badaczy [12].

Niniejsza praca jest kontynuacją badań nad wpływem stopnia i postaci geometrycznej wypełnienia elementów wykonywanych z wykorzystaniem techniki FDM, zwłaszcza powstających nieliniowości przy rozciąganiu. Dodatkowo, w pracy opisane zostały wyniki badań modalnych, pozwalających na określenie różnic w częstotliwościach i postaciach własnych drgań oraz w tłumieniu modalnym w zależności od parametrów technologicznych w procesie wytwarzania. Na podstawie uzyskanych wyników badań zostały opracowane zalecenia, dotyczące ustawienia właściwych nastaw w celu uzyskania pożądanych właściwości eksploatacyjnych elementów oraz minimalizacji błędów technologicznych.

## 2. PRZYGOTOWANIE DO BADAŃ I SYMULACJE NUMERYCZNE

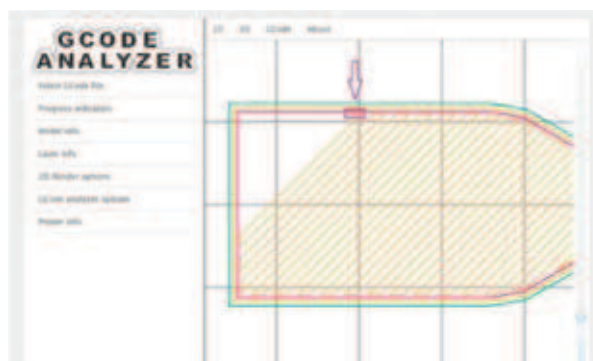
Etap przygotowania do badań obejmował wytworzenie próbek o charakterystycznych kształtach i właściwościach z wykorzystaniem techniki FDM. Próbkę do badań wytrzymałościowych o wypełnieniu tworzywem od 15% do 50% z krokiem 5% o postaci liniowej (Rys. 1a) i heksagonalnej (Rys. 1b) zostały wytworzone z PLA (temp. topnienia w ekstruderze wynosiła 205 °C) na drukarce 3NOVATICA Gate 1.0 zgodnie z normą

PN EN-ISO 1798:2009 (typ 1). Temperatura stołu wynosiła 55 °C. Próbki do badań modalnych przygotowano w podobny sposób z dodaniem cienkiej warstwy materiału z jednej strony próbki w celu uzyskania powierzchni do skanowania wibrometrem laserowym. Grubość wszystkich wykonanych próbek wynosiła 10 mm.



Rys. 1. Przykłady postaci geometrycznej wypełnienia: (a) liniowa, (b) heksagonalna, stopień wypełnienia 30%  
Fig. 1. Examples of geometry of filling: (a) linear, (b) hexagonal, degree of filling 30%

W celu oszacowania właściwości mechanicznych próbek, na etapie przygotowawczym zostały przeprowadzone symulacje numeryczne prób rozciągania, zginania oraz ściskania dla przypadków wypełnienia liniowego i heksagonalnego o różnym stopniu wypełnienia. Postać geometryczną modeli numerycznych przygotowano z wykorzystaniem technik inżynierii odwrotnej. Z kodu GCODE (generowanego w celu wykonania wydruku 3D) odczytano charakterystyczne wymiary dla obu typów wypełnień z wykorzystaniem oprogramowania Gcode Analyzer.



Rys. 2. Analiza przekątnej przy wypełnieniu liniowym  
Fig. 2. Analysis of a diagonal during linear filling

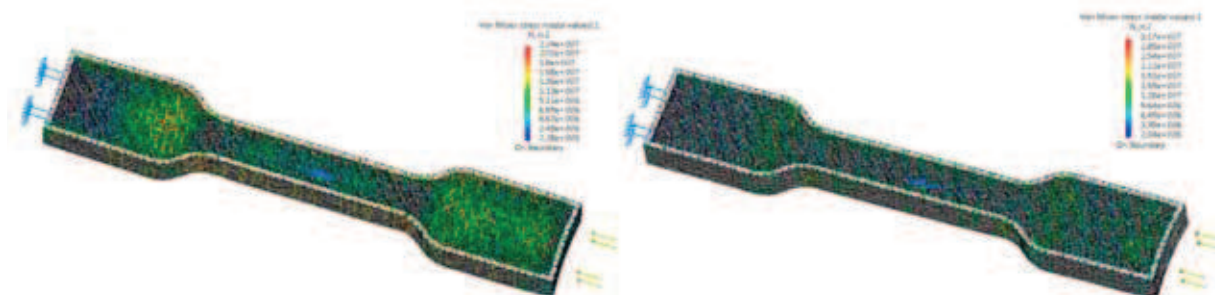
Modele CAD zostały przygotowane w środowisku CATIA V5 dla rozpatrywanych przypadków. W tymże środowisku przeprowadzono symulacje numeryczne, gdzie w każdym przypadku została przyłożona siła o wartości 500 N. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na większą wytrzymałość próbek o wypełnieniu heksagonalnym. Jest to spowodowane przede wszystkim właściwościami geometrycznymi próbek, tj. w przypadku wypełnienia heksagonalnego uzyskuje się zarówno większą sztywność jak i korzystniejszy rozkład naprężeń w odniesieniu do próbek o wypełnieniu liniowym. Wartości liczbowe uzyskanych naprężeń maksymalnych przedstawiono w Tab. 1, a odpowiadające im przykładowe mapy rozkładu naprężeń dla różnych postaci geometrycznych wypełnienia przy takim samym stopniu wypełnienia przedstawia Rys. 3.

Tab. 1. Porównanie wyników analiz numerycznych dla różnych postaci geometrycznych wypełnienia

Tab. 1. Comparison of results of numerical analyses for various geometries of filling

Postać geom. wypełnienia	Liniowa, N/m <sup>2</sup>	Heksagonalna, N/m <sup>2</sup>
Rozciąganie	2.24×10 <sup>7</sup>	3.17×10 <sup>7</sup>
Zginanie	2.17×10 <sup>8</sup>	2.33×10 <sup>8</sup>
Ściskanie	2.24×10 <sup>7</sup>	3.17×10 <sup>7</sup>





Rys. 3. Rozkład naprężeń przy wypełnieniu (a) liniowym, (b) heksagonalnym, stopień wypełnienia 15%  
 Fig. 3. Stress distribution for (a) linear, (b) hexagonal filling, degree of filling 15%

### 3. PRZEPROWADZENIE BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

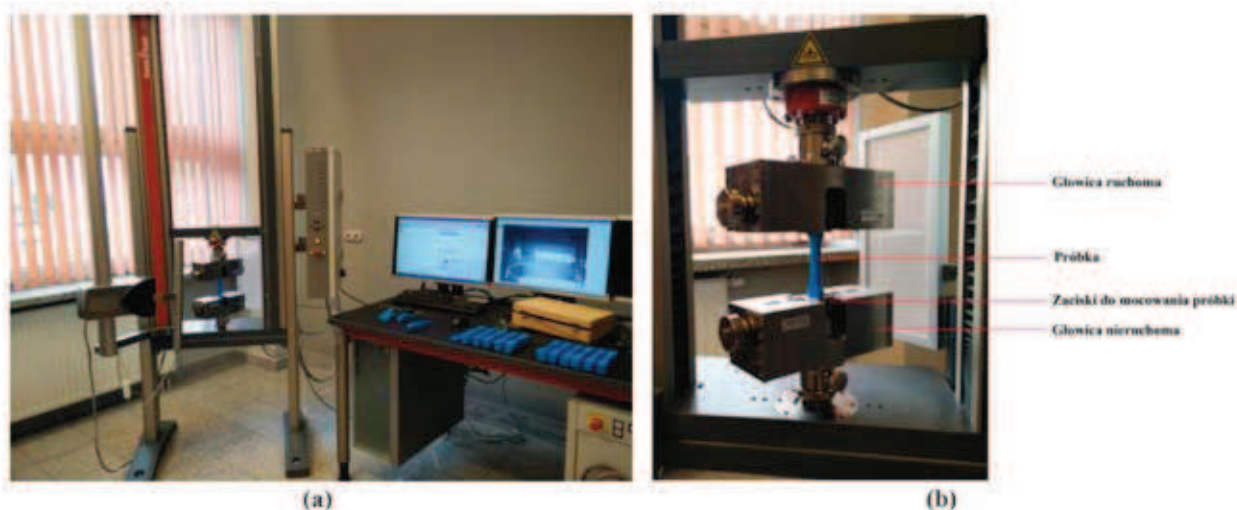
Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych zaplanowano przeprowadzenie badań wytrzymałościowych i modalnych, pozwalających na weryfikację właściwości eksploatacyjnych rozpatrywanych przypadków wypełnienia.

#### 3.1. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Quasi-statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick Roel Z020 (Rys. 4).

Dla każdego rozpatrywanego przypadku wykonano 3 powtórzenia. Prędkość posuwu szczęk wynosiła 1 mm/min. Uzyskane wyniki prób rozciągania dla różnego rodzaju i stopnia wypełnienia zestawiono na wykresach na Rys. 5.

Na wykresach z prób rozciągania quasi-statycznego można zaobserwować dobrze widoczną zależność naprężenia zrywającego od stopnia wypełnienia, zależność ta zbliżona jest do liniowej. Obserwuje się także eksperymentalne potwierdzenie wstępnych badań numerycznych (opisanych w pkt. 2): wypełnienie o heksagonalnej postaci geometrycznej wykazuje lepsze właściwości wytrzymałościowe w stosunku do wypełnienia liniowego. Zależność taka sprawdza

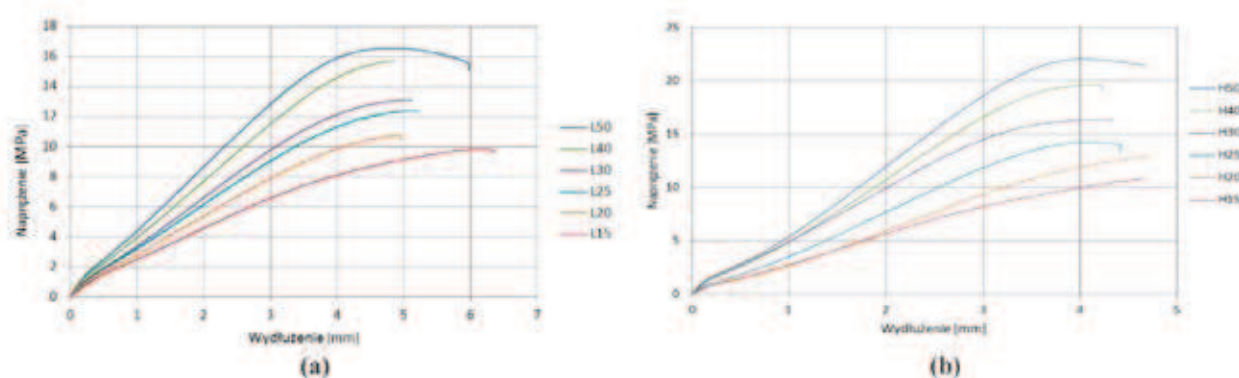


Rys. 4. Stanowisko badawcze (a) oraz sposób mocowania próbki (b)  
 Fig. 4. Experimental test rig (a) and a fixture of a specimen (b)

się dla każdego przypadku o identycznym stopniu wypełnienia (por. Rys. 5a i Rys. 5b). Ponadto, na wykresach można zaobserwować nieliniowość uzyskanych krzywych oraz charakterystyczne przegięcie w końcowej fazie rozciągania. Świadczy to o ciągliwości badanego materiału, która uwypukla się wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia niezależnie od postaci geometrycznej wypełnienia. Materiał ten wykazuje zachowanie sprężysto-plastyczne w zależności od poziomu przyłożonego naprężenia.

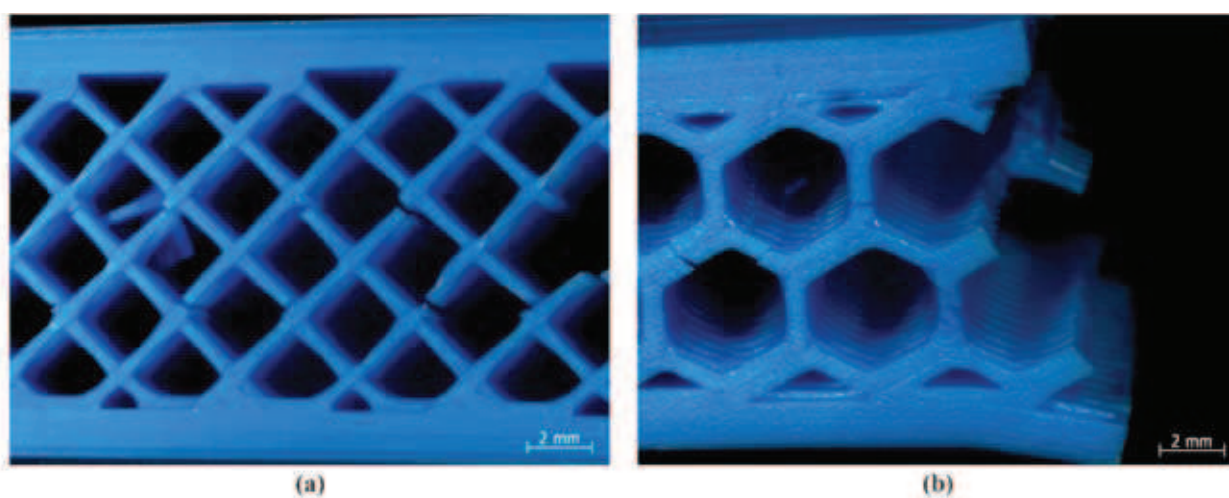
W celu zbadania charakteru zniszczenia wykonano dodatkowe obserwacje przełomów z wykorzystaniem mikroskopu konfokalnego Zeiss

LSM 5 Exciter. Przykładowe fotografie (Rys. 6) wykonane dla próbek ze stopniem wypełnienia 20% przedstawiają charakter pęknięcia próbek z wypełnieniem liniowym i heksagonalnym. Fotografie potwierdzają wcześniej postawioną tezę o korzystniejszym rozkładzie naprężeń w przypadku wypełnienia heksagonalnego. Dodatkowo, obserwuje się nieznaczne odkształcenie plastyczne, będące wynikiem ostatniej fazy rozciągania (patrz Rys. 5). O uplastycznieniu świadczą również lokalnie obserwowane zbiegnięcia materiału. Jednak, analizując uzyskane wyniki, należy stwierdzić, że charakter pęknięcia jest zbliżony do kruchego.



Rys. 5. Krzywe uzyskane z próby rozciągania: wypełnienie liniowe (a) oraz heksagonalne (b)

Fig. 5. Tensile test curves: linear (a) and hexagonal (b) filling

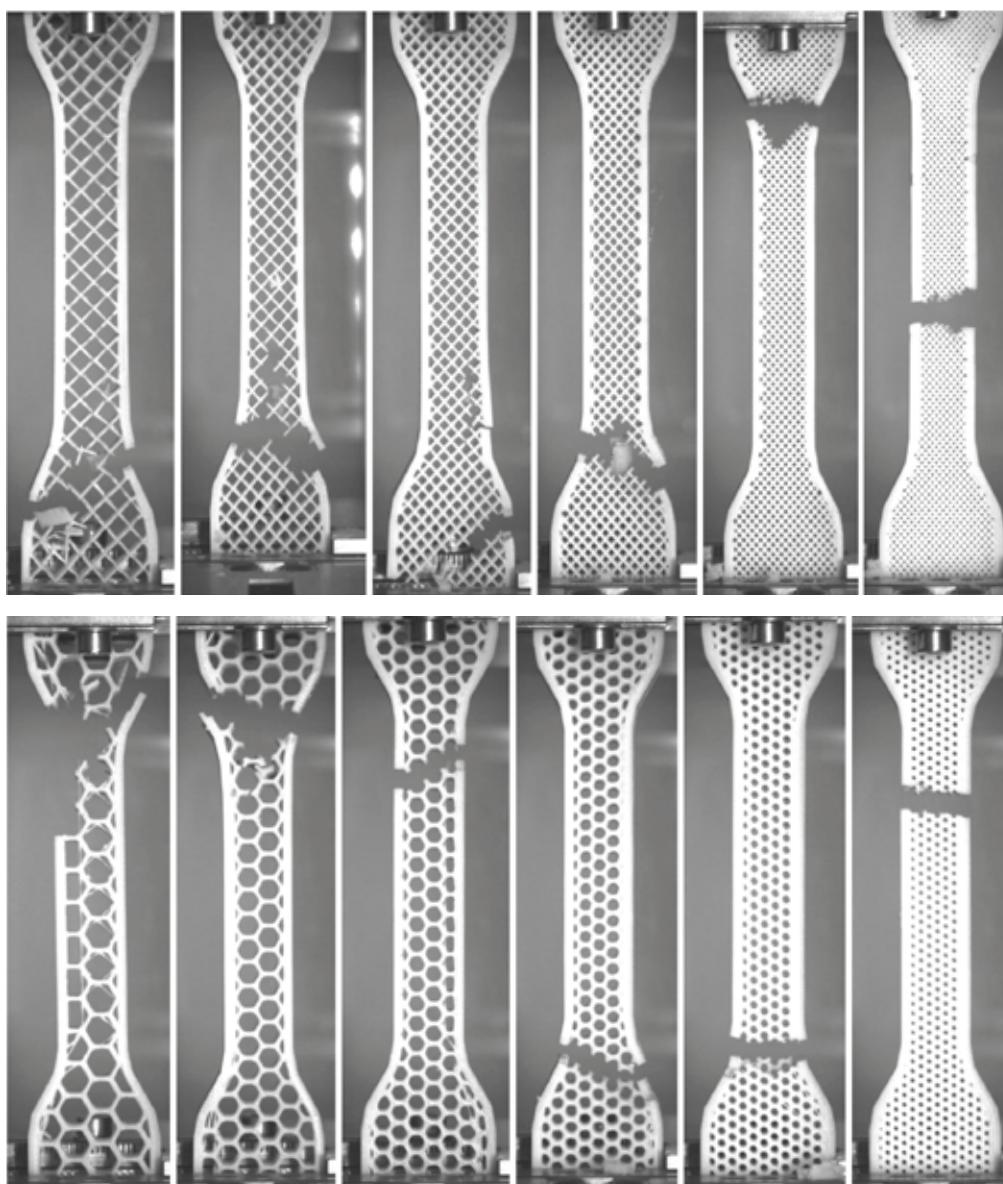


Rys. 6. Charakter pęknięcia podczas próby rozciągania: wypełnienie liniowe (a) oraz heksagonalne (b)

Fig. 6. Character of cracking during tensile test: linear (a) and hexagonal (b) filling

Po zakończeniu każdej próby rozciągania zostało wykonane zdjęcie zerwanej próbki. Fotografie dla zbadanych próbek zestawiono na Rys. 7. Na podstawie fotografii można stwierdzić, że przy niskim stopniu wypełnienia pękanie następuje w sposób nieprzewidywany w miejscach przewężenia, co dodatkowo skutkuje znacznym zniszczeniem struktury geometrycznej w obszarze pęknięcia.

Przyczyną takiego zachowania jest niejednorodność materiału spowodowana nakładaniem kolejnych warstw podczas wytwarzania próbek przy użyciu techniki FDM. Stopień niejednorodności zmniejsza się wraz ze zwiększeniem stopnia wypełnienia, co jest spowodowane lepszą dyfuzją i adhezją poszczególnych ścieżek tworzonych z filamentu, a ponadto, ze względu na większy stopień wypełnienia, lepsze utrzymywanie ciepła



Rys. 7. Charakter pęknięcia podczas próby rozciągania: wypełnienie odpowiednio 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50% o postaci geometrycznej liniowej oraz heksagonalnej

Fig. 7. Character of cracking during tensile test: linear and hexagonal filling of degree of 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, respectively



przez nałożone ścieżki. Skutkuje to polepszeniem procesów dyfuzyjnych pomiędzy nakładanymi na siebie kolejnymi porcjami materiału. Z tychże przyczyn większy stopień wypełnienia skutkuje lepszą powtarzalnością krzywych zrywania.

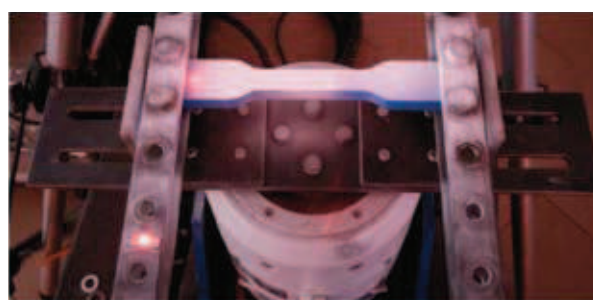
### 3.2. BADANIA MODALNE

Badania modalne zostały przeprowadzone w celu identyfikacji wpływu geometrii oraz stopnia wypełnienia na częstotliwości i postaci własne drgań oraz na tłumienie modalne przy częstotliwościach własnych. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem wzbudnika elektrodynamicznego TIRA TV-51120, na którym zamocowana była ramka stalowa, w której znajdowała się badana próbka (Rys. 8a). Na wzbudnik był podawany sygnał pseudolosowy poprzez przedwzmacniacz TIRA BAA 500. Pomiar prędkości drgań był dokonywany w sposób bezkontaktowy przy pomocy wibrometru laserowego skanującego Polytec PSV-400. Dodatkowo był wykorzystany drugi wibrometr laserowy Polytec PDV-100, którego zadaniem był pomiar drgań ramki w celu uzyskania sygnału referencyjnego. Wiązka lasera w tym przypadku była skierowana na zdefiniowany punkt ramki.

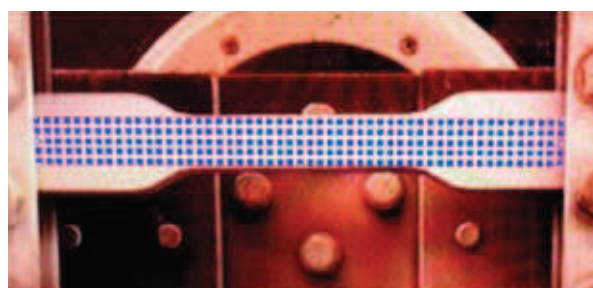
Przed rozpoczęciem badań próbka została pokryta warstwą proszku refleksyjnego, który pozwala na zwiększenie refleksyjności powierzchni. Następnie zdefiniowano siatkę punktów pomiarowych o rozpiętości  $5 \times 57$  (Rys. 8b) w oprogramowaniu dedykowanym do wibrometru skanującego oraz zdefiniowano parametry analizy. W celu niwelacji szumu pomiarowego pomiar w każdym punkcie był uśredniony pięciokrotnie. Pasma obserwacji w widmie częstotliwościowym ograniczono do 3200 Hz z rozdzielczością widma 1 Hz i częstotliwością próbkowania 8192 Hz. Wymiary obszaru skanowania wynosiły  $25 \times 137$  mm (patrz Rys. 8b). Wygląd stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 9.

Na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskano widma dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Analiza widm nie wykazała istotnych różnic przy częstotliwościach własnych

dla próbek o wypełnieniu liniowym i heksagonalnym. Dodatkowo, zostały wyznaczone współczynniki tłumienia modalnego z wykorzystaniem podejścia opartego na spadku trzydecybelowym amplitudy [13].



(a)



(b)

Rys. 8. Mocowanie próbek (a) oraz siatka punktów pomiarowych (b)

Fig. 8. Fixture of specimens (a) and a net of measurement points (b)

Porównując uzyskane częstotliwości własne drgań można zauważyć ich monotoniczny wzrost wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia w badanych próbkach. Wzrost jest bardziej zauważalny przy wyższych częstotliwościach własnych, przekraczających 1 kHz (patrz Tab. 2). Wynika to ze zwiększającej się sztywności wydruku 3D wraz ze wzrostem stopnia jego wypełnienia. Należy także zwrócić uwagę na współczynniki tłumienia modalnego, które również wykazują wyraźną tendencję wzrostową wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia. Jest to również związane ze zwiększeniem sztywności w miarę zwiększania stopnia wypełnienia. Podobnie jak w poprzednich ba-

daniach, wypełnienie heksagonalne wykazuje większą sztywność w stosunku do wypełnienia liniowego przy takich samych stopniach wypełnienia. Odzwierciedla się to również we współczynnikach tłumienia modalnego (patrz Tab. 2), które są nieznacznie wyższe w przypadku wypełnienia heksagonalnego. Można zaobserwować, że uzyskane współczynniki tłumienia modalnego są stosunkowo wysokie, co może pozytywnie wpływać na elementy drukowane z PLA przy pomocy techniki FDM pod kątem tłumienia drgań, zwłaszcza w przedziale 0÷1 kHz.



Rys. 9. Stanowisko badawcze do analizy modalnej

Fig. 9. Test rig for modal analysis

#### 4. PODSUMOWANIE I ZALECENIA

Przeprowadzenie badań wytrzymałościowych i modalnych, na próbkach wydrukowanych przy pomocy techniki FDM, pozwoliło na analizę właściwości wytrzymałościowych i modalnych oraz sporządzenie zaleceń dotyczących przygotowania wydruków 3D. Jak pokazały wyniki przeprowadzonych badań, typ i stopień wypełnienia mają decydujący wpływ na właściwości wytrzymałościowe oraz na charakter pęknięcia i stan dynamiczny. Wypełnienie typu heksagonalnego jest korzystniejsze ze względu na uzyskiwanie lepszych właściwości wytrzymałościowych w stosunku do wypełnienia liniowego przy zużyciu podobnej ilości materiału. Jednak w przypadku wypełnienia heksagonalnego znacznie wydłuża się czas wytwarzania w stosunku do wypełnienia liniowego, co oznacza, że w zależności od potrzeb należy wypracować kompromis pomiędzy pożądanymi właściwościami a czasem wytwarzania. Należy też zwrócić uwagę na to, że w przypadku niskiego stopnia wypełnienia właściwości mechaniczne i zachowanie elementu pod wpływem obciążeń jest mniej przewidywalne ze względu na gorsze własności adhezji kolejno nakładanych warstw

Tab. 2. Porównanie częstotliwości drgań własnych oraz współczynników tłumienia dla różnych postaci geometrycznych oraz stopnia wypełnienia

Tab. 2. Comparison of natural frequencies and damping factors for various geometries and degrees of filling

St. wyp., %		L	H	L	H	L	H	L	H
15	$f$ , Hz	674	689	811	822	1072	1074	1228	1261
	$\delta$ , %	9.64	9.51	5.36	6.27	3.17	2.93	1.43	1.94
20	$f$ , Hz	659	674	805	817	1067	1076	1230	1260
	$\delta$ , %	9.79	9.57	5.16	9.00	2.95	3.25	1.38	1.94
25	$f$ , Hz	653	670	804	819	1072	1083	1228	1262
	$\delta$ , %	10.49	9.93	5.22	9.16	3.08	3.51	1.47	1.70
30	$f$ , Hz	655	659	807	818	1076	1074	1260	1261
	$\delta$ , %	10.15	9.94	9.17	6.23	3.35	3.35	1.59	1.74
40	$f$ , Hz	655	667	818	828	1082	1083	1260	1263
	$\delta$ , %	10.69	10.12	6.05	10.08	3.42	3.55	1.69	1.90
50	$f$ , Hz	658	668	825	838	1079	1094	1260	1263
	$\delta$ , %	10.87	11.15	9.64	10.08	3.34	3.70	1.71	1.66



materiału podczas druku. Już przy stopniu wypełnienia na poziomie 40% uzyskuje się wystarczającą powtarzalność w próbach rozciągania, co stwarza możliwość wykonywania elementów o takim lub wyższym stopniu wypełnienia, w stosunku do elementów pełnych (100% wypełnienia).

Przy wytwarzaniu elementów w technice FDM należy zwrócić szczególną uwagę na utrzymanie właściwej temperatury podawanego ekstrudera filamentu. Dla PLA, który został użyty do wytworzenia próbek w opisywanych badaniach, zakres temperatur wynosi 185÷210 °C. W przypadku przekroczenia tej temperatury mogą pojawić się wady w postaci szczelin i/lub nadtopień oraz niezachowaniem tolerancji wymiarowych elementów, co potwierdzają badania opisane w pracy [11]. Prędkość druku nie wpływa bezpośrednio na wytrzymałość drukowanych elementów, jednak przy wysokich prędkościach druku, maszyna drukująca powinna zostać wyposażona w odpowiednio mocny blok grzejny na głowicy drukującej, w związku z większą ilością materiału przechodzącą przez głowicę w jednostce czasu oraz odpowiednio wydajny system chłodzenia elementu. Gdy jeden z tych podzespołów zawodzi, skutkuje to nierównomierną ścieżką wytłaczanego materiału, co powoduje punktowe osłabienie struktur wypełnienia.

## BIBLIOGRAFIA

1. Murphy S., Atala A.: *3D bioprinting of tissues and organs*. Nature Biotechnology 2014, vol. 32, nr 8, s. 733-785.
2. Chia H. N., Wu B. M.: *Recent advances in 3D printing of biomaterials*. Journal of Biological Engineering 2015, vol. 9, nr 4, s. 1-14.
3. Gu Q., Hao J., Lu Y., Wang L., Wallace G. G., Zhou Q.: *Three-dimensional bio-printing*. Science China Life Sciences 2015, vol. 58, nr 5, s. 411-419.
4. Cader M., Trojnecki M.: *Analiza możliwości zastosowania technologii przyrostowych do wytwarzania elementów konstrukcji robotów mobilnych*. Pomiary Automatyka Robotyka 2013, vol. 17, nr 2, s. 200-207.
5. Skawiński P., Siemiński P., Błazucki P.: *Zastosowanie przyrostowej metody FDM/FFF do wytwarzania kół przekładni zębatych*. Mechanik 2015, vol. 88, nr 12, s. 173-179.
6. Płatek P., Zahor M.: *Zastosowanie metody FDM techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania modułowego systemu broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm (MSBS-5,56)*. Problemy Techniki Uzbrojenia 2009, vol. 38, nr 110, s. 95-102.
7. Olszewski J.: *Analysis of material properties in respect of material interior styles used in Fused Deposition Modelling*. Pomiary Automatyka Robotyka 2011, vol. 15, nr 9, s. 80-83.
8. Wichniarek R., Górski F., Kuczko W.: *Analiza wpływu stopnia wypełnienia wyrobów wytwarzanych metodą modelowania uplastycznionym tworzywem polimerowym na ich dokładność kształtową*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, vol. 18, nr 5, s. 535-540.
9. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W.: *Influence of filling type on strength of parts manufactured by Fused Deposition Modelling*. Journal of Machine Engineering 2014, vol. 14, nr 3, s. 113-125.
10. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W.: *Wpływ orientacji części na wytrzymałość modeli z ABS wytwarzanych techniką modelowania uplastycznionym tworzywem polimerowym*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, vol. 18, nr 5, s. 428-435.
11. Górski F., Kuczko W., Wichniarek R.: *Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology*. Advances in Science and Technology 2013, vol. 7, nr 19, s. 27-35.
12. John M., Tyczka M., Kokot G., Skarka W.: *Wpływ kąta ułożenia warstw włókien elementu wykonanego metodą FDM na wytrzymałość na zginanie*. Mechanik 2015, vol. 88, nr 12, s. 107-110.
13. Katunin A.: *Modal parameters and damping of selected industrial laminates*. Przegląd Mechaniczny 2015, vol. 74, nr 11, s. 40-43.

Publikację przyjęto do druku 28-11-2016