Oryginalny artykuł naukowy (Original research paper)

prof. dr hab. inż. Joanna Dulińska[1)*)]
ORCID: 0000-0002-4180-8120
dr inż. Paweł Boroń[1)]
ORCID: 0000-0003-4977-6574
prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara[1)]
ORCID: 0000-0002-4071-2358
prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik[2)]
ORCID: 0000-0003-3598-2860
dr inż. Łukasz Przeszłowski[2)]
ORCID: 0000-0002-1212-9069

Przydatność polimerów stosowanych w technologii druku 3D do budowy modeli doświadczalnych służących do badań dynamicznych na stole wstrząsowym

The suitability of polymers used in 3D printing technology for building experimental models for dynamic tests on a shaking table

DOI: 10.15199/33.2024.01.04

Streszczenie. Technologia druku 3D ma coraz większe zastosowanie w budownictwie. W artykule zaprezentowano ocenę przydatności wybranych polimerów do druku modeli laboratoryjnych służących do identyfikacji częstotliwości drgań własnych obiektów na stole wstrząsowym. Wyznaczono doświadczalnie parametry fizykomechaniczne polimerów, a także obliczono skale podobieństwa w przypadku modeli wydrukowanych z analizowanych polimerów. Wskazano na parametry materiałowe polimerów warunkujące możliwość i zasadność ich stosowania w badaniach dynamicznych na stole wstrząsowym.
Słowa kluczowe: druk 3D; charakterystyki materiałowe; model dynamiczny; model doświadczalny.

Abstract. 3D printing technology is gradually becoming more employed in civil engineering. The article assesses the suitability of selected polymers for printing laboratory models used to identify the natural frequencies of structures on a shaking table. Experimental physical and mechanical parameters of the polymers were determined, and similarity scales were calculated for models printed with the analysed polymers. The material parameters of the polymers determining the possibility and validity of their use in dynamic tests on a shaking table were also indicated.
Keywords: 3D printing; material characteristics; dynamic model; experimental model.

Badania na modelach laboratoryjnych są tańszą alternatywą w porównaniu z badaniami in situ. W analizach dynamicznych konstrukcji inżynierskich szczególnie użyteczne są badania modeli budowli na stołach wstrząsowych. Umożliwiają one wyznaczenie charakterystyk dynamicznych modelu czy też jego odpowiedzi na wymuszenia sejsmiczne. Charakterystyki dynamiczne modelu pozwalają z kolei na identyfikację cech dynamicznych konstrukcji rzeczywistej (prototypu) na bazie tzw. skal podobieństwa modelu i prototypu [1, 2]. Bazową skalą podobieństwa jest skala podobieństwa geometrycznego [3]. Wymiary modelu muszą odzwierciedlać wymiary prototypu w zadanej skali. Spełnienie kryterium podobieństwa geometrycznego w przypadku konstrukcji stalowych (metalowych), z zastosowaniem w modelach materiałów oryginalnych, z których wykonano konstrukcję rzeczywistą, jest trudne, a czasem wręcz niemożliwe. Z tego względu materiał, z którego wykonano prototyp, zastępowany jest w modelu innym materiałem, umożliwiającym spełnienie tego kryterium. Obecnie często spotykanym rozwiązaniem jest budowanie modeli z materiałów wykorzystywanych w technologiach addytywnych, które stają się coraz bardziej dostępne i tanie. Technologia druku 3D z użyciem polimerów pozwala na odwzorowanie skomplikowanej geometrii prototypu o bardzo cienkich ścianach.

W pracach [4, 5] autorzy przedstawili analizy odpowiedzi dynamicznej sklepień krzyżowych kaplic na wstrząsy sejsmiczne, a przede wszystkim określili schematy pęknięć i mechanizmy zawalenia się sklepienia przy wymuszeniu wstrząsem sejsmicznym. W badaniach prowadzonych na stole wstrząsowym posłużono się modelami wykonanymi z polimerowych elementów drukowanych w technologii 3D.

Technologia druku 3D modelu o bardzo złożonej geometrii umożliwiła autorom pracy [6] analizę dynamiczną sali *Meiso no Mori* w Japonii o nieregularnym kształcie. Model wydrukowano z betonu. Celem testów było określenie stateczności dynamicznej obiektu na wymuszenie sejsmiczne z użyciem stołu wstrząsowego. Z kolei autorzy pracy [7], stosując metodę druku 3D, wykonali z betonu model domu jedno-

[1)] Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej
[2)] Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
[*)] Adres do korespondencji: jdulinsk@pk.edu.pl

rodzinnego w skali rzeczywistej. Badania pozwoliły na określenie przydatności i opłacalności technologii druku 3D w wykonawstwie budowlanym, a także umożliwiły określenie odporności sejsmicznej obiektów w skali rzeczywistej. Popularyzacja druku 3D znalazła zastosowanie również w badaniach elementów tłumiących. W pracach [8, 9] zaprezentowano badania na stole wstrząsowym izolatorów sejsmicznych i elementów tłumiących drukowanych z materiałów polimerowych. Badania umożliwiły określenie charakterystyk dynamicznych i wydajności proponowanych rozwiązań izolacyjnych.

Elementy drukowane w technologii 3D mogą mieć zastosowanie w ochronie budynków podczas wstrząsów sejsmicznych [10]. W badaniach na stole wstrząsowym wydrukowany materiał o strukturze inspirowanej materiałem biologicznym zastosowany został jako interfejs pomiędzy fundamentem obiektu a podłożem. Wyniki badań wskazują, że materiał charakteryzował się dobrymi parametrami tarcia i pozytywnie wpływał na stabilność konstrukcji narażonych na trzęsienie ziemi.

Bogata gama polimerów dostępnych na rynku, wykorzystywanych w druku 3D, różni się znacznie parametrami, takimi jak gęstość, moduł sprężystości, granica sprężystości czy liniowości. Co równie istotne, na wartość niektórych parametrów mogą mieć wpływ także parametry technologiczne produkcji, a przede wszystim kierunek nakładania kolejnych warstw materiału [11]. Należy więc mieć świadomość, że nie wszystkie materiały można stosować do druku 3D modeli do badań dynamicznych na stole wstrząsowym. Dobór materiału warunkowany jest możliwością spełnienia kryteriów podobieństwa modelowego. Przy doborze materiału modelowego muszą być również brane pod uwagę ograniczenia techniczne konkretnego stołu wstrząsowego, na którym model będzie badany.

W artykule opisano doświadczalne wyznaczenie i porównanie wybranych parametrów fizykomechanicznych polimerów wykorzystywanych do druku 3D w kontekście możliwości ich zastosowania w procesie budowy modeli doświadczalnych przeznaczonych do badania charakterystyk dynamicznych (tj. częstotliwości i postaci drgań własnych) obiektów na stole wstrząsowym. Nowością jest ocena wybranych polimerów dostępnych na rynku pod kątem ich przydatności do budowy modeli służących do badań charakterystyk dynamicznych konstrukcji z użyciem stołu wstrząsowego. Z naszej wiedzy wynika, że taka ocena nie była dotychczas zaprezentowana.

Skale podobieństwa jako kryteria doboru polimeru do druku modelu w technologii 3D

Podstawą badań częstotliwości drgań własnych konstrukcji na stole wstrząsowym jest model doświadczalny zbudowany w odpowiedniej skali, który musi spełniać tzw. kryteria podobieństwa, aby wyniki badań były odwzorowaniem rzeczywistości. Teorię podobieństwa określa twierdzenie π-Buckingham [12], zgodnie z którym każdą wielkość fizyczną można przedstawić za pomocą zmiennych bezwymiarowych, określanych jako stosunek parametru modelu do jego odpowiednika w konstrukcji prototypowej, nazywany skalą (kryterium) podobieństwa parametru S_i. Najważniejsze skale podobieństwa stosowane w dynamice konstrukcji i wzory na ich wyprowadzenie zestawiono w tabeli 1. Należy podkreślić, że w badaniach dynamicznych podstawowymi elementami bazy wymiarowej charakteryzującymi materiał są moduł sprężystości E oraz gęstość ρ.

Podczas badań modelowych muszą być respektowane ograniczenia wynikające z technicznego aspektu badań, m.in. z zakresu częstotliwości możliwych do uzyskania na stole wstrząsowym, z limitu maksymalnych amplitud drgań stołu czy z gabarytów i geometrii modelu umożliwiających jego montaż w przestrzeni badawczej. W badaniach charakterystyk dynamicznych na stołach wstrząsowych kluczowe znaczenie ma skala podobieństwa częstotliwościowego. Każdy stół charakteryzuje się bowiem określoną górną granicą częstotliwości, przy której można uzyskać stabilne wymuszenie drgań modelu. Częstotliwość drgań własnych modeli nie może wykraczać poza zakres częstotliwości możliwych do realizacji na stole. W przypadku dużych wartości skali podobieństwa częstotliwościowego warunek ten jest trudny do spełnienia. Możliwość jego realizacji stanowi więc podstawowe kryterium doboru materiału modelowego do druku 3D modelu doświadczalnego w wybranej technologii 3D.

Tabela 1. Skale podobieństwa w bezwymiarowej analizie modelowej [13]
Table 1. Similarity scales in unidimensional model analysis [13]

Parametr	Skala podobieństwa S	Wzór
Geometria d	S_d	S_d – baza wymiarowa
Moduł sprężystości E	S_E	S_E – baza wymiarowa
Gęstość ρ	S_ρ	S_ρ – baza wymiarowa
Częstotliwość f	S_f	$S_d^{-1} \cdot S_\rho^{-0,5} \cdot S_E^{0,5}$
Przyspieszenie a	S_a	$S_d^{-1} \cdot S_\rho^{-1} \cdot S_E$
Masa m	S_m	$S_d^3 \cdot S_\rho$

Metoda badania materiałów drukowanych w technologii 3D

Procedura wyznaczania modułu sprężystości materiałów polimerowych. Wykorzystano dwie metody służące do określenia wartości modułu sprężystości badanych polimerów, a mianowicie próbę statycznego rozciągania oraz próbę statycznego ściskania. Ostateczną wartość modułu sprężystości poszczególnych materiałów wyznaczono jako wartość średnią wszystkich prób rozciągania i ściskania. Do każdej serii badań wykonano próbki w kształcie odpowiadającym wymaganiom testów doświadczalnych, dbając o odpowiedni reżim technologiczny (próbki były identyczne, wykonano je metodą ciągłego nakładania z zachowaniem homogeniczności materiału).

Określenie modułu sprężystości metodą statycznego rozciągania przeprowadzono na podstawie procedur opisanych w PN-EN ISO 527-1:2020-01 [14] oraz PN-EN ISO 527-2:2012 [15]. W badaniach wykorzystano próbki w kształcie wiosełka o wymiarach zgodnych z normą [15]. Podczas badania próbka poddawana jest wstępnemu naprężeniu rozciągającemu o wartości nieprzekraczającej 1/2000 spodziewanej wartości modułu sprężystości, a na-

stępnie osiowemu rozciąganiu ze stałą prędkością 1% odkształceń na minutę (0,01 L_0/min, gdzie L_0 stanowi bazę pomiarową, czyli rozstaw ekstensometrów). Moduł sprężystości wyznacza się ze wzoru:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

gdzie:
σ_1 i σ_2 – wartości naprężeń uzyskane odpowiednio przy odkształceniach ε_1 i ε_2.

Określenie modułu sprężystości na podstawie statycznego ściskania przeprowadzono zgodnie z instrukcjami zawartymi w PN-EN ISO 604-2006 [16]. W badaniu zastosowano prostopadłościenne próbki o wymiarach 50 x 10 x 4 mm. Podczas badania próbka poddawana jest osiowemu ściskaniu ze stałą prędkością 2% odkształceń na minutę. Odkształcenie próbki wyznacza się na bazie przemieszczeń płyt maszyny ściskającej.

Procedura wyznaczania gęstości materiałów polimerowych. Gęstość materiałów polimerowych określono jako stosunek masy poszczególnych próbek do ich objętości. Gęstość określoną wg tej procedury można uznać za prawidłową, przyjmując założenie homogeniczności materiału, a także zakładając, że jest on wykonany precyzyjnie, tzn. nie zawiera pustek powietrznych, rozwarstwień ani wtrąceń. Dokonano pomiaru gęstości wszystkich próbek przeznaczonych do badania modułu sprężystości. Warto nadmienić, że pomiar masy i objętości próbek wykonano przed przystąpieniem do badań mających na celu określenie modułu sprężystości.

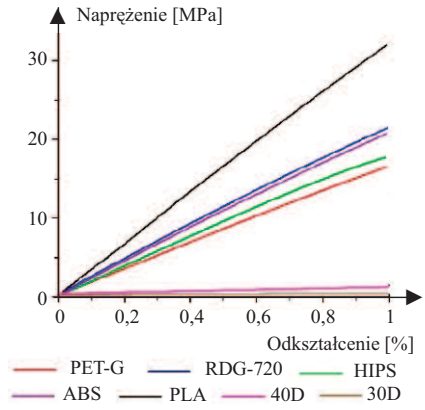
Wyniki badań doświadczalnych

Polimery wybrane do druku 3D modeli laboratoryjnych. Przeprowadzono analizę sześciu powszechnie dostępnych na rynku filamentów oraz fotopolimeru w postaci żywicy w kontekście możliwości ich użycia do druku 3D modelu konstrukcji rzeczywistej, tzn. komina żelbetowego o wysokości 120 m. Badano następujące materiały: politereftalan etylenu (PET-G); fotopolimer PolyJet (RDG-720); polistyren wysokoudarowy (HIPS); kopolimer akrylonitrylo-butadienowo-styrenowy (ABS); bioplastik (kwas polimlekowy) (PLA); Fiberflex (30D) oraz Fiberflex (40D). Wyselekcjonowane materiały były zróżnicowane pod kątem sztywności, gęstości, granicy sprężystości, a także łatwości obróbki. W przypadku każdego z wyselekcjonowanych polimerów wyznaczono moduł sprężystości oraz gęstość, tj. podstawowe parametry materiałowe potrzebne do określenia kryteriów podobieństwa. Ich spełnienie determinowało przydatność danego materiału do badań na stole wstrząsowym.

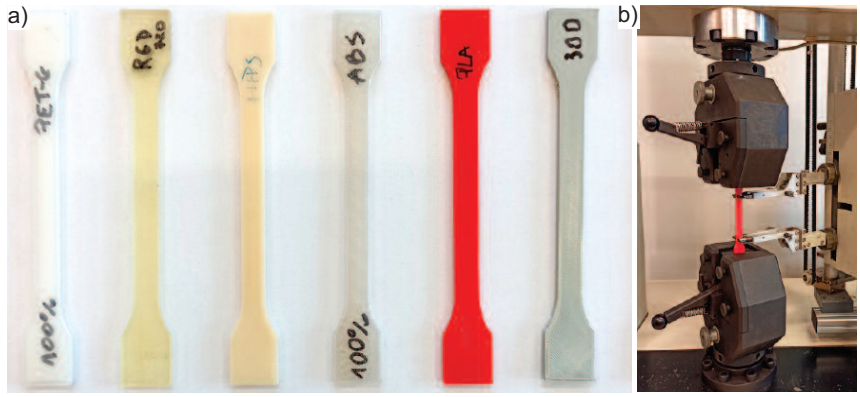
Doświadczalnie wyznaczone moduły sprężystości materiałów polimerowych. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na próbkach wydrukowanych w technologii 3D. Z każdego wybranego polimeru przygotowano 6 próbek. Na fotografii 1a pokazano próbki wykonane z każdego z wyselekcjonowanych materiałów, a na fotografii 1b schemat mocowania próbki w trakcie badań.

kształcenie w przypadku każdej próbki. Na rysunku 1 zaprezentowano wybrane krzywe naprężenie-odkształcenie, uzyskane podczas badania każdego z materiałów.

Na podstawie uzyskanych wyników określono moduł sprężystości (wg wzoru 1) każdej z sześciu próbek każdego z polimerów, a następnie określono wartość średnią, a także odchylenie standardowe modułu sprężystości (tabela 2).



Rys. 1. Zależność naprężenie-odkształcenie uzyskane podczas rozciągania próbki
Fig. 1. Stress-strain relationship obtained in the tensile tests



Fot. 1. Badanie modułu sprężystości w próbie rozciągania: a) próbki wykonane w technologii druku 3D; b) zamocowanie próbki do testu rozciągania
Photo 1. Elastic modulus testing in the tensile test: a) specimens printed in 3D technology; b) specimen fixed for the tensile test

Podczas próby rozciągania, próbki umieszczano pomiędzy szczękami maszyny w rozstawie 115 mm. Długość bazy pomiarowej (rozstaw ramion ekstensometru), służąca do obliczania odkształceń próbki, wynosiła 75 mm. Długość bazy dobrano w taki sposób, aby pomiar wydłużenia próbki odbywał się w jej środkowej części (w przewężeniu). Podczas próby rozciągania rejestrowano zmianę odległości ramion ekstensometru, przemieszczenie głowicy, a także wartość siły rozciągającej. Na podstawie uzyskanych danych skonstruowano zależność naprężenie-od-

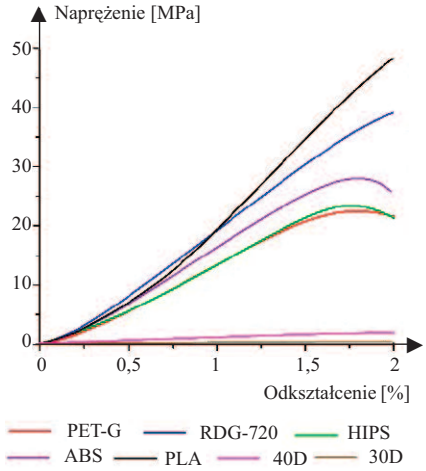
Na podstawie danych zaprezentowanych w tabeli 2 stwierdzono, że wybrane polimery różnią się znacznie wartością modułu sprężystości. Najbardziej elastycznymi materiałami są filamenty 30D oraz 40D, a najbardziej sztywny jest filament PLA. Sztywność tych materiałów różni się o dwa rzędy wielkości. Dodatkowo warto podkreślić, że wartość odchylenia standardowego każdej serii próbek jest niewielka.

Tabela 2. Wartości średnie modułów sprężystości polimerów oraz ich odchylenie standardowe uzyskane w próbach rozciągania
Table 2. Average values of the elastic moduli of the polymers and their standard deviations obtained in the tensile tests

Materiał	Średni moduł sprężystości [GPa]	Odchylenie standardowe [GPa]
PET-G	1,642	0,068
RDG-720	2,222	0,070
HIPS	1,846	0,071
ABS	2,126	0,066
PLA	3,165	0,144
40D	0,045	0,005
30D	0,026	0,002

Oznacza to, że próbki wykonano, dochowując należytej staranności i dbając o odpowiedni reżim technologiczny. Istotne, aby próbka była wykonana metodą ciągłego nakładania z zachowaniem homogeniczności materiału, a także powtarzalności wykonanych elementów.

Próbę osiowego ściskania przeprowadzono na serii sześciu próbek wykonanych z każdego analizowanego polimeru (fotografia 2a). Łącznie przebadane zostały 42 próbki. Podczas badania próbki umieszczano na środku dolnej płyty, a następnie dociskano płytą górną (fotografia 2b). Rejestrowano przemieszczenie płyty górnej, a także siłę ściskającą. Na podstawie danych pomiarowych sporządzono zależność naprężenie-odkształcenie w przypadku każdej próbki (rysunek 2). Wynika z niego, że w początkowej fazie badania (przy odkształceniach mniejszych niż 0,25%) zależność naprężenie-odkształcenie jest nieliniowa, po przekroczeniu tej wartości następuje liniowa praca materiału. Zjawisko to dotyczy każdej próbki niezależnie od materiału, z którego została wykonana. Wynika to prawdopodobnie z imperfekcji występujących na bocznych krawędziach próbki. Ze względu na niewielki jej rozmiar, a w szczególności niewielką powierzchnię styku próbki z płytami maszyny, każda nierówność może prowadzić do zaburzenia wyników. Przy większej wartości siły ściskającej (większym odkształceniu) zjawisko to nie miało zauważalnego wpływu na rezultaty. W związku z tym zdecydowano, że do obliczeń modułu sprężystości wykorzystany zostanie zakres 0,25 – 1,5% odkształcenia. Bazując na uzyskanych wynikach pomiarów, wyznaczono moduł sprężystości ze wzoru 1 (tabela 3).



Rys. 2. Zależność naprężenie-odkształcenie uzyskane podczas ściskania próbki
Fig. 2. Stress-strain relationship obtained in the compression tests

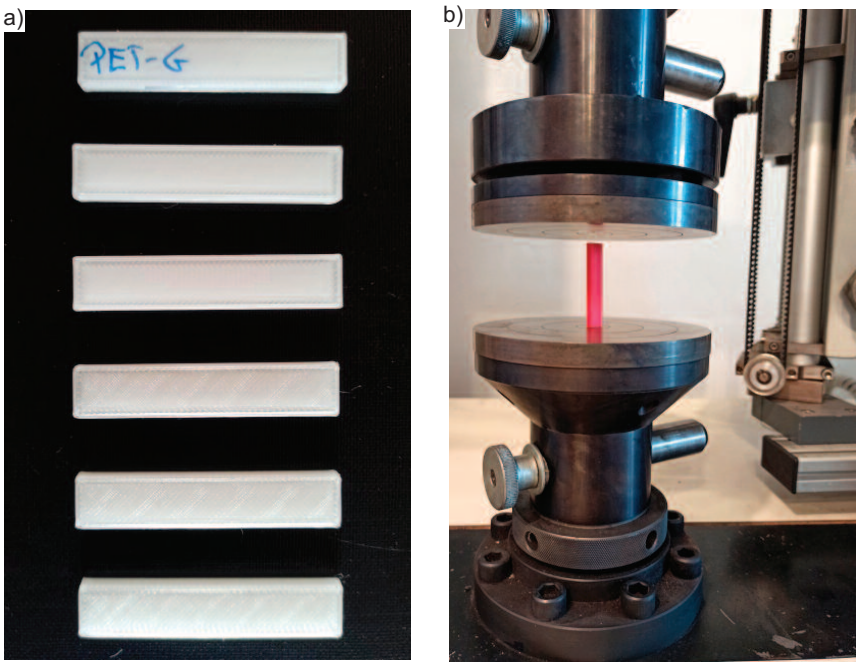
Na podstawie danych zaprezentowanych w tabeli 3 stwierdzono, że najbardziej sztywnym materiałem jest PLA, natomiast filamenty 30D i 40D wykazały najmniejszą wartość modułu sprężystości.

Tabela 3. Średnie wartości modułów sprężystości polimerów oraz ich odchylenia standardowe uzyskane w próbach ściskania
Table 3. Average values of the elastic moduli of the polymers and their standard deviations obtained in the compression tests

Materiał	Średni moduł sprężystości [GPa]	Odchylenie standardowe [GPa]
PET-G	1,588	0,036
RDG-720	2,248	0,023
HIPS	1,669	0,102
ABS	1,993	0,078
PLA	3,084	0,103
40D	0,047	0,005
30D	0,022	0,003

Bazując na rezultatach uzyskanych z prób rozciągania i ściskania, obliczono średnią wartość modułu sprężystości poszczególnych materiałów polimerowych (tabela 4). Warto podkreślić, że różnice wartości modułów sprężystości poszczególnych polimerów uzyskane na podstawie prób rozciągania i ściskania nie przekraczają 10%.

Doświadczalnie wyznaczone gęstości materiałów polimerowych. Gęstość wyselekcjonowanych polimerów określono, bazując na masie próbek oraz ich objętości. Każdą z 84 próbek (12 próbek z każdego z siedmiu mate-



Fot. 2. Badanie modułu sprężystości metodą ściskania: a) próbki wykonane w technologii druku 3D; b) zamocowanie próbki do próby ściskania
Photo 2. Elastic modulus testing using compression test: a) specimens printed in 3D technology; b) specimen fixed for compression test

Tabela 4. Średnie wartości modułów sprężystości uzyskane w badaniach doświadczalnych
Table 4. Average values of elastic moduli obtained in the experimental tests

Materiał	Średni moduł sprężystości [GPa]		Wartość uśredniona
	próba rozciągania	próba ściskania	
PET-G	1,642	1,588	1,615
RDG-720	2,222	2,248	2,235
HIPS	1,846	1,669	1,758
ABS	2,126	1,993	2,060
PLA	3,165	3,084	3,124
40D	0,045	0,047	0,046
30D	0,026	0,022	0,024

riałów) zważono, a następnie określono jej objętość na podstawie rzeczywistych wymiarów zewnętrznych. W obliczeniach założono całkowite wypełnienie objętości próbki materiałem. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obliczono średnią gęstość każdego materiału (tabela 5).

Tabela 5. Średnia gęstość polimerów oraz odchylenie standardowe wyznaczone doświadczalnie
Table 5. Average values of polymers densities and their standard deviations determined experimentally

Materiał	Średnia gęstość [kg/m^3]	Odchylenie standardowe [kg/m^3]
PET-G	1205,23	3,07
RDG-720	1161,84	2,10
HIPS	996,44	3,10
ABS	1072,04	2,74
PLA	1221,84	2,67
40D	1101,34	5,32
30D	1056,45	8,03

Analiza przydatności materiałów polimerowych do identyfikacji częstotliwości drgań własnych modelu

Określenie charakterystyk materiałowych polimerów umożliwiło ocenę ich przydatności do druku 3D modeli doświadczalnych przeznaczonych do badań na stole wstrząsowym. W tym celu określono skale podobieństwa w przypadku modeli wydrukowanych z poszczególnych materiałów polimerowych.

Analiza dynamiczna dotyczyła rzeczywistej konstrukcji (prototypu), którą był żelbetowy komin o wysokości 120 m. Co istotne, autorzy dysponowali zarówno wynikami badań doświadczalnych prowadzonych na rzeczywistym obiekcie, jak i wynikami analiz numerycznych częstotliwości i postaci drgań własnych komina [17 – 19]. Kolejne częstotliwości drgań własnych komina (prototypu) wynosiły: f_1 = 0,36 Hz, f_2 = 1,57 Hz, f_3 = 4,40 Hz, f_4 = 6,91 Hz.

Ze względu na ograniczenia przestrzeni roboczej stołu wstrząsowego zadecydowano, że wysokość modelu będzie wynosić 1 m, co oznaczało przyjęcie skali 1 : 120 i skali podobieństwa geometrycznego równej 1 : 120 = 0,0083 w przypadku wszystkich rodzajów polimeru. Zdecydowano, że bazę wymiarową modeli stanowić będą skale podobieństwa geometrii, modułu sprężystości oraz gęstości. Przy takich założeniach dokonano obliczenia skali podobieństwa częstotliwościowego w przypadku wszystkich badanych materiałów. Rezultaty obliczeń zestawiono w tabeli 6.

Każdy stół wstrząsowy charakteryzuje się określoną górną granicą częstotliwości, przy której można uzyskać stabilne wymuszenie, np. na stole wstrząsowym będącym w dyspozycji Politechniki Krakowskiej i firmy ABB można zrealizować stabilne wymuszenie o maksymalnej częstotliwości 80 Hz. W przypadku dużych wartości skali podobieństwa częstotliwościowego, częstotliwości drgań własnych modelu mogą więc wykraczać poza zakres częstotliwości możliwych do realizacji na stole. Takiej częstotliwości nie można oczywiście zidentyfikować za pomocą badań na stole wstrząsowym. W tabeli 7 zestawiono częstotliwości drgań własnych komina (prototypu) oraz częstotliwości drgań własnych modeli laboratoryjnych wydrukowanych z siedmiu analizowanych materiałów polimerowych. Wartości częstotliwości modeli uzyskano z zastosowaniem skal podobieństwa częstotliwościowego.

Analiza wartości z tabeli 7 jasno pokazuje, które częstotliwości drgań własnych modeli można uzyskać na stole wstrząsowym o maksymalnej częstotli-

Tabela 6. Wartość skal podobieństwa uzyskanych na podstawie określonych doświadczalnie parametrów materiałowych poszczególnych polimerów
Table 6. Similarity scales of polymers obtained on the basis of the experimentally determined material parameters

Skala podobieństwa	Materiał						
	PET-G	RDG-720	HIPS	ABS	PLA	40D	30D
Geometria S_d	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083
Moduł sprężystości S_E	0,0466	0,0623	0,0503	0,0594	0,0905	0,00137	0,00069
Gęstość S_p	0,482	0,465	0,399	0,429	0,489	0,441	0,423
Częstotliwość S_f	37,31	43,92	42,62	44,66	51,65	6,70	4,83

Tabela 7. Częstotliwość drgań własnych komina (prototypu) oraz częstotliwość drgań własnych modeli wydrukowanych z analizowanych polimerów
Table 7. The natural frequencies of the chimney (prototype) and the natural frequencies of models printed with the analyzed polymers

Materiał	Skala podobieństwo częstotliwościowego [-]	Częstotliwość [Hz]				Częstotliwość możliwa do wyzaczenia z badań na stole
		I	II	III	IV	
Prototyp	1	0,365	1,57	4,40	6,91	
PET-G	37,31	13,61	58,57	164,16	257,81	I – II
RDG-720	43,92	16,03	68,95	193,24	303,48	I – II
HIPS	42,62	15,55	66,91	187,52	294,50	I – II
ABS	44,66	16,30	70,11	196,50	308,60	I – II
PLA	51,65	18,85	81,09	227,26	356,90	I
40D	6,70	2,44	10,51	29,48	46,29	I – IV
30D	4,83	1,76	7,58	21,25	33,37	I – IV

wości wymuszenia 80 Hz. Okazuje się, że w przypadku modelu wydrukowanego z filamentu PLA możliwa jest identyfikacja jedynie pierwszej częstotliwości drgań własnych modelu, a co za tym idzie prototypu. Wydruk modelu z polimerów PET-G, RDG-720, HIPS oraz ABS umożliwia identyfikację dwóch podstawowych częstotliwości własnych komina. Detekcja czterech podstawowych częstotliwości możliwa jest jedynie w przypadku wydruku modelu z filamentu 40D lub 30D. Filamenty te mają więc najkorzystniejsze parametry w kontekście oceny przydatności materiału polimerowego do wydruku modelu na stół wstrząsowy.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowno następujące wnioski ogólne dotyczące przydatności polimerów do druku w technologii 3D modeli laboratoryjnych przeznaczonych do badań charakterystyk dynamicznych obiektów na stołach wstrząsowych:

1) przeprowadzone badania doświadczalne sześciu wybranych popularnych na rynku filamentów oraz jednego fotopolimeru wskazują na duże zróżnicowanie parametrów fizykomechanicznych tych materiałów. Modele laboratoryjne wydrukowane w technologii 3D z badanych materiałów polimerowych mają więc zróżnicowaną sztywność i masę, co w konsekwencji prowadzi do różnych częstotliwości drgań własnych modeli o identycznej geometrii, ale wykonanych z różnych polimerów;

2) moduł sprężystości i gęstość materiału to podstawowe charakterystyki służące do określenia bazowych skal podobieństwa modelowego mające kluczowe znaczenie w badaniach dynamicznych przy obliczaniu skali podobieństwa częstotliwościowego modelu. W przypadku uzyskania dużych wartości skali podobieństwa częstotliwościowego, częstotliwość drgań własnych modelu może wykraczać poza zakres częstotliwości możliwych do realizacji na stole wstrząsowym. Takich częstotliwości nie będzie więc można zidentyfikować w badaniach;

3) podczas projektowania modelu doświadczalnego, służącego do wyznaczania częstotliwości i postaci drgań własnych obiektów na stołach wstrząsowych, autorzy powinni dążyć do uzyskania możliwie małych wartości skali podobieństwa częstotliwościowego modelu, przy zachowaniu jego sztywności i stabilności; należy to uwzględnić przy doborze materiału polimerowego do wydruku 3D modelu.

Wnioski te stanowią praktyczne wskazówki dla naukowców i inżynierów zajmujących się badaniami dynamicznymi z zastosowaniem modeli wykonanych w technologii druku 3D. W świetle przedstawionych analiz i wniosków niektóre dostępne na rynku materiały polimerowe mogą okazać się całkowicie nieprzydatne do budowy modeli do badań dynamicznych na stołach wstrząsowych. Ich parametry materiałowe nie pozwalają bowiem na zredukowanie wartości skali podobieństwa częstotliwościowego do poziomu, przy którym możliwe jest wyznaczenie żądanej liczby częstotliwości drgań własnych modelu.

Literatura

[1] Casaburo A, Petrone G, Franco F, De Rossa S. A review of similitude methods for structural engineering. Appl Mech Rev. 2019; http://doi.org/10.1115/1.4043787.

[2] Gaojie Y, Chunguang L. A model for underwater shaking table tests on the basis of different similar criteria. Appl Ocean Res. 2022; https://doi. org/10.1016/j. apor. 2021.103010.

[3] Tabatabaiefar HR, Mansoury B. Detail design, building and commissioning of tall building structural models for experimental shaking table tests. Struct Design Tall Spec Build. 2016; http://doi.org/10.1002/tal.1262.

[4] Silvestri S, Baraccani S, Foti D, Ivorra S, Theodossopoulos D, Vacca V, Roman JO, Cavallini L, Mokhtari E, White R, Dietz M, Mylonakis G. Shaking table testing of groin vaults made by 3D printers. Soil Dyn Earthq Eng. 2021; https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106880.

[5] Bianchini N, Mendes N, Calderini Ch, Lourenco P. B. Modelling of the dynamic response of a reduced scale dry joints groin vault. J Build Eng 2023; https://doi.org/10.1016/j.jobe. 2023.105826.

[6] Park MJ, Cheon G, Alemayehu RW, Ju YK. Seismic performance of F3D free-form structures using small-scale shaking table tests. Materials. 2022; 15: 2868. https://doi.org/10.3390/ma-15082868.

[7] Xu W, Huang S, Han D, Zhang Z, Gao Y, Feng P, Zhang D. Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house. Case Stud Constr Mater. 2022; https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442.

[8] Calhoun SJ, Harvey Jr. PS. Enhancing the teaching of seismic isolation using additive manufacturing. Eng Struct. 2018; https://doi.org/10.1016/j.engstruct. 2018.03.084.

[9] Wong J, Lakshmipathy L, Armas PJ, Paredes AE, Park C, Campos JA. Design and small-scale testing of 3d printed seismic isolators. In: 2019 ASEE Annual Conference & Exposition. 2019. No 26587.

[10] Elbaz Y, Naeem M, Leblouba M, Arab MG. Cyclic performance of 3D-printed snakeskin-bio-inspired interfaces. In: Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). 2022. http://doi.org/10.1109/ASET53988.2022.9734947.

[11] Boroń P, Dulińska J, Jurkowska N, Tatara T. Wpływ kąta rastrowania na właściwości mechaniczne polimeru PLA-IMPACT w technologii druku 3D. Materiały Budowlane. 2022; http://doi.org/10.15199/33.2022.04.02.

[12] Krawinkler H, Moncarz P. Similitude requirements for dynamic models. Aci publication. 1982; 73: 1 – 22.

[13] Li CS, Lam SS, Zhang MZ, Wong YL. Shaking table test of a 1: 20 scale high-rise building with a transfer plate system. J Struct Eng. 2006; https://doi. org/10.1061/(ASCE) 0733-9445 (2006) 132: 11 (1732).

[14] PN-EN ISO 527-1:2020-01, 2020 Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1: Zasady ogólne.

[15] PN-EN ISO 527-2:2012. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do prasowania, wtrysku i wytłaczania. 2012.

[16] PN-EN ISO 604-2006 Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy ściskaniu

[17] Tatara T, Ratajewicz B. Wpływ stanu technicznego komina żelbetowego na jego właściwości dynamiczne. Inżynieria i Budownictwo. 2015; 71 (1); 3 – 7.

[18] Ratajewicz B. Wpływ eksploatacji na charakterystyki dynamiczne jednoprzewodowych żelbetowych kominów przemysłowych. Rozprawa doktorska Politechnika Krakowska 2022.

[19] Tatara T, Ratajewicz B. The selection of a dynamic model of a RC chimney based on in situ research. In: Experimental Vibration Analysis for Civil Structures. EVACES 2017. Conte J, Astroza R, Benzoni G, Feltrin G, Loh K, Moaveni B., editors. 2018; https://doi. org/10.1007/978-3-319-67443-8_54.

Przyjęto do druku: 28.12.2023 r.