

dr inż. Paweł Boroń<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-4977-6574

prof. dr hab. inż. Joanna Dulińska<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-4140-8120

dr inż. Nadzieja Jurkowska<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-1287-2861

prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-4071-2358

# Wpływ kąta rastrowania na właściwości mechaniczne polimeru PLA-IMPACT w technologii druku 3D

## *Impact of raster angle on the mechanical properties of PLA-IMPACT polymer in 3D printing technology*

DOI: 10.15199/33.2022.04.02

**Streszczenie.** Celem pracy jest poznanie możliwości i uwarunkowań stosowania modeli wykonanych w technologii druku 3D do badań dynamicznych. Zaprezentowano metodę i wyniki badań określających parametry fizykomechaniczne polimeru PLA-IMPACT drukowanego z różnymi kątami rastrowania. Badania wykazały, że wartość modułu sprężystości polimeru nie zależy od kąta rastrowania, natomiast na granicę plastyczności ma wpływ kierunek laminacji, co wpływa w istotny sposób na realizację modeli obiektów do badań dynamicznych.

**Słowa kluczowe:** druk 3D; materiał PLA; charakterystyki materiałowe; model dynamiczny.

**Abstract.** The aim of the work is to identify the possibilities and conditions for the use of models made in 3D printing technology for dynamic experiments. The methodology and results of tests determining the physical and mechanical parameters of the PLA-IMPACT polymer printed with different screening angles are presented. The research showed that the value of the polymer modulus of elasticity does not depend on the rastering angle, while the yield point depends on the direction of lamination, which is of key importance in the implementation of models of objects for dynamic tests.

**Keywords:** 3D printing; PLA material; material characteristics; dynamic model.

Technologia druku przestrzennego, rozwijana od przeszło 30 lat, znalazła praktyczne zastosowanie w budownictwie. Autorzy prac naukowych przedstawiają wykorzystanie tej technologii zarówno podczas wykonywania projektu architektonicznego, jak i na etapie wznoszenia obiektów budowlanych [1 – 3]. Należy podkreślić przede wszystkim dużą liczbę prac związanych z zastosowaniem druku przestrzennego elementów lub całych obiektów budowlanych wznoszonych z betonu i betonu zbrojonego [4 – 6]. Opracowywane są nowe technologie druku obiektów betonowych, pozwalające na tworzenie złożonych kształtów powierzchni betonowych, które charakteryzują się dobrą jakością druku i wiernością geometryczną [7, 8]. Ułatwia to produkcję elementów o dowolnym kształcie i prowadzi do oszczędności betonu oraz wytwarzania lżejszych konstrukcji.

Szczególnie ważną grupę prac naukowych stanowią prowadzone symulacje

numeryczne, modelowanie analityczne i testy eksperymentalne konstrukcji wytwarzanych techniką druku przestrzennego. Badania te mają na celu ocenę ich właściwości mechanicznych oraz zachowania zarówno w zakresie liniowym, jak i nieliniowym, przy założeniu zewnętrznych oddziaływań statycznych i dynamicznych. Wiele prac poświęconych jest także wykorzystaniu druku 3D do izolacji drgań mechanicznych [9, 10] oraz wyznaczaniu charakterystyk dynamicznych konstrukcji prostych (wsporniki, belki wolnopodparte). Ich autorzy wyznaczają częstotliwości i postaci drgań własnych obiektów na drodze teoretycznej oraz doświadczalnej, a zgodność otrzymanych wyników wskazuje na poprawne przyjęcie parametrów fizykomechanicznych zastosowanych materiałów drukowanych w technologii 3D [11, 12].

Wymienione opracowania stanowiły dla nas inspirację do oceny możliwości wprowadzenia technologii druku 3D do dynamiki budowli, a przede wszystkim do realizacji modeli służących do badań na stołach wstrząsowych. Celem pracy jest poznanie możliwości i uwarunkowań drukowania w technologii 3D modeli badawczych z polimeru PLA-IMPACT,

przede wszystkim w kontekście zastosowania do badań dynamicznych. Polega ona na doświadczalnym wyznaczeniu zależności modułu sprężystości oraz wytrzymałości materiału od sposobu i kąta rastrowania. Znajomość parametrów fizykomechanicznych stosowanego polimeru pozwala na określenie kryteriów podobieństwa pomiędzy modelem a rzeczywistą konstrukcją. Posługiwanie się właściwie zdefiniowanymi kryteriami podobieństwa umożliwia z kolei transformację rezultatów uzyskanych w trakcie badań modelowych na spodziewane rezultaty w obiekcie rzeczywistym [13, 14].

Badania możliwości zastosowania polimeru PLA-IMPACT do testów dynamicznych przeprowadzono na przykładzie rzeczywistego komina o wysokości 120 m oraz modelu obiektu wykonanego z polimeru PLA-IMPACT z zachowaniem kryteriów i skal podobieństwa. Charakterystyki modelu wyznaczono na drodze numerycznej z zastosowaniem programu Abaqus i odniesiono je do wyników badań obiektu rzeczywistego.

Przedstawione badania są nowatorskie w kontekście możliwości użycia modeli drukowanych w technologii 3D do eksperymentalnych badań dynamicznych.

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: pawel.boron@pk.edu.pl

Z naszej wiedzy wynika bowiem, że badania nad zastosowaniem modeli drukowanych w technologii 3D do eksperymentów z dziedziny dynamiki budowli są wciąż rzadkie [15, 16] i dotyczą wyznaczania odpowiedzi dynamicznej drukowanych modeli na zadane wymuszenia, a nie zagadnień materiałowych ściśle związanych z techniką rastrowania.

### Materiały i metody badań

#### Kryteria wyboru materiału polimerowego PLA-IMPACT do druku 3D.

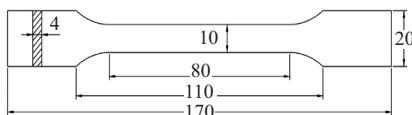
Ocena możliwości zastosowania modeli obiektów wykonanych w technologii druku 3D z polimerów w badaniach na stołach wstrząsowych musi bazować na poprawnie wyznaczonych parametrach materiałowych, takich jak moduł sprężystości, wytrzymałość oraz gęstość. W pracy zdecydowano się w sposób doświadczalny wyznaczyć parametry fizyko mechaniczne polimeru PLA-IMPACT i na ich podstawie określić zasadność jego stosowania w procesie druku 3D modeli badawczych przeznaczonych do badań na stołach wstrząsowych. PLA-IMPACT jest biodegradowalnym polimerem o dużej odporności na pęknięcie i złamanie wykonanym z surowców odnawialnych. W związku z tym zalecany jest do stosowania w przypadku elementów, które narażone są na pracę w trudnych warunkach obciążeniowych. Materiał z powodzeniem stosowany jest w przemyśle motoryzacyjnym i mechanicznym [17 – 20] oraz w bioinżynierii [21, 22]. Można więc przypuszczać, że PLA-IMPACT dobrze sprawdzi się w warunkach obciążenia dynamicznego.

Ze względu na proces technologiczny druku 3D, który polega na sukcesywnym nakładaniu kolejnych warstw tworzywa, wydrukowany obiekt ma strukturę warstwową, a więc elementy wykonane w tej technologii będą prawdopodobnie wykazywać cechy anizotropii. W konsekwencji może to prowadzić do znacznego różnicowania parametrów mechanicznych wydrukowanego elementu w zależności od ułożenia włókien materiału [23, 24].

#### Procedura wyznaczania modułu sprężystości polimeru PLA-IMPACT.

Określenie modułu sprężystości przeprowadza się, wykorzystując instrukcje zawarte w PN-EN ISO 527-1:2020-01 [25] oraz PN-EN ISO 527-2:2012 [26].

Moduł sprężystości materiału wyznacza się w próbie statycznego rozciągania próbek w kształcie wiosełka o wymiarach przedstawionych na rysunku 1. Istotne jest, aby próbka była wykonana metodą ciągłego nakładania kolejnych warstw polimeru, tzn. bez stosowania spoin i przerw roboczych. Zapobiega to niepożądanemu zjawisku delaminacji próbki w trakcie badania.



Rys. 1. Geometria próbki przeznaczonej do statycznej próby rozciągania

Fig. 1. Geometry of sample for static tensile test

Próbkę poddaje się osiowemu rozciąganiu przy założeniu wstępnego naprężenia rozciągającego o wartości nieprzekraczającej 0,05% spodziewanej wartości modułu sprężystości. Następnie przeprowadza się proces rozciągania próbki ze stałą prędkością na poziomie 1% odkształceń na minutę. W trakcie badania rejestruje się w sposób ciągły wydłużenie próbki materiału i prowadzi je do momentu przekroczenia 0,25% jej odkształcenia. Wartość modułu Younga oblicza się na podstawie wzoru (1):

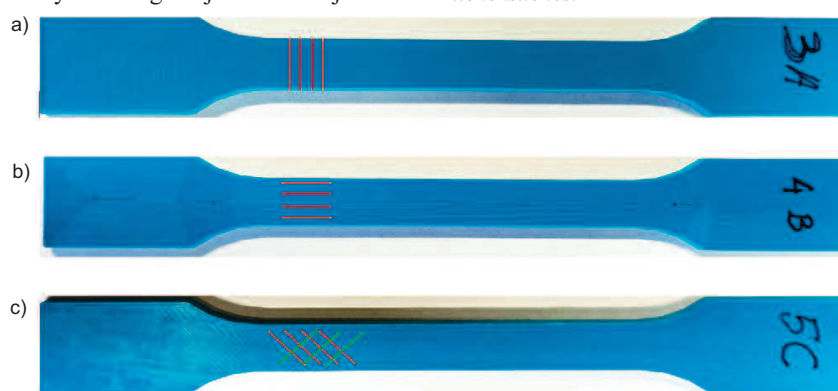
$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma_1, \sigma_2$  – wartości naprężenia przy odkształceniu odpowiednio  $\epsilon_1 = 0,0005$  i  $\epsilon_2 = 0,0025$ .

### Wyniki badań doświadczalnych

W celu wyznaczenia modułu sprężystości przygotowano 18 próbek w trzech różnych konfiguracjach laminacji w sto-



Rys. 2. Próbkki wydrukowane w technologii 3D o konfiguracji włókien: a) poprzecznej; b) podłużnej; c) pod kątem +/- 45°

Fig. 2. 3D printed specimen with: a) transverse; b) perpendicular; c) +/-45° angle raster arrangement

sunku do kierunku rozciągania: 6 próbek A o układzie warstw w kierunku poprzecznym (rysunek 2a), 6 próbek B o układzie warstw równoległym (rysunek 2b) i 6 próbek C o krzyżowym układzie warstw zachowujących kąt +/-45° (rysunek 2c). Na rysunkach zaznaczono kierunek włókien w każdej z próbek.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick Roell. Kolejne próbki umieszczono w szczękach maszyny o rozstawie początkowym 115 mm. Odległość pomiędzy uchwytami ekstensometru, stanowiącą długość bazy pomiarowej, ustalono na poziomie 75 mm. Sposób zamocowania próbki w maszynie wytrzymałościowej pokazano na fotografii 1.

Każdą z próbek poddano wstępnemu naprężeniu o wartości 0,5 MPa, a następnie rozciągano ze stałą prędkością 1% odkształceń na minutę. W trakcie



Fot. 1. Maszyna wytrzymałościowa wykorzystywana do próby statycznego rozciągania

Photo 1. The testing machine used for the static tensile test

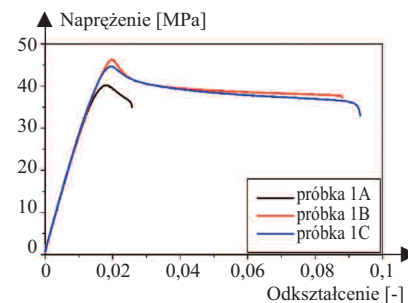
pomiaru rejestrowano przemieszczenie głowicy maszyny, siłę, a także zmianę długości próbki. Na rysunku 3 pokazano przykładową krzywą naprężenie-odkształcenie uzyskaną w przypadku próbki 1A. Następnie, wykorzystując wzór (3), określono wartość modułu sprężystości w przypadku każdej próbki (tabela 1).

Wartość modułu sprężystości poszczególnych próbek o tym samym układzie włókien charakteryzuje się dużą zgodnością. Odchylenie standardowe pomiarów serii próbek o poprzecznym układzie włókien (A) wynosi zaledwie 0,03 GPa, natomiast próbek o układzie podłużnym i krzyżowym odpowiednio 0,06 GPa i 0,02 GPa. Oznacza to, że próbki wykonane zostały z podobną dokładnością. Średnia wartość modułu sprężystości poszczególnych typów próbek wykazuje więc bardzo dużą zgodność, a więc moduł sprężystości materiału PLA-IMPACT nie różni się istotnie w zależności od kierunku laminacji.

W celu wyznaczenia granicy plastyczności materiału PLA-IMPACT

kontynuowano próbę rozciągania każdej próbki do momentu zerwania. Wartość granicy plastyczności poszczególnych próbek zestawiono w tabeli 2, natomiast na rysunku 4 zaprezentowano przykładowe zależności naprężenie-odkształcenie próbek o różnym układzie włókien.

Bazując na uzyskanych wynikach, określono granicę plastyczności poszczególnych próbek jako wartość naprężenia przy odkształceniu trwałym 0,2%. W przypadku próbek o podłużnym oraz krzyżowym układzie włókien wartość granicy plastyczności wynosi odpowied-



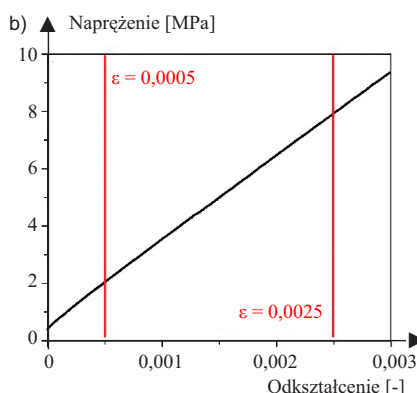
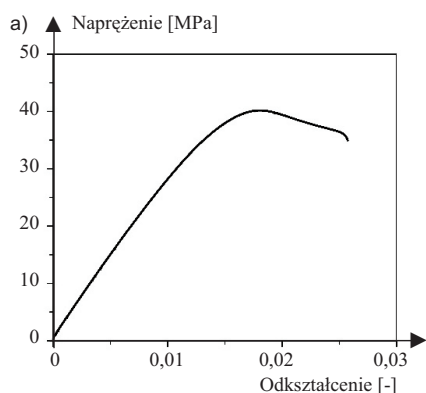
Rys. 4. Zależność naprężenie-odkształcenie w próbie statycznego rozciągania próbek 1A, 1B oraz 1C

Fig. 4. Comparison of the stress-strain curves for the static tensile test of samples 1A, 1B and 1C

Tabela 2. Wartości granicy plastyczności uzyskane w trakcie statycznej próby rozciągania

Table 2. The value of yield stress obtained from tensile static test

Próbka A	$\sigma_{pl}$ [MPa]	Próbka B	$\sigma_{pl}$ [MPa]	Próbka C	$\sigma_{pl}$ [MPa]
A1	36,62	B1	41,03	C1	41,21
A2	37,22	B2	42,21	C2	39,79
A3	38,16	B3	43,68	C3	40,11
A4	36,98	B4	41,79	C4	40,80
A5	35,02	B5	40,88	C5	40,47
A6	nie badano	B6	nie badano	C6	nie badano
$\sigma_{pl}$ [GPa]	36,8		41,9		40,5



Rys. 3. Zależność naprężenie-odkształcenie w próbie statycznego rozciągania próbki 1A: a) w przypadku całego testu; b) fragment krzywej wykorzystany do określenia wartości modułu sprężystości

Fig. 3. Stress-strain curve for 1A sample during tensile static test: a) for whole experiment; b) part of curve used to determine the Young modulus

Tabela 1. Moduł sprężystości uzyskany w trakcie statycznej próby rozciągania

Table 1. The Young modulus obtained from tensile static test

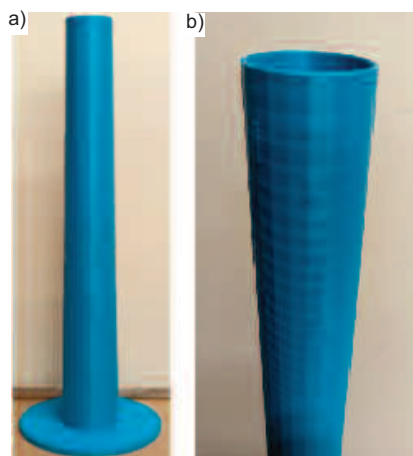
Próbka A	Moduł sprężystości [GPa]	Próbka B	Moduł sprężystości [GPa]	Próbka C	Moduł sprężystości [GPa]
A1	2,95	B1	2,90	C1	2,94
A2	2,93	B2	2,94	C2	2,90
A3	2,89	B3	3,03	C3	2,96
A4	2,96	B4	3,01	C4	2,95
A5	2,90	B5	2,92	C5	2,94
A6	2,95	B6	3,04	C6	2,94
$E_{sc}$ [GPa]	2,95		2,97		2,94
Odchylenie standardowe	0,03		0,06		0,02

nio 41,9 oraz 40,5 MPa. Najmniejszą wartość tego parametru uzyskano w przypadku próbek o poprzecznym układzie włókien. Wynosiła ona 36,8 MPa i była o ok. 10% mniejsza od granic plastyczności uzyskanych w przypadku pozostałych konfiguracji laminacji.

Ostatnim wyznaczonym parametrem była gęstość  $\rho$  materiału PLA-IMPACT obliczona na podstawie średniej masy próbki oraz jej objętości. W trakcie pomiaru objętości pominięto porowatość próbek, która może wynikać z obecności otworów i szczeliny pomiędzy poszczególnymi włóknami laminatu. Założono, że taki pomiar cechuje się wystarczającą dokładnością w zastosowaniach inżynierskich. Średnia objętość pojedynczej próbki wynosiła 9,6 cm<sup>3</sup>, a średnia masa 12,29 g. Ostatecznie wartość gęstości materiału PLA-IMPACT przyjęto równą 1,28 g/cm<sup>3</sup>.

### Wykorzystanie materiału PLA-IMPACT do druku 3D modeli do badań dynamicznych na stole wstrząsowym

Na fotografii 2a przedstawiono wydrukowany przestrzennie i przeznaczony do badań na stole wstrząsowym mo-



**Fot. 2. Model komina żelbetowego wykonany z materiału PLA-IMPACT w technologii druku 3D (a); fragment płaszcza komina z widoczną strukturą materiału i kierunkiem laminacji (b)**

*Photo 2. Model of concrete chimney made of PLA-IMPACT material created using 3D printing (a); detail of the chimney shaft with visible material structure and the lamination direction (b)*

del rzeczywistej konstrukcji, jaką był komin żelbetowy o wysokości 120 m, a na fotografii 2b fragment modelu przedstawiający strukturę materiału i kierunek laminacji. Ze względu na wymagane kryteria podobieństwa i możliwości technologiczne zdecydowano się na skalę geometrii 1 : 120.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że **wartość modułu sprężystości materiału PLA-IMPACT** nie różni się w sposób istotny w przypadku badanych kierunków laminacji. Ma to istotne znaczenie w przypadku druku przestrzennego modeli konstrukcji wysokich. Drukowanie modelu komina możliwe było jedynie w sposób spiralny z zachowaniem poziomego kierunku laminacji. Pokazane eksperymenty i ich rezultaty dowodzą więc, że poziomy kierunek laminacji zapewnia izotropię materiału modelu odwzorowującą izotropię materiału konstrukcji rzeczywistej. W obliczeniach dotyczących modelu wydrukowanego z materiału PLA-IMPACT można więc wykorzystać wartości modułu sprężystości materiału niezależnie od kierunku laminacji.

**Wyniki badań granicy plastyczności** materiału wykazują natomiast różnice wartości tego parametru w zależności od kierunku laminacji elementów. W przypadku wystąpienia naprężeń przekracza-

jących granicę plastyczności należy spodziewać się, że rezultaty uzyskane w przypadku modelu nie będą znajdowały odwzorowania w rzeczywistej pracy konstrukcji. W ogólnym przypadku, gdy stosunek granicy plastyczności materiału modelu do granicy plastyczności materiału rzeczywistej konstrukcji różni się od stosunku ich modułów sprężystości, naprężenia w przypadku modelu pracującego w strefie plastycznej nie będą spełniały kryterium wynikającego ze skali podobieństwa naprężeń. W związku z tym przeniesienie naprężeń z badań modelowych na rzeczywiste naprężenia w konstrukcji nie będzie możliwe. Świadczy to jednoznacznie o tym, że kierunek laminacji elementów w modelu ma istotne znaczenie, a więc planując badania doświadczalne, należy dążyć do tego, aby model konstrukcji pracował w zakresie sprężystym.

We wstępnych rozważaniach dotyczących możliwości zastosowania polimeru PLA-IMPACT do badań dynamicznych wykorzystano badania doświadczalne konstrukcji rzeczywistej, tj. komina, o wysokości 120 m. Badania takie zostały przeprowadzone w 2015 r., a ich wyniki opublikowano w artykule [27]. W tabeli 3 zestawiono następujące dane:

- wartość współczynnika skali podobieństwa częstotliwości konstrukcyjno-model wynikającą ze wzoru (2) [13, 14] (por. tabela 3, wiersz 1):

$$S_f = S_L^{-1} \cdot S_E^{0,5} \cdot S_p^{0,5} \quad (2)$$

gdzie:

$S_L = 1/120$  skala podobieństwa geometrii;

$S_E = 0,084$  skala podobieństwa modułu sprężystości;

$S_p = 0,512$  skala podobieństwa gęstości.

- pierwszą częstotliwość konstrukcji rzeczywistej wynikającą z pomiarów

**Tabela 3. Rezultaty wstępnych analiz numerycznych**

*Table 3. The results of the preliminary numerical analysis*

Parametr	Wartość
Wartość skali podobieństwa częstotliwości [13, 14]	48,69
Pierwsza częstotliwość komina rzeczywistego [27]	0,34 Hz
Pierwsza częstotliwość modelu komina z analiz numerycznych	15,12 Hz
Pierwsza częstotliwość wynikająca ze skali podobieństwa	16,55 Hz
Różnica f1 doświadczalnej i teoretycznej	8,6%

doświadczalnych, pierwszą częstotliwość modelu komina z analiz numerycznych programem Abaqus oraz pierwszą częstotliwość wynikającą z zastosowanych skal podobieństwa (por. tabela 2, wiersz 2, 3, 4).

W wyniku porównania wartości pierwszej częstotliwości drgań własnych modelu komina wydrukowanego z materiału PLA-IMPACT w technologii 3D, uzyskanej numerycznie, z pierwszą częstotliwością drgań własnych konstrukcji rzeczywistej (przeskalowanej za pomocą skal podobieństwa) stwierdzono, że różnica wynosi 8,6%. Potwierdza to możliwość zastosowania materiału PLA-IMPACT w celu odwzorowania zachowania rzeczywistego komina.

## Wnioski

W artykule zaprezentowano przebieg badań doświadczalnych pozwalających na wyznaczenie podstawowych parametrów fizykomechanicznych materiału PLA-IMPACT. Wykazano możliwość realizacji w technologii 3D modelu konstrukcji przeznaczonego do badań dynamicznych. Badania przeprowadzone na próbkach materiału PLA-IMPACT o różnych konfiguracjach włókien wykazały, że wartość modułu sprężystości nie zależy od kierunku laminacji, co ma kluczowe znaczenie w procesie przygotowywania modeli obiektów.

Granica plastyczności materiału PLA-IMPACT zależy od układu włókien (kąta rastrowania). Planując doświadczalne badania dynamiczne z zastosowaniem modeli utworzonych w technologii druku 3D, należy więc dążyć do tego, aby model konstrukcji pracował w zakresie sprężystym. W przypadku wystąpienia naprężeń przekraczających granicę plastyczności rezultaty uzyskane w przypadku modelu mogą nie mieć odwzorowania w rzeczywistej pracy konstrukcji.

Sformułowane wnioski stanowią praktyczne wskazówki dla naukowców i inżynierów zajmujących się badaniami dynamicznymi z zastosowaniem modeli zrealizowanych w technologii 3D. Wskazują zalety stosowania takich modeli, a także problemy i uwarunkowania wynikające z wybranej technologii drukowania (np. kąta rastrowania materiału). Druk 3D jest skutecznym narzędziem



## ARBOCEL P – The Power of Innovation

- – nieograniczone możliwości regulacji konsystencji,
- – łatwe i szybkie mieszanie,
- – zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@irs.pl

do realizacji modeli laboratoryjnych do badań dynamicznych, np. na stołach wstrząsowych. Quasi-izotropowe właściwości materiału w zakresie sprężystym sprawiają, że jest on uniwersalny do budowy modeli, łatwy w zastosowaniu i przystępny z punktu widzenia ekonomicznego.

Fotografie i rysunki: Autorzy

### Literatura

[1] Perkins I, Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *Int J Constr Manag.* 2015; 15 (1): 1 – 9. DOI: 10.1080/15623599.2015.1012136.

[2] Dodziuk H. Druk 3D w budownictwie. *Napędy i Sterowanie.* 2020; 22 (12): 41 – 47.

[3] Piestrzyński P. Światowy poziom XI Konferencji DNI BETONU. *Materiały Budowlane.* 2021; 11: 74 – 75.

[4] Bos F, Wolfs R, Zeeshan A, Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual Phys Prototyp.* 2016; 11 (3): 209 – 225. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.

[5] Hoffmann M, Skibicki S, Pankratow P, Zieliński A, Pajor M, Techman M. Automation in the construction of a 3D-printed concrete wall with the use of a lintel gripper. *Materials.* 2020; 13 (8): 1800. DOI: 10.3390/ma13081800.

[6] Asprone D, Auricchio F, Menna C, Mercuri V. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Constr Build Mater.* 2018; 165: 218 – 231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018.

[7] Lim JH, Yiwei W, Quang-Cuong P. 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Constr Build Mater.* 2020; 232: 117075. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117075.

[8] Perrot A, Rangeard D, Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *MaterStruct.* 2015; 49 (4): 1213 – 1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.

[9] Wang X, Zhang P, Ludwick S, Belski E, To A. Natural frequency optimization of 3D printed variable-density honeycomb structure via a homogenization-based approach. *Addit Manuf.* 2017; 20: 189 – 198. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.001.

[10] Richards D, Darryll. Pines Passive reduction of gear mesh vibration using a periodic drive shaft. *J SoundVib.* 2003; 264 (2): 317 – 342. DOI: 10.1016/s0022-460x (02) 01213-0.

[11] Guo Z, Hu G, Jiang J, Yu L, Li X, Liang J. Theoretical and experimental study of the vibration dynamics of a 3D-printed sandwich beam with an hourglass lattice truss core. *Front Mech Eng.* 2021; 7: 651998. DOI: 10.3389/fmech.2021.651998.

[12] Gupta V, Adhikari S, Bhattacharya B. Exploring the dynamics of hourglass shaped lattice metastructures. *Sci Rep-UK.* 2020; 10: 20943. DOI: 10.1038/s41598-020-77226-4.

[13] Krawinkler H, Moncarz P. Similitude requirements for dynamic models, dynamic modeling of concrete structures. *Acı publication.* 1982; 73: 1 – 22.

[14] Li S, Wu C, Kong F. Shaking table model test and seismic performance analysis of a high-rise RC shear wall structure. *Shock Vib.* 2019; 6189873. DOI: 10.1155/2019/6189873.

[15] Silvestri S, Baraccani S, Foti D, Ivorra S, Theodossopoulos D, Vacca V, Romana 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; 150: 106880. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106880.

[16] Bianchini N, Mendes N, Calderini C, Candéias PX, Rossi M, Lourenço PB. Seismic response of a small-scale masonry groin vault: experimental investigation by performing quasi-static and shake table tests. *B Earthq Eng.* 2022; 20: 1739 – 1765. DOI: 10.1007/s10518-021-01280-0.

[17] Bajpai P, Singh I, Madaan J. Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *J Thermoplast Compos.* 2012; 27 (1): 1-30. DOI: 10.1177/0892705712439571.

[18] Anwer M, Naguib H. Study on the morphological, dynamic mechanical and thermal properties of PLA carbon nanofibre composites. *Compos Part B.* 2016; 91: 631 – 639. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.039

[19] Fekete I, Ronkay F, Lendvai L. Highly toughened blends of poly (lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern. *Polym Test.* 2021; 99: 107205. DOI: doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107205.

[20] www.thomasnet.com/insights/do-bioplastics-have-a-place-in-automotive-manufacturing [Acces: 20.03.2022].

[21] Tümer EH; Erbil HY. Extrusion-based 3D printing applications of PLA composites: A review. *Coatings.* 2021; 11: 390. DOI: 10.3390/coatings11040390.

[22] Singh B, Kumar R, Chohan JS. Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. *Mater Today.* 2020; 33 (3): 1562 – 1567. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.335.

[23] Algarni M. The influence of raster angle and moisture content on the mechanical properties of PLA parts produced by fused deposition modeling. *Polymers.* 2021; 13 (2): 237. DOI: 10.3390/polym13020237.

[24] Maszybrocka J, Dworak M, Nowakowska G, Osak P, Łosiewicz B. The influence of the gradient infill of PLA samples produced with the FDM technique on their mechanical properties. *Materials.* 2022; 15 (4): 1304. DOI: 10.3390/ma15041304.

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

[26] 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.

[27] Tataro T, Ratajczak B. Wpływ stanu technicznego komina żelbetowego na jego właściwości dynamiczne. *Inżynieria i Budownictwo.* 2015; 71 (1): 3 – 7.

Przyjęto do druku: 29.03.2022 r.