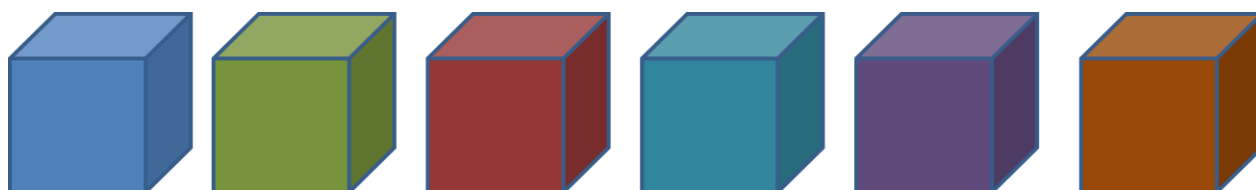


Piotr Kowalski
Adrian Alikowski
Jacek Zając

**Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych
Pracownia Drgań Mechanicznych NA2**

MODELE USTROJÓW ANTYWIBRACYJNYCH O INNOWACYJNYCH STRUKTURACH 3D

Materiały informacyjne



Materiały informacyjne powstały na podstawie wyników zadania badawczego realizowanego w ramach V etapu Krajowego Programu „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” częściowo wspieranego w latach 2020–2022 — w zakresie badań i rozwoju — przez Narodowe Centrum Badawczo-Rozwojowe (projekt nr III.PB.02 pt. „Opracowanie systemów antywibracyjnych o innowacyjnych strukturach 3D”). Głównym koordynatorem Programu jest Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

WPROWADZENIE

W zdecydowanej większości przypadków maszyn i urządzeń wytwarzane przez nie drgania mechaniczne, które nie są częścią procesów technologicznych, stanowią czynnik niepożądany. Mają negatywny wpływ zarówno na funkcjonowanie maszyn i urządzeń (uszkodzenia, awarie, pogorszenie działania) jak i na ludzi, u których mogą wywoływać dyskomfort, pogorszenie się stanu zdrowia oraz zaburzenia funkcjonowania narządów wewnętrznych.

Pośród metod technicznych ograniczania drgań mechanicznych, wykorzystanie materiałów antywibracyjnych jest często najprostszym i najtańszym sposobem ich redukcji lub eliminacji. Materiały antywibracyjne wykonywane są z różnych tworzyw, których właściwości antywibracyjne opierają się na tłumieniu i rozpraszaniu energii drgań w ich strukturach.

Możliwość wytwarzania określonych struktur materiałów klasycznymi metodami (np. poprzez spienianie gumy) jest ograniczone najczęściej do tworzenia bardziej lub mniej regularnych komórek otwartych lub zamkniętych. Zakres częstotliwości, w którym występuje zauważalne tłumienie drgań przez takie materiały najczęściej rozpoczyna się dopiero od częstotliwości 70 – 100 Hz. Wynika to z fizyki zjawiska tłumienia materiałowego. Takie właściwości materiałów zazwyczaj nie zapewniają skutecznego obniżenia drgań w układach rzeczywistych ze względu na częste występowanie dominujących składowych o niższych częstotliwościach (10 – 50 Hz), często też mogą wywoływać niebezpieczne wzmocnienia drgań.

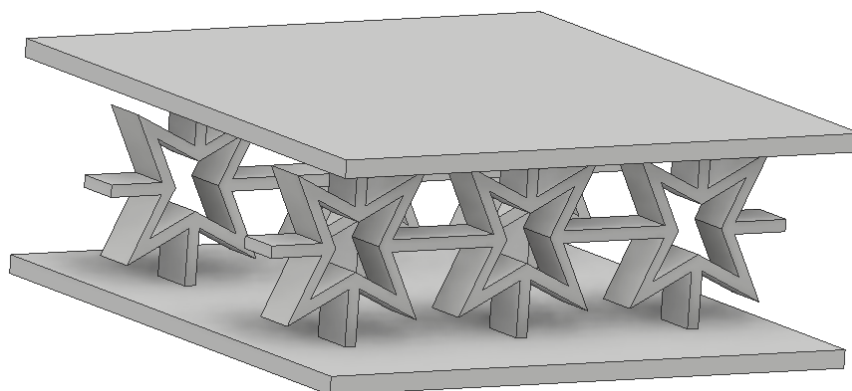
Wciąż poszukiwane są nowe rozwiązania w zakresie materiałów i systemów ochrony przed drganiami mechanicznymi. Badane są m.in. parametry mechaniczne materiałów zaawansowanych technologicznie (w tym materiałów inteligentnych, wykonanych w technologii nanocząstek) i systemów (wykorzystujących struktury wielowarstwowe i łączenie materiałów) pod kątem ich zastosowania do ochrony przed drganiami mechanicznymi (także na stanowiskach pracy).

Intensywny rozwój technologii druku 3D, w której wykorzystuje się coraz szerszą gamę materiałów (m.in. tworzywa sztuczne, metal, żywice, szkło, materiały gumopodobne i drewnopodobne) oraz stosowanie obrabiarek CNC o zwiększonej dokładności stwarza nowe możliwości uzyskania określonych mechanicznych właściwości wytwarzanych przedmiotów, takich jak m.in. struktury 3D.

Technologie druku 3D dają potencjalne możliwości kontroli właściwości antywibracyjnych dowolnych ustrojów przestrzennych poprzez kształtowanie ich konstrukcji, które nie muszą ograniczać się do struktur komórkowych.

CHARAKTERYSTYKA OPRACOWANYCH USTROJÓW ANTYWIBRACYJNYCH 3D

Opracowane antywibracyjne ustroje 3D łączą cechy klasycznych materiałów antywibracyjnych i układów mechanicznych dedykowanych do redukcji drgań o określonych parametrach.



Rys. 1. Przykładowy ustrój antywibracyjny 3D

Opracowane konstrukcje mogą być wykonane przy wykorzystaniu różnych technologii, jednak założono, że głównym sposobem ich wytwarzania będą technologie oparte na druku 3D. W zależności od stopnia złożoności konstrukcji możliwe jest wykorzystanie technologii FDM, SLA, SLS, MJF lub innych. Przy wyborze sposobu wykonania opracowanych modułów ustrojów antywibracyjnych uwzględniono:

- Uzyskiwaną dokładność wykonania wydruków przy zastosowaniu wybranych materiałów oraz zakładanych wymiarów geometrycznych
- Szybkość i koszt wykonania wydruków.
- Możliwość szybkiego wprowadzania modyfikacji geometrii oraz rodzajów materiałów opracowanych modułów ustrojów antywibracyjnych

Zastosowanie opracowanych ustrojów antywibracyjnych 3D stwarza możliwości skutecznego tłumienia drgań o niższych częstotliwościach, niż w przypadku klasycznych materiałów (nawet poniżej 50 - 30 Hz).

Wykorzystanie w strukturach ustrojów antywibracyjnych dodatkowych mechanizmów do ograniczania drgań, takich jak przekładnie mechaniczne, pozwala na inny niż w przypadku klasycznych materiałów, przepływ energii drgań (zmiana kierunku przepływu).

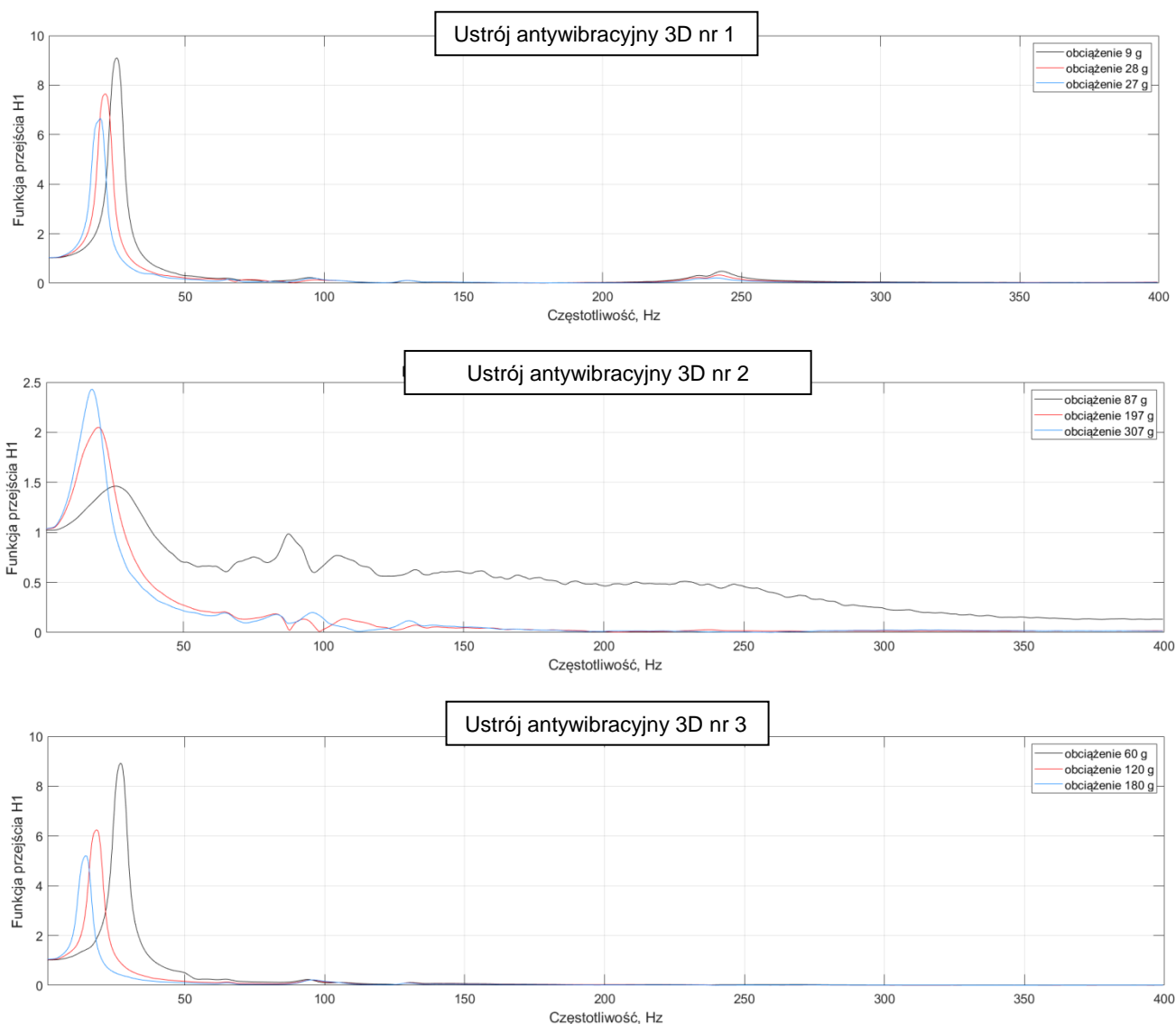
Łatwa modyfikacja opracowanych struktur ustrojów antywibracyjnych umożliwia dostosowanie ich do określonych warunków działania (m.in. częstotliwość rezonansowa, nośność). Modyfikacje mogą obejmować zarówno kształtowanie wymiarów geometrycznych konstrukcji jak i dobór materiałów i technologii druku 3D.

Opracowane konstrukcje dają możliwości tworzenia modułowych antywibracyjnych struktur 3D. Zastosowanie opracowanych antywibracyjnych ustrojów 3D może być alternatywą dla budżetowych rozwiązań ograniczających drgania zarówno w przemyśle (maszyny urządzenia

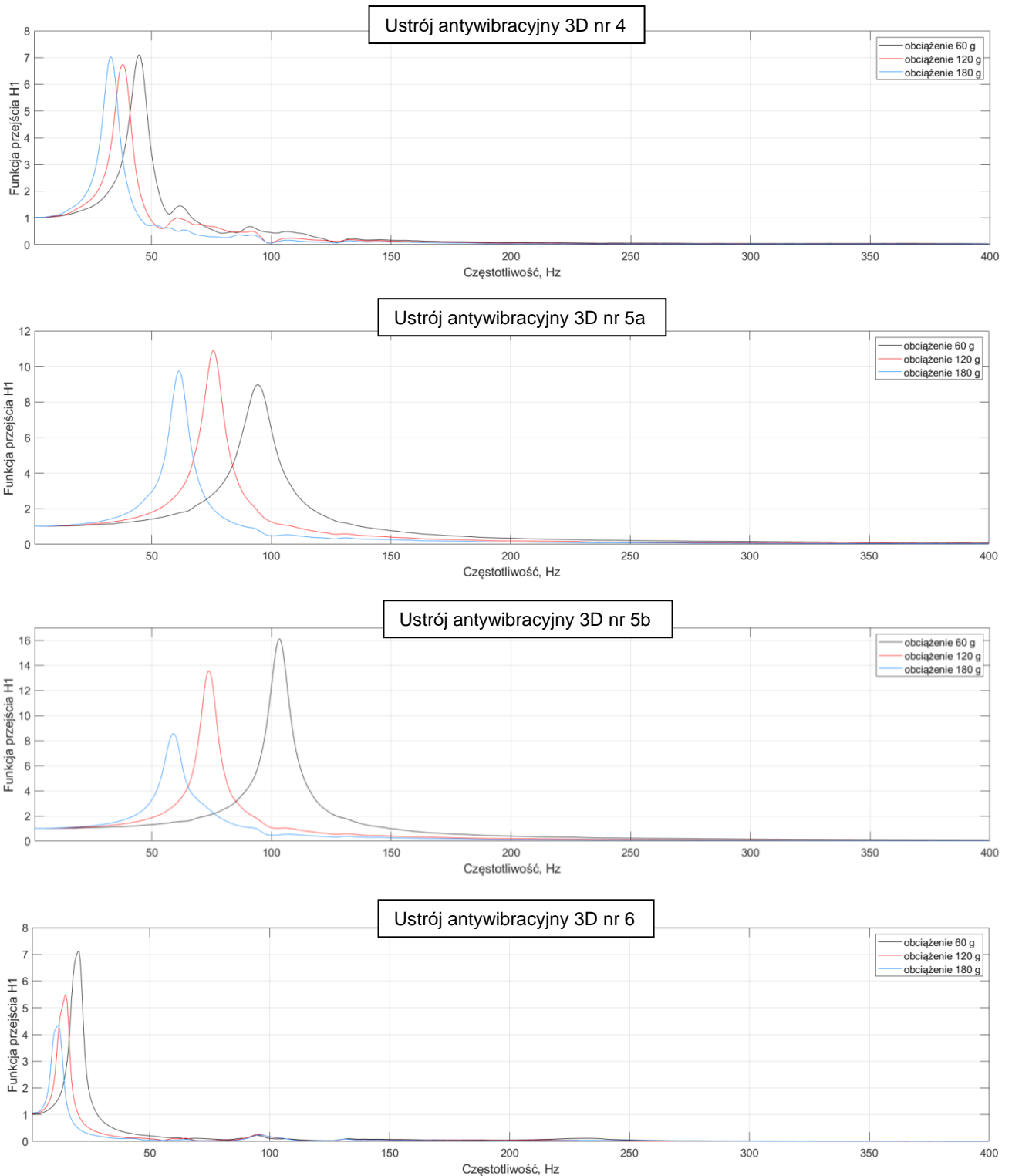
konstrukcje) jak i w warunkach wykorzystywania urządzeń domowych, a także wyposażenia budynków (np. wentylatory, klimatyzatory itp.)

CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE OPRACOWANYCH USTROJÓW ANTYWIBRACYJNYCH 3D

Badania przenoszenia drgań przez wykonane modele ustrojów antywibracyjnych 3D były prowadzone na laboratoryjnym stanowisku pomiarowym, zbudowanym na bazie systemu generacji drgań firmy IMV (wzбудnik drgań i wzmacniacz mocy) ze sterownikiem Spider oraz systemu pomiarowego PULSE firmy B&K. Jako przetworników drgań użyto wibrometrów laserowych firmy Polytec. Podczas badań zastosowano obciążenia dobrane na drodze doświadczalnej. Na podstawie pomiarów prędkości drgań wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe funkcji H1 dla kolejnych opracowanych modeli ustrojów antywibracyjnych i zastosowanych wartości obciążeń. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe funkcji H1 wyznaczone podczas badań modeli struktury 3D



Rys. 2 cd. Charakterystyki częstotliwościowe funkcji H1 wyznaczone podczas badań modeli struktury 3D

ZAKRES STOSOWALNOŚCI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych przenoszenia drgań przez wykonane modele ustrojów antywibracyjnych 3D zostały wyznaczone zakresy częstotliwości, w których dany model przy określonym obciążeniu (nacisku jednostkowym) wykazywał właściwości redukcji drgań mechanicznych. Wyznaczone zakresy stosowalności zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zakresy redukcji drgań mechanicznych wyznaczone dla opracowanych modeli ustrojów antywibracyjnych 3D

Ustrój Nr	Nacisk, Pa	Zakres częstotliwości redukcji drgań, Hz
1	50	36 – 400 (z wyłączeniem 47.5 - 52.5)
	100	30.5 – 400 (z wyłączeniem 40-44; 63 – 71)
	150	27 - 400 (z wyłączeniem 34.5 - 40.5)
2	100	39 – 400 (z wyłączeniem 84 – 94)
	250	29 – 400 (z wyłączeniem 88; 98.5)
	400	25.5 – 400 (z wyłączeniem 110 - 114)
3	150	39 – 400
	300	26.5 – 400
	500	20.5 – 400
4	300	67 – 400
	600	49.5 – 400
	900	45.5 – 400
5a	300	136.5 – 400
	600	109 – 400
	900	89 – 400
5b	250	150 – 400
	500	108.5 – 400
	750	93 – 400
6	150	28 – 400
	300	20.5 – 400
	500	16.5 – 400

PRZYKŁADOWE WYNIKI REDUKCJI DRGAŃ PRZEZ OPRACOWANE USTROJE 3D UZYSKANE DLA RZECZYWISTYCH SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Do badań w warunkach rzeczywistych wykonano ustroje antywibracyjne składające się z wielu modułów opracowanych struktur 3D. Ich liczba dostosowana była do występujących w danych warunkach obciążeń. Jako źródła drgań wykorzystano: szlifierkę oscylacyjną, wiertarkę stołową, oraz wentylator. Zastosowany układ pomiarowy składał się z dwóch piezoelektrycznych przetworników drgań B&K oraz systemu analizy sygnałów PULSE. Przeprowadzone badania polegały na pomiarach widma przyspieszenia drgań na górnych powierzchniach wykonanych ustrojów pobudzanych do drgań przez rzeczywiste źródło drgań (widmo drgań generowanych przez narzędzie/urządzenie) oraz dolnych powierzchniach (widmo drgań uzyskiwane po redukcji drgań). Uzyskane widma przyspieszeń drgań przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Widma przyspieszeń drgań źródła drgań oraz po ich redukcji uzyskanej przy pomocy opracowanych ustrojów antywibracyjnych 3D

Na podstawie wyznaczonych widm przyspieszeń drgań zostały obliczone wartości całkowitych przyspieszeń drgań źródła drgań oraz drgań występujących po zastosowaniu ustroju antywibracyjnego. Obliczone wartości zestawiono w tabeli 2, w której zamieszczono także obliczoną redukcję drgań wyrażoną w %.

Tabela 2. Wartości całkowite przyspieszenia drgań oraz redukcja drgań osiągnięta po zastosowaniu ustrojów antywibracyjnych 3D

	Wartość całkowita przyspieszenia drgań, m/s ²		Redukcja drgań %
	Przed zastosowaniem ustroju antywibracyjnego	Po zastosowaniu ustroju antywibracyjnego	
Ustrój nr 6 /szlifierka	3.69	0.08	97.9
Ustrój nr 5 /wiertarka	4.19	1.27	69.7
Ustrój nr 2 /wentylator	1.19	0.59	50.6

PODSUMOWANIE

Opracowano 6 rodzajów modułów ustrojów antywibracyjnych, w których wykorzystano różne mechanizmy tłumienia/rozpraszania drgań mechanicznych. Wyniki badań przenoszenia drgań na podstawie pomiarów funkcji przejścia H1 opracowanych ustrojów antywibracyjnych 3D pokazują, że posiadają one dobre (a niektóre wyjątkowe) właściwości antywibracyjne. Większość z opracowanych ustrojów charakteryzuje się redukcją drgań w dużo niższym zakresie częstotliwości (nawet poniżej 30 Hz), niż klasyczne materiały antywibracyjne, których zauważalne tłumienie drgań występuje na ogół powyżej częstotliwości 80 - 100 Hz.

Opracowane moduły ustrojów antywibracyjnych pozwalają na modyfikacje ich konstrukcji (m.in. wymiary geometryczne, rodzaj materiałów) i dobór parametrów mechanicznych (m.in. nośność, częstotliwość rezonansowa) do warunków pracy obiektów generujących drgania.

Technologie druku 3D umożliwiają wykonanie złożonych struktur, których uzyskanie innymi metodami jest niemożliwe lub nieopłacalne. Poprawiająca się stale jakość wydruków stwarza możliwości rozwoju koncepcji stosowania struktur 3D do redukcji drgań.

BIBLIOGRAFIA

- [1] DZIEWIT P., JANISZEWSKI J. Ocena jakościowa procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych techniką druku 3D. *Mechanik*. 2018, 3(91): 250-252.
- [2] MATLACK K.H. i in. Composite 3D-printed metastructures for low-frequency and broadband vibration absorption. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016, 113(30): 8386-8390.
- [3] AMIRPOUR M. i in. Numerical and experimental study on free vibration of 3D-printed polymeric functionally graded plates. *Composite Structures*. 2018, 189: 192-205.
- [4] ARRETCHE I., MATLACK K.H. Experimental testing of vibration mitigation in 3D-printed architected metastructures. *Journal of Applied Mechanics*. 2019, 86(11).
- [5] CAVALAGLI N. i in. Enhanced energy dissipation through 3D printed bottom geometry in Tuned Sloshing Dampers. *Journal of Fluids and Structures*. 2021, 106: 103377.
- [6] BHANDARI S., LOPEZ-ANIDO R. Finite element analysis of thermoplastic polymer extrusion 3D printed material for mechanical property prediction. *Additive Manufacturing*. 2018, (22): 187-196.
- [7] XIAO J., LIU H., DING T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure. *Additive Manufacturing*. 2021, 39: 101712.
- [8] ABBOT D.W. i in. Finite element analysis of 3D printed model via compression tests. *Procedia Manufacturing*. 2019, 35: 164-173.
- [9] ZARBAKSH J., IRAVANI A., AMIN-AKHLAGHI Z. Sub-modeling finite element analysis of 3D printed structures. 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. IEEE, 2015.
- [10] ABUEIDDA D.W. i in. Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *Materials and Design*. 2019, 165: 107597.