

dr hab. inż. Tomasz Korbiel<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-0783-6348

dr Renata Bał<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-3011-8726

mgr inż. Wojciech Berezowski<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-9094-9222

mgr inż. Radosław Kruk<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-6231-0886

# Ocena wybranych właściwości mechanicznych budowlanych materiałów wibroizolacyjnych na bazie polimerowych granulatów recyklingowych

## *Identification of selected mechanical properties of construction vibro-isolating materials based on recycled polymer granules*

DOI: 10.15199/33.2024.03.06

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania materiałów z recyklingu do wytwarzania elementów wibroizolacyjnych stosowanych w budowie dróg szynowych. Granulaty recyklingowe charakteryzują się stabilnymi parametrami mechanicznymi, co pozwala na ich wykorzystanie w produkcji materiałów do budowy torowisk w terenach zurbanizowanych. W artykule omówiono technologię wytwarzania tego typu materiałów oraz wstępne badania podstawowych właściwości mechanicznych. Zaprezentowane wyniki pozwalają na wybór technologii produkcji mat wibroizolacyjnych z materiałów recyklingowych w zależności od obszaru zastosowania. Określenie poziomu energii dyssypowanej w trakcie obciążenia dynamicznego umożliwiło skalowanie właściwości produktów podczas produkcji. Przedstawione badania pozwalają na wykorzystanie granulatów polimerów PET oraz PiB.

**Słowa kluczowe:** wibroizolacja kolejowa; współczynnik tłumienia; recykling; maty wibroizolacyjne.

**Abstract.** The article presents the concept of using recycled materials to produce vibration-isolating elements used in the construction of railroads. Recycling granulates are characterized by stable mechanical parameters, which allows them to be used in the production of materials for the construction of tracks in urban areas. This work discusses the technology of producing this type of materials and preliminary research on the basic mechanical properties. The presented results allow the selection of a technology to produce vibration-insulating mats from recycled materials depending on the area of application. Determining the level of energy dissipated during dynamic loading made it possible to scale the properties of products during production. The presented research allows the use of PET and PiB polymer granulates.

**Keywords:** railway vibration isolation; damping coefficient; recycling; vibration isolation mats.

Transport szynowy stanowi jeden z najbardziej ekologicznych oraz wszechstronnych rozwiązań komunikacyjnych. Stosowany jest zarówno w rozwiązaniach przemysłowych, średniego i bliskiego zasięgu, jak również w systemach komunikacyjnych w terenach zurbanizowanych [1]. Głównym czynnikiem oddziaływania na środowisko jest hałas i drgania związane z poruszającymi się pojazdami szynowymi [2, 3, 4]. Najbardziej skutecznym sposobem zmniejszenia ich emisji jest stosowanie specjalnych rozwiązań wibroizolacyjnych [5, 6].

Wibroizolacja w budowie dróg szynowych zależy od zastosowanej technologii oraz przeznaczenia danej konstrukcji. W transporcie miejskim na skutki oddziaływań mechanicznych narażona jest największa część społeczeństwa oraz zagrożone są budynki i infrastruktura, dlatego też w artykule szczególna uwaga dotyczyć będzie linii tramwajowych. Wyniki prowadzonych badań mają jednak zastosowanie w różnych konstrukcjach szynowych [1, 7, 8], itp.

Nowoczesne technologie budowy linii tramwajowych wykorzystują przede wszystkim elementy prefabrykowane oraz uwzględniają wpływ eksploatacji linii na sąsiednią zabudowę. W rozwiązaniach tych stosuje się wiele materiałów wibroizolacyjnych, do których należy zaliczyć m.in. [9]:

- maty podtłuczniowe/podpodsypkowe SBM (SBM – *Sub-Ballast Mats*);
- maty podpłytkowe STM (STM – *Slab-Track Mats*);
- wibroizolację montażu szyn w konstrukcjach bezpodsypkowych.
- wibroizolację elementów podkładowych oraz montażu szyn w konstrukcjach podsypkowych.

Materiały wibroizolacyjne wykonywane są w postaci mat, mas zalewowych lub elementów tłoczonych. Najczęściej wykorzystuje się takie materiały, jak guma i poliuretan. Ze względu na znaczną objętość tych materiałów, a co za tym idzie duże koszty, coraz częściej wykorzystuje się recyklingowe tworzywa sztuczne [10, 11], które mogą być poddane złożonej obróbce termiczno-plastycznej lub używane w postaci odpowiednich granulatów w osnowie. Do produkcji mat wibroizolacyjnych na dużą skalę wykorzystuje się mieloną gumę z recyklingu opon samochodowych oraz piankę poli-

<sup>1)</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

<sup>2)</sup> Państwowa Akademia Nauk Stosowanych, Instytut Politechniczny

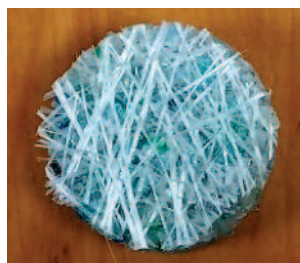
\* Adres do korespondencji: tkorbiel@agh.edu.pl

uretanową ze zużytych materacy [12]. W dużej ilości występują również regranulaty takich materiałów, jak polietylen (PE), polipropylen (PP), politereftalan etylenu (PET), poliamid (PA), poliwęglan (PC) [13]. Materiały te mają bardzo dobre właściwości tłumienia drgań zarówno przez wewnętrzną dyssypację energii, jak również przez współpracę pomiędzy poszczególnymi cząstkami granulatu [14 ÷ 16]. Duża dostępność oraz niewielka cena predysponują te materiały do zastosowania w systemach wibroizolacji. Podjęto badania pozwalające wyselekcjonować materiały o największym potencjale wdrożeniowym w produkcji materiałów wibroizolacyjnych, stosowanych w budowie dróg szynowych.

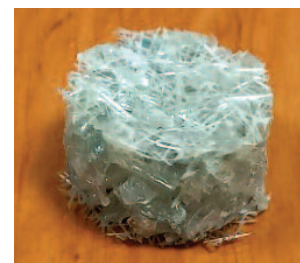
## Przygotowanie próbek do badań

Do badań wstępnych wytypowano współczynnik tłumienia jako bardzo ważny parametr materiałów wibroizolacyjnych. Technologia wytwarzania, gabaryty oraz sposób przygotowania próbek powinny więc być zgodne z założonymi procedurami pomiarowymi. Norma PN-87-C04289, jako procedura odniesienia, spełnia wstępne kryteria oceny właściwości dynamicznych materiałów wibroizolacyjnych. Do istotnych ograniczeń tej normy należy dosyć mała powierzchnia próbki, przy której są znaczne efekty brzegowe, oraz brak uwzględnienia nieliniowego zakresu obciążenia i zakresu pracy, natomiast jej zaletą jest prosta procedura, która pozwala na wstępną klasyfikację właściwości badanego materiału. Do ich kształtowania zastosowano metodę formowania docelowego, tzn. wytwarzano próbki zgodne z wymiarami bez potrzeby dalszej obróbki mechanicznej [17]. Przyjęta technologia wytwarzania materiałów kompozytowych wymaga wstępnej kompresji wsadu do czasu związania lepiszcza. Przygotowaną mieszankę umieszczano w cylindrze formowym, a następnie w prasie. W kolejnym kroku wsad poddano działaniu siły ściskającej, przy czym mierzono odkształcenie materiału do zadanej wartości i pozostawiono do czasu utwardzenia kleju. Uzyskano w ten sposób próbki w kształcie walca o średnicy  $35 \pm 0,5$  mm i wysokości  $17,8 \pm 0,5$  mm. Jako lepiszcze, będące osnową granulatu, zastosowano trzy rodzaje klejów: wodny kontaktowy klej winylowy, modyfikowaną żywicę epoksydową oraz rozpuszczalnikowy klej na bazie kauczuku chloroprenowego [18]. Na powierzchni czołowej próbek w celu jej wzmocnienia i zabezpieczenia, zastosowano matę z włókien szklanych o gramaturze  $80 \text{ g/m}^2$ . W przypadku każdego badanego materiału zastosowano trzy poziomy kompresji wstępnej, odniesionej do odkształcenia: 10%; 25% oraz 40%. Do badań wstępnych użyto następujących granulatów: PET Fines; PiB oraz Folia PET. PET Fines powstał podczas przetwarzania mechanicznego np. popularnych butelek PET, PiB (poliizobutylen) w wyniku przetwarzania pojemników, wykładzin lub elementów urządzeń domowego użytku, a folia PET w wyniku mechanicznego rozdrabniania folii i opakowań foliowych. Są to handlowe granulaty recyklingowe, które na etapie przetwórczym zostały oczyszczone, odpowiednio zmielone oraz poddane kontroli jakości. Proces prowadzono w kontrolowanej temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Do badań wyselekcjonowano 135 szt. próbek. Analiza danych pomiarowych będzie identyfikować właściwości

materiałowe w postaci macierzy  $\{W, n, k_1, k_{II}, T\}$ , gdzie:  $W$  – praca dyssypowana pojedynczego cyklu;  $n$  – numer kolejnego cyklu;  $k_1$  – współczynnik liniowej funkcji sprężystości;  $k_{II}$  – macierz  $\{a, b, c\}$  funkcja aproksymująca  $y = ae^{bx} + c$ ;  $T$  – czas trwania pojedynczego cyklu. Przeprowadzono badania materiałów oznaczonych **P** (PET Fines); **B** (PiB – poliizobutylen) oraz **F** (folia PET). Osnowę badanego materiału oznaczono jako: **W** – kontaktowy wodny klej winylowy; **Z** – modyfikowana żywica epoksydowa; **K** – rozpuszczalnikowy klej na bazie kauczuku chloroprenowego. Wstępną kompresję odniesioną do odkształcenia oznaczono jako **10** (10%), **25** (25%) i **40** (40%). Próbkę z poliizobutyleno o osnowie z kleju chlorokauczukowego z 25% wstępną kompresją przedstawia fotografia 1, próbkę z folii PET w osnowie chlorokauczukowej z 10% wstępną kompresją – fotografia 2, próbkę PiB w osnowie z żywicy epoksydowej – fotografia 3, natomiast próbkę PET w osnowie chlorokauczukowej – fotografia 4.



Fot. 1. Próbkę BK25  
Photo 1. BK25 sample



Fot. 2. Próbkę FK10  
Photo 2. FK10 sample



Fot. 3. Próbkę BZ25  
Photo 3. BZ25 sample



Fot. 4. Próbkę PK10  
Photo 4. PK10 sample

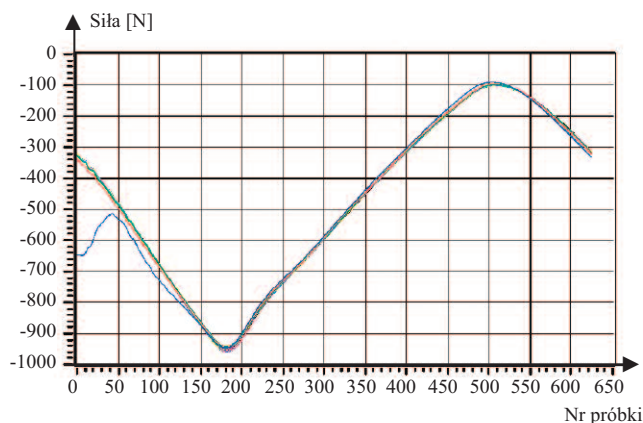
## Badanie

W przypadku materiałów wibroizolacyjnych stosowanych w budowie dróg szynowych należy wykonać wiele badań właściwości mechanicznych. Do najważniejszych należą: pomiar twardości Shore'a; wyznaczenie gęstości pozornej oraz statycznego i dynamicznego modułu Younga. Istotnymi parametrami są również: współczynnik sztywności statycznej i dynamicznej; współczynnik relaksacji względnej; współczynnik tłumienia. Biorąc pod uwagę głównie przeznaczenie opracowywanych materiałów, najbardziej istotna we wstępnych badaniach jest ocena współczynnika tłumienia [19]. Istnieje kilka norm wskazujących metody wyznaczania takiego współczynnika. Zdecydowano się na wycofaną normę PN-87-C04289, przeznaczoną do badania materiałów gumopochodnych, które charakteryzują się zbliżonymi parametrami fizycznymi do badanych materiałów kompozytowych.

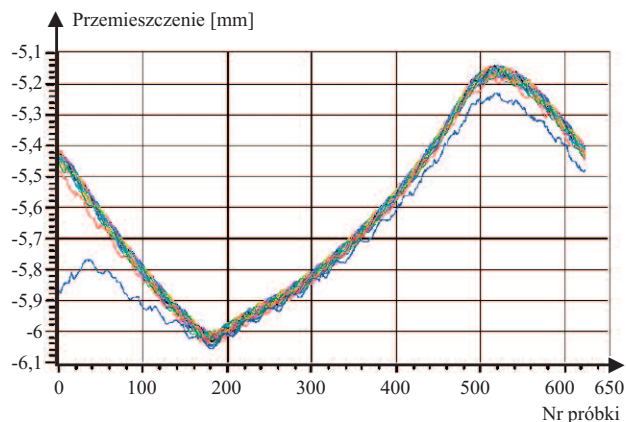
Próbki poddano dynamicznemu ścisnieniu na zmęczeniowej maszynie wytrzymałościowej o napędzie hydraulicznym. Wartość siły maksymalnej obrano w taki sposób, aby maksymalne naprężenie ściskające w przekroju poprzecznym próbki wyniosło -1 MPa, tj. -912 N. Założono przy tym odniesienie się do pełnego przekroju poprzecznego. Wybrano współczynnik asymetrii cyklu obciążenia  $R = 10$ , a więc siłę osiąganą przy odprężaniu próbki wynoszącą -91,2 N. Badanie przeprowadzono w dwudziestu kolejnych cyklach, przy zakresie częstotliwości  $1 \div 10$  Hz co 1 Hz w przypadku trzech próbek.

Pomimo wzorowania się na PN-87-C04289 w badaniu dokonano kilku odstępstw. Wielkości maksymalnego naprężenia w próbce uzależniane są od twardości IRHD. W tym przypadku wybrano wartość siły, a co za tym idzie naprężenia, na podstawie wartości spotykanych w kolejowych materiałach wibroizolacyjnych [20]. Norma wskazuje również na przeprowadzenie pięciu cykli obciążenia próbki, a w badaniach zdecydowano się na kolejne 20 cykli, spośród których wybrano 5 kolejnych, najbliższych założonym parametrom. Przeprowadzono badania wszystkich 135 próbek w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 10 Hz z krokiem 1 Hz. Przykładowe dane z pojedynczego pomiaru przedstawiono na rysunkach 1 ÷ 3. Ujemne wartości danych związane są z przyjętym układem odniesienia oraz ścisnieniem badanego materiału.

W pierwszej kolejności przeprowadzono weryfikację poprawności danych pomiarowych oraz występujących błędów. Przeprowadzono skalowanie do jednostek fizycznych oraz wybrano reprezentatywne okresy pomiaru, odrzucając początkowy czas stabilizacji próbki w trakcie badania. W związku z tym, że pomiar prowadzono w sposób automatyczny, przez sterowanie przemieszczeniem, zauważalne w sygnale były fluktuacje spowodowane pracą układów regulacyjnych. Ponieważ zakres częstotliwościowy tych zakłóceń znajdował się znacznie powyżej częstotliwości pomiarowych, dlatego też zakłócenia wyeliminowano, stosując filtr dolnoprzepustowy Butterwortha II rzędu. W wyniku tych operacji uzyskano przebiegi czasowe przemieszczenia oraz siły w trakcie reprezentatywnych dwudziestu cykli obciążenia. Przykładowy przebieg, po przeprowadzonej analizie wstępnej, przedstawiono na rysunkach 1 ÷ 3.

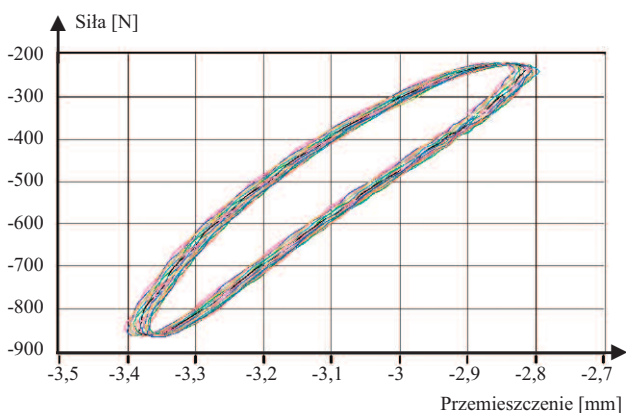


Rys. 1. Wartość chwilowa siły w poszczególnych cyklach obciążenia  
Fig. 1. Instantaneous force value for individual load cycles



Rys. 2. Wartość chwilowa przemieszczenia w poszczególnych cyklach obciążenia

Fig. 2. Instantaneous displacement value for individual load cycles



Rys. 3. Odfiltrowana zależność przemieszczenie – siła

Fig. 3. Filtered force-displacement relationship

Zgodnie z normą PN-87-C04289 tłumienie względne oznaczane jest jako różnica pracy w trakcie ścisnienia oraz odprężania. Dysponując funkcją zależności siły od przemieszczenia  $F(s)$ , można wyliczyć pracę traconą z definicji pracy w polu zachowawczym (1):

$$W_L = \int_L \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

gdzie:

W – praca; L – przemieszczenie;

F – siła;  $d\vec{s}$  – wektor przemieszczenia.

Tłumienie będzie zatem określone jako całka krzywoliniowa interpolowanej funkcji siły od przemieszczenia. Pole powierzchni zakreślone przez histerezę przebiegów pomiarowych będzie więc miarą tłumienia. W związku z tym, że wyniki uzyskano w postaci szeregów czasowych siły oraz przemieszczenia, do obliczenia całki wykorzystana została interpolacyjna metoda kwadratury Gaussa. Przeprowadzono wiele badań związanych z doбором wielomianowych funkcji aproksymujących. Ze względu na dużą liczbę węzłów funkcyjnych, będących punktami pomiarowymi, rząd wielomianu nie wpływał istotnie na błędy całkowania. Uzasadnione jest więc zastosowanie wielomianu pierwszego rzędu, w przypadku którego funkcja kwadratury Gaussa-Legendre'a określona jest wzorem (2):

$$I(f) = \int_{-1}^1 f(d)dx \approx \sum_{i=1}^n w_i f(t_i) \quad (2)$$

dla  $i = 1$

sprowadza się do postaci:

$$W_N = 1/2 \left| \sum_{n=1}^N s_n (F_{n+1} - F_{n-1}) \right| = 1/2 \sum_{n=1}^N F_n (s_{n+1} - s_{n-1})$$

gdzie:

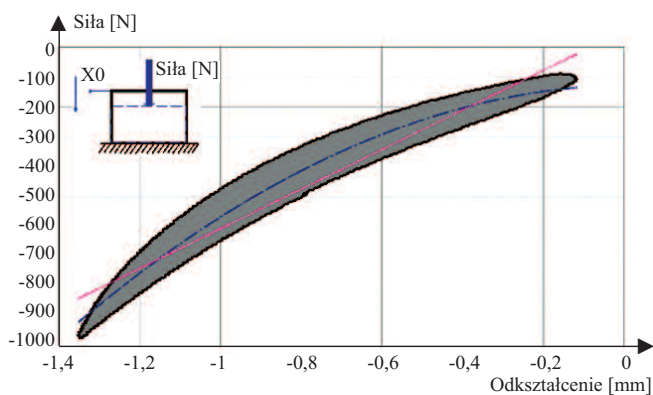
$W_N$  – praca tracona w trakcie jednego cyklu trwającego  $N$  próbek;

$F_n$  – wartość siły w  $n$ -tej chwili cyklu,

$s_n$  – wartość przemieszczenia w  $n$ -tej chwili cyklu.

Taką formułę matematyczną zaimplementowano w oprogramowaniu pomiarowym, uwzględniając liczbę cykli oraz procedurę odrzucenia danych nieistotnych. Całkowity błąd względny nie przekraczał 0,5%. Obliczana wartość pracy dotyczy pojedynczego cyklu ściskania i odprężania. Pozostawiając przemieszczenie w mm, otrzymane wartości są w milidżulach [mJ].

Kolejnym parametrem pomiarowym, niezbędnym do dalszych analiz jest **współczynnik sprężystości badanych materiałów**. Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych został on zaimplementowany jako wielomianowa funkcja aproksymująca w trakcie pojedynczego cyklu ściskania oraz odprężania. W pierwszym przybliżeniu założono liniowy współczynnik sprężystości, co w przypadku badanych materiałów nie jest prawdziwe. Pozwala to jednak w dalszych obliczeniach na uzyskanie wystarczająco dobrego przybliżenia, co wynika z zakresu pracy tego typu materiałów wibroizolacyjnych, gdzie amplituda przemieszczenia w docelowym zastosowaniu nie przekracza 0,5 mm. Parametrami uzupełniającymi są czas trwania pojedynczego cyklu ściskania i odprężania, zależny od częstotliwości wymuszenia, oraz kolejny numer cyklu. Wizualizację sposobu wyznaczania poszczególnych parametrów przedstawia rysunek 4.



**Rys. 4. Interpretacja graficzna parametrów mechanicznych**  
Fig. 4. Graphical interpretation of mechanical parameters

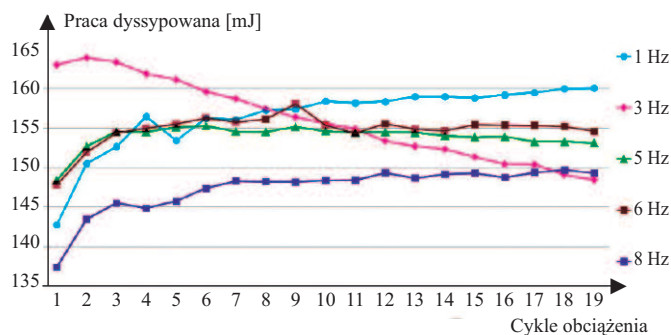
## Analiza wyników

Wyniki eksperymentów pomiarowych uzyskano w postaci macierzy danych  $\{W, n, k_p, k_{II}, T\}$ . Analizy statystyczne wykonano zgodnie z hipotezą rozkładu normalnego. W przypadku pojedynczego badania przeprowadzono 18 cykli, co daje czynnik ob-

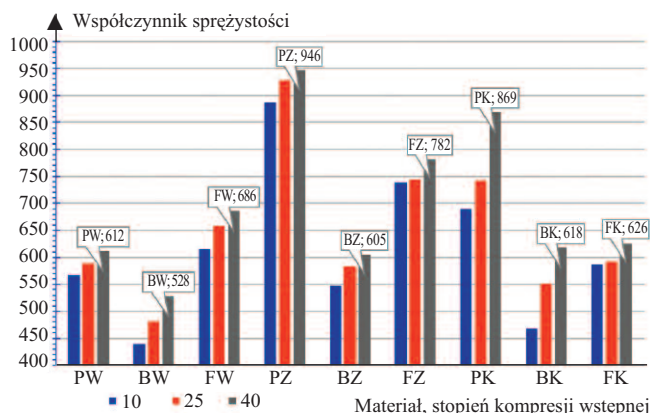
ciążenia estymatora  $c_4 = 0,98541$ . Analizowano 3 próbki z każdego rodzaju materiału, których czynnik  $c_4 = 0,88623$ . Ze względu na dużą liczbę danych przedstawimy najciekawsze wyniki:

1) materiału BK10 parametr  $W$  – praca dyssypowana w funkcji kolejnego  $n$  – cyklu obciążenia przy poszczególnych wartościach częstotliwości (rysunek 5);

2) zależność współczynnika sprężystości od stopnia wstępnej kompresji podczas formowania próbki (rysunek 6);



**Rys. 5. Wartość pracy dyssypowanej w funkcji poszczególnych cykli obciążenia w przypadku różnej częstotliwości obciążenia**  
Fig. 5. The value of dissipated work as a function of individual load cycles for different load frequencies

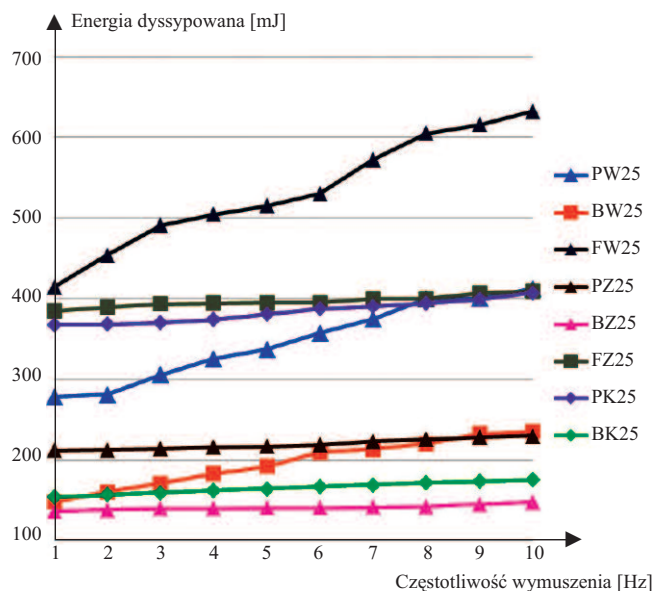


**Rys. 6. Zależność współczynnika sprężystości od stopnia wstępnej kompresji podczas formowania próbki**  
Fig. 6. Elasticity coefficient dependence on the initial compression degree during sample formation

3) uśredniona energia dyssypowana badanych materiałów o 40% stopniu kompresji wstępnej podczas procesu formowania przy badanej częstotliwości wymuszenia (dyssypowana energia wzrasta w funkcji częstotliwości, a istotną różnicą jest nachylenie tej krzywej (rysunek 7).

## Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano bardzo dużą i złożoną bazę danych. Wnioski z ich analizy można podzielić na kilka kategorii. Pierwsza dotyczy eksperymentu pomiarowego. Wybór parametru, jakim jest współczynnik tłumienia, jest zadowalający na etapie rozpoznania właściwości nowych materiałów. Zależność współczynnika tłumienia od parametrów eksperymentu jest zgodna z oczekiwaniami. Wraz ze skróceniem czasu cyklu  $T$ , czyli ze wzrostem częstotliwości wymuszenia, parametr ten wzrastał, co potwierdza je-



**Rys. 7. Zależność dyssypowanej energii w trakcie pojedynczego cyklu od częstotliwości wymuszenia**

*Fig. 7. Dependence of the energy dissipated during a single cycle on the forcing frequency*

go zależność od prędkości oddziaływania. Kolejną zaletą zaproponowanego eksperymentu jest możliwość estymacji współczynnika sprężystości analizowanego materiału. W tym przypadku wyniki są również zbieżne z oczekiwaniami, czyli brak istotnej zależności od czasu cyklu. W przeprowadzonych eksperymentach widoczna jest zależność współczynnika sprężystości od wstępnej kompresji próbki podczas procesu formowania. Wadą eksperymentu jest zbyt mała powierzchnia badanej próbki. W przypadku materiałów o ograniczonej spoiwości eksperyment nie mógł być dokończony z powodu uszkodzenia próbki. Zwiększenie jej rozmiarów zmniejszyłoby wpływ warunków brzegowych, a zatem możliwe byłoby uzyskanie bardziej miarodajnych wyników. Problematiczny wydaje się również dobór zakresów pomiarowych tego rozmiaru próbki. W przypadku materiałów bardzo podatnych, miękkich, zakres oddziaływania można rozszerzyć. To również pozwoliłoby na uzyskanie kolejnych danych i ich szczegółowej analizy.

Kolejną kategorię stanowi osnova materiału. W przypadku materiałów PZ, BZ i FZ otrzymano znacznie mniejsze wartości tłumienia w porównaniu z pozostałymi, a także nie stwierdzono istotnego wpływu kompresji wstępnej na wyniki. Jest to związane z większą sztywnością osnowy niż wypełnienia, co powoduje większe wyężenie osnowy. Problem stanowi również adhezja osnowy i wypełnienia. W przypadku materiałów na bazie klejów kontaktowych, szczególnie PW oraz FW, nie uzyskano jednoznacznych wyników, co wynika z ograniczonej wytrzymałości kontaktu osnowy i wypełnienia. Natomiast próbki PK, BK oraz FK uzyskały bardzo powtarzalne wyniki. To predysponuje do dalszych prac osnowę na bazie kauczuku chloroprenowego. Zidentyfikowane właściwości poszczególnych materiałów pozwalają na postawienie wniosków dotyczących projektowania właściwości mechanicznych innowacyjnych produktów. Zadając wstępną kompresję podczas produkcji próbek, uzyskano zróżnicowa-

ne, ale przewidywalne, właściwości produktu końcowego. Z badań wynika, że próbki BK, BW, PK, FK mają energię tłumienia od 80 do 230 mJ. W przypadku próbki o polu powierzchni  $S = 961 \text{ mm}^2$  i czasie cyklu  $0,050 - 0,100 \text{ [s]}$  uzyskano kontrolowany współczynnik sprężystości  $5 - 24 \text{ [kg/s]}$ . Największym problemem okazała się osnova, jej właściwości oraz współpraca z wypełnieniem. Pod względem zrównoważonego rozwoju, najważniejszym wnioskiem jest możliwość wykorzystania materiałów recyklingowych w produkcji wibroizolacyjnych materiałów budowlanych.

## Literatura

- [1] Burdzik R, Ciesla M, Śładkowski A. Cargo Loading and Unloading Efficiency Analysis in Multimodal Transport. *Promet – Traffic&Transportation*. 2014; <https://doi.org/10.7307/ptt.v26i4.1356>.
- [2] Peruń G, Łazarz B, Korbiel T. Diagnostyka wibroakustyczna urządzeń. *Mag. Autostrady*. 2015; 4: 30 – 33.
- [3] Batko W, Stępień TB, Korbiel T, Pawlik P, Barański R. Osobisty wskaźnik zagrożenia hałasem: koncepcja i badania laboratoryjne. *Wydawnictwa AGH*, 2017, ISBN: 9788374649995.
- [4] Paluch W, Kłaczyński M. Measurements of acoustic response of car interior for structural excitations. *Diagnostyka*. 2022; DOI: 10.29354/diag/156893.
- [5] Pawlik P, et al. Vibroacoustic study of powertrains operated in changing conditions by means of order tracking analysis. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2016; DOI: 10.17531/ein.2016.4.16.
- [6] Dziurdź J. Diagnostowanie układów napędowych pojazdów oparte na analizie zjawisk nieliniowych. *Przegląd Mechaniczny*. 2014; 11: 26 – 29.
- [7] Oldakowski J, Oldakowska E. Ewaluacja kosztów jednostkowych efektów zewnętrznych transportu, wykorzystywanych w analizach kosztów i korzyści. *Materiały Budowlane*. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.09.15.
- [8] Martin H. *Transport- und Lagerlogistik*. *Transp. und Lagerlogistik*, 2011.
- [9] Kwiatkowska E. Wibroizolatory sprężynowe w nawierzchni torowej. *Zesz. Nauk. Stowarzyszenia Inżynierów i Tech. Komun. w Krakowie. Ser. Mater. Konf.*, vol. Nr 1 (112), pp. 113 – 123, 2017.
- [10] Niemiro J. Analiza i wykorzystanie dźwiękochłonnych właściwości granulatu gumowego pozyskanego z recyklingu. *Zesz. Nauk. Politech. Częstochowskiej. Bud*. 2016; DOI 10.17512/znb.2016.1.25.
- [11] Adamczyk J, Dylewski R, Zielonogórski U. Recykling odpadów budowlanych w kontekście budownictwa zrównoważonego. *Probl. Ekorozwoju*. 2010.
- [12] Koči V. Comparisons of environmental impacts between wood and plastic transport pallets. *Sci. Total Environ*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.472>.
- [13] Kijeński J, Błędzki AK. *Odzysk i recykling materiałów polimerowych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011. ISBN 978-83-01-16642-7.
- [14] Gangappa S. *Mechanical Behaviour of Polymers in Dynamic Conditions*. Politechnika Warszawska 2021. Praca magisterska.
- [15] Marques B, et al. Vibro-acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and recycled rubber granules. *Constr. Build. Mater*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120221>.
- [16] Białasz S. Practice use of rubber recyclates, as a way to protect the environment. *Ecol. Eng. Environ. Technol*. 2018. <https://doi.org/10.12912/23920629/94958>.
- [17] Katunin A. Parametry modalne i tłumienie wybranych laminatów przemysłowych. *Czasopismo Przegląd Mechaniczny*. 2021; DOI 10.15199/148.2021.3.1.
- [18] Pioś P. Kompozyt na bazie granulatu gumowego ze zużytych opon jako materiał dźwiękochłonny i wibroizolacyjny w przemyśle przetwórstwa spożywczego. *Postępy Tech. Przetwórstwa Spożywczego*. 2019.
- [19] Gu Z, Lei Y, Qian W, Xiang Z, Hao F, Wang Y. An Experimental Study on the Mechanical Properties of a High Damping Rubber Bearing with Low Shape Factor. *Appl. Sci*. 2021; <https://doi.org/10.3390/app112110059>.
- [20] Markou AA, Manolis GD. Mechanical models for shear behavior in high damping rubber bearings. *Soil Dyn. Earthq. Eng. 2016*. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.035>.

*Przyjęto do druku: 26.02.2024 r.*