

dr inż. Izabela Adamczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-2880-4065

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz^{1)*)}

ORCID: 0000-0001-5114-7932

dr inż. Jarosław Kalinowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-8922-4788

Mechanical wave damping research in innovative solutions for concrete masonry units

Badania tłumienia fal mechanicznych w innowacyjnych betonowych elementach murowych

DOI: 10.15199/33.2024.08.08

Abstract. The article presents a new type of APS (openwork masonry unit) and WAPS (filled openwork masonry unit) concrete masonry units with a frame made of concrete modified with recycled materials. The technical data of the developed masonry unit and the composition of concrete modified with a mixture of SBR (styrene butadiene rubber) and PET (polyethylene terephthalate) recycling additives, as well as the composition of the composite damping mixture based on these two materials, are given. In order to demonstrate the effectiveness of the developed solution in reducing mechanical vibrations, the influence of the impact of different mechanical wave frequencies on the developed APS and WAPS concrete masonry units was assessed. The test results were presented graphically and showed that filling the holes of a new type of concrete masonry unit with a recycled composite mixture improves its effectiveness in limiting the propagation of mechanical waves in the analyzed range from 8 to 5000 Hz, simultaneously allowing the effective management of recycled materials.

Keywords: innovative masonry unit; mechanical vibrations; SBR; PET.

Streszczenie. W artykule przedstawiono nowego typu betonowe murowe elementy ściennie APS (ażurowy pustak ścienny) i WAPS (wypełniony ażurowy pustak ścienny) o szkieletcie wykonanym z betonu modyfikowanego materiałami recyklingowymi. Podano dane techniczne opracowanego elementu ściennego i skład betonu modyfikowanego mieszanką dodatków recyklingowych SBR (styrene butadiene rubber) i PET (politereftalan etylenu) oraz skład kompozytowej mieszanki tłumiącej powstałej na bazie tych dwóch materiałów. W celu wykazania efektywności opracowanego rozwiązania w redukcji drgań mechanicznych dokonano oceny wpływu oddziaływania różnych częstotliwości fali mechanicznej na opracowane betonowe murowe elementy ściennie APS i WAPS. Wyniki badań przedstawiono graficznie i wykazano, że wypełnienie otworów nowego typu betonowego murowego elementu ściennego recyklingową mieszanką kompozytową poprawia jego efektywność w ograniczeniu propagacji fal mechanicznych w analizowanym zakresie od 8 do 5000 Hz, pozwalając jednocześnie skutecznie zagospodarować materiały pochodzące z recyklingu.

Słowa kluczowe: innowacyjny murowy element ścienny; drgania mechaniczne; SBR; PET.

The dynamic development of various fields of industry and technology means that we are dealing with mechanical interactions transmitted to building structures in the form of mechanical waves [1]. A disturbance in the form of mechanical waves causes vibrations of the particles of the medium in which these waves propagate. The resulting **disturbance wave** is transmitted through the ground to the wall structure and then to the inter-storey floor structure. Likewise, the forces created by a change in sound pressure have a similar effect, whereby an acoustic wave of sufficiently high energy can vibrate the particles in the building's exterior wall and travel into the interior of the building, causing or amplifying noise [2]. The vibrations caused by machinery, equipment or traffic are transmitted to the building through the ground [3] or propagated in the air as acoustic waves. Reducing their impact on the building walls is therefore advisable [2].

Dynamiczny rozwój różnych dziedzin przemysłu i techniki powoduje, że mamy do czynienia z oddziaływaniami mechanicznymi przenoszonymi na konstrukcję budynków i budowli w postaci fal mechanicznych [1]. Zaburzenie w postaci fal mechanicznych wywołuje drgania cząstek ośrodka, w którym propagują. Powstająca tzw. **fala zaburzeń** transmituje się przez ośrodek gruntowy na konstrukcję ściany, a następnie na konstrukcję stropów międzykondygnacyjnych. Podobnie oddziałują wymuszenia powstałe wskutek zmiany ciśnienia akustycznego, w następstwie którego fala akustyczna o dostatecznie dużej energii może wprawić w drgania cząstki ośrodka ściany zewnętrznej budynku i przenieść się do jego wnętrza, powodując lub potęgując hałas [2]. Oddziaływania powstające w następstwie pracy maszyn i urządzeń lub ruchu komunikacyjnego przenoszą się na obiekty budowlane przez gruntowy ośrodek sprężysty [3] lub rozchodzą w powietrzu w postaci fali akustycznej. Celowe staje się zatem ograniczenie ich oddziaływania na ścianę budynku [2].

¹⁾ Częstochowa University of Technology, Faculty of Construction

^{*)} Correspondence address: maciej.major@pcz.pl

The reduction of mechanical wave propagation is a vital issue, both for the safety of the structure itself and for the sound comfort of the rooms intended for human occupancy [1]. Finding a way to limit mechanical wave propagation through a masonry unit makes economic sense, as it reduces the cost of additional damping material for walls and eliminates the need for ground-based and overhead screens to limit the transmission of environmental impacts. Improving the damping properties of a masonry unit may involve using through holes to accommodate insulation [4], which can also improve the thermal insulation properties of the partition itself [5].

Concrete masonry units are used for erecting load-bearing walls of buildings, mainly of underground storeys, which are exposed to moisture [6]. Their role is to transfer loads from the floors to the footings. This is ensured by the concrete frame of the masonry unit, which can be modified by the addition of SBR (styrene butadiene rubber) or PET (polyethylene terephthalate) granules [7]. It is therefore advisable to use aggregate substitutes [8, 9]. This helps to reduce concrete production costs and obtain a material with appropriately designed properties. Considering the need for material and construction solutions that safely transmit compressive stresses while improving the properties that limit the propagation of mechanical waves using waste materials, **a modified concrete mix was developed and used to produce APS and WAPS masonry units.** The mixture was described in [10]. It enables the repurposing of SBR rubber granulate from the processing of car tyres, as well as PET flakes from food packaging. To improve the mechanical interaction-reducing properties, the through holes of an APS masonry unit (openwork masonry unit) can be filled with an insert made from a composite mix developed for this purpose, which includes the waste materials mentioned above. Its composition and tests were described in [11].

The study presented in this paper aims to investigate the damping of mechanical waves following the use of our composite mixture in a WAPS masonry unit (filled openwork masonry unit) and to see how it improves the damping efficiency compared to an APS masonry unit. Tests were carried out at sixteen mechanical wave frequencies: 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 and 5000 Hz. This range encompasses the frequencies of machinery and equipment interactions and is within the audible range, increasing the applicability of the developed product for reducing mechanical acoustic wave propagation. Developed following numerical studies, the APS and WAPS concrete masonry units thus act as a traditional building material for load-bearing walls, limiting the propagation of mechanical waves arising from such things as vibrations from outside the building [12]. The efficiency of the patented solution is ensured by a properly shaped load-bearing frame, made of concrete modified with recycled materials and curved through holes [13], as well as butt locks with inserts

Redukcja fal mechanicznych jest zagadnieniem istotnym zarówno w przypadku bezpieczeństwa pracy samej konstrukcji, jak również należytego komfortu użytkowego pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi [1]. Znalezienie sposobu ograniczenia propagacji fal mechanicznych przez mury element ścienny jest uzasadnione ekonomicznie, ponieważ redukuje koszty dodatkowego materiału tłumiącego ściany oraz eliminuje konieczność budowy gruntowych i napowietrznych ekranów ograniczających transmisję oddziaływań środowiskowych. Chcąc poprawić właściwości tłumiące murego elementu ściennego, można wykorzystać otwory przelotowe do umieszczenia w nich izolacji [4], co może również poprawić właściwości termoizolacyjne przegrody [5].

Betonowe ścienne elementy murowe są używane do wznoszenia ścian nośnych obiektów kubaturowych głównie kondygnacji podziemnych, narażonych na zawilgocenie [6]. Ich rolą jest przenoszenie obciążeń ze stropów na ławy fundamentowe. Zapewnia to betonowy szkielet murowego elementu ściennego, który może być modyfikowany dodatkiem granulatu gumowego SBR (styrene butadiene rubber) czy granulatu PET (politereftalan etylenu) [7]. Celowe staje się więc stosowanie substytutów kruszywa [8, 9]. Dzięki temu można zmniejszyć koszty produkcji betonu oraz uzyskać materiał o odpowiednio zaprojektowanych właściwościach. Uwzględniając potrzebę zastosowania rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych bezpiecznie przenoszących naprężenia ściskające, a jednocześnie poprawiających właściwości ograniczające propagację fal mechanicznych z wykorzystaniem materiałów odpadowych, **opracowano modyfikowaną mieszankę betonową, którą zastosowano do produkcji murowych elementów ściennych APS i WAPS.** Mieszanka ta została opisana w pracy [10]. Umożliwia ona zagospodarowanie granulatu gumowego SBR z przetworzenia opon samochodowych i płatków PET z przetworzenia opakowań spożywczych. W celu poprawy właściwości redukujących oddziaływania mechaniczne, otwory przelotowe murowego elementu ściennego APS (ażurowy pustak ścienny) można wypełnić wkładką z opracowanej w tym celu mieszanki kompozytowej, w skład której wchodzi wymienione wcześniej odpady. Jej skład i badania zostały opisane w [11].

Celem pracy zaprezentowanej w artykule jest zbadanie tłumienia fal mechanicznych w następstwie zastosowania opracowanej przez nas mieszanki kompozytowej w murowym elemencie ściennym WAPS (wypełniony ażurowy pustak ścienny) oraz sprawdzenie, jak poprawia ona efektywność tłumienia w porównaniu z murowym elementem ściennym APS. Badania przeprowadzono w przypadku wybranych szesnastu częstotliwości fal mechanicznych: 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000 Hz. Zakres ten obejmuje częstotliwości oddziaływania maszyn i urządzeń oraz mieści się w obszarze słyszalnym, co zwiększa zastosowanie opracowanego produktu do redukcji mechanicznych fal akustycznych. Opracowane w następstwie badań numerycznych, betonowe murowe elementy ścienne APS i WAPS pełnią zatem funkcję tradycyjnego materiału budowlanego służącego do wznoszenia ścian nośnych, ograniczając propagację fal mechanicznych powstających np. w wyniku drgań dochodzących z zewnątrz budynku [12]. Efektywność opatentowanego rozwiązania zapewnia odpowiednio ukształtowany szkielet nośny, wykonany

[14]. This translates into a smaller wall thickness in comparison to commonly used technological and material solutions, which require additional vibration isolation. Apart from APS and WAPS concrete masonry units (Figure 1), there are currently no solutions on the market designed to reduce mechanical interactions.

The new types of APS and WAPS concrete masonry units, which reduce mechanical interactions, can be used in areas exposed to intense interactions related to mechanical wave propagation, mainly in the ground, increasing the buildings' comfort of use (Figures 1 and 2).

z betonu modyfikowanego materiałami recyklingowymi oraz krzywoliniowe otwory przelotowe [13], a także zamki doczołowe z wkładkami [14]. Przekłada się to na mniejszą grubość ściany w porównaniu z powszechnie stosowanymi rozwiązaniami technologiczno-materiałowymi wymagającymi dodatkowej wibroizolacji. Obecnie nie są dostępne na rynku rozwiązania zaprojektowane w celu redukcji oddziaływań mechanicznych, poza betonowymi murowymi elementami ściennymi APS i WAPS (rysunek 1).

Opracowany nowy typ betonowego murowego elementu ściennego APS i WAPS, redukującego oddziaływania mechaniczne, umożliwia jego zastosowanie w obszarze intensywnych oddziały-

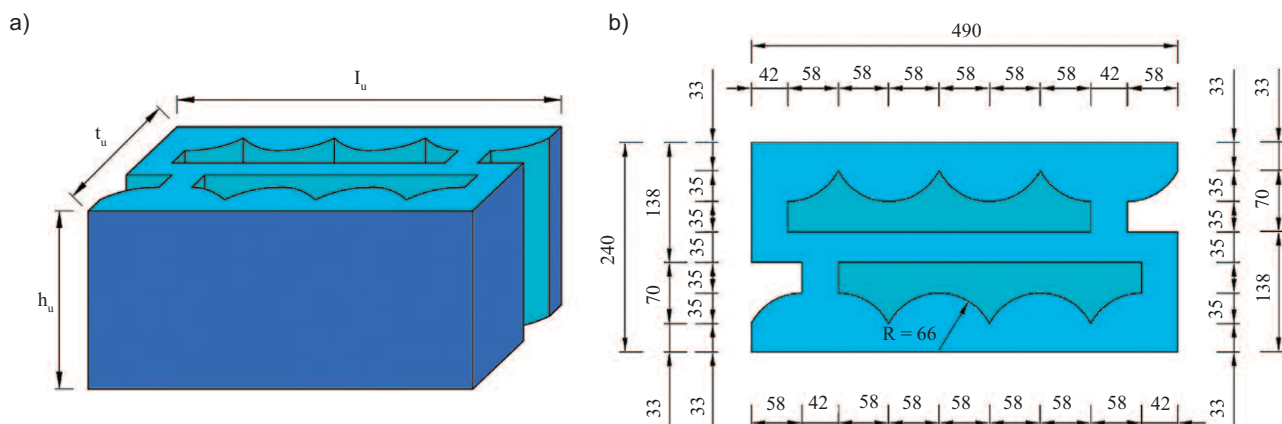


Fig. 1. The new type APS concrete masonry unit with nonlinear through holes and butt locks; length of the masonry unit – l_u ; width of the masonry unit – t_u ; height of the masonry unit – h_u ; radius of curvature of the through hole – R . Dimensions are given in [mm]

Rys. 1. Nowego typu betonowy murowy element ścienny APS z nieliniowymi otworami przelotowymi i zamkami doczołowymi; długość elementu murowego – l_u ; szerokość elementu murowego – t_u ; wysokość elementu murowego – h_u ; promień krzywizny otworu przelotowego – R . Wymiary podano w [mm]

Characteristics of the APS and WAPS concrete masonry units

The APS and WAPS masonry units are rectangular elements with the $A \times B \times C$ dimensions shown in Table 1. They feature curved through holes and butt locks, as shown in Figure 1. The developed solution is patent-protected [13, 14]. Figure 2 shows the finished APS and WAPS masonry units. The composition of the concrete mix used to produce the APS and WAPS masonry units is given in Table 2, while the percentages of SBR rubber granulate and PET flakes in these blocks are provided in Table 3. Table 4 shows the results of tests on concrete modified with a mixture of SBR and PET [10].

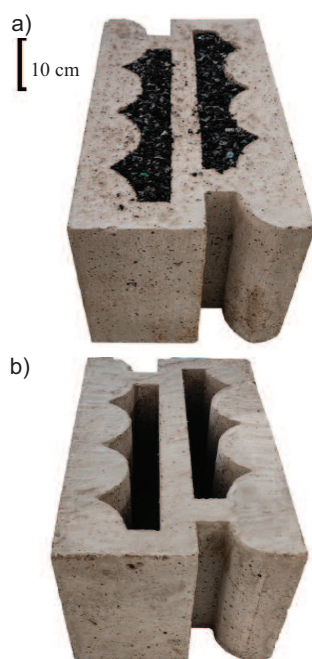


Fig. 2. Masonry unit: a) WAPS – with composite mixture filling; b) APS – without filling

Rys. 2. Murowy element ścienny: a) WAPS – z wypełnieniem mieszkanką kompozytową; b) APS – bez wypełnienia

wań związanych z transmisją propagacji fal mechanicznych przede wszystkim w gruntowym ośrodku sprężystym, podnosząc komfort użytkowy obiektów (rysunki 1 i 2).

Charakterystyka betonowych elementów murowych APS i WAPS

Murowe elementy ścienne APS i WAPS są prostopadłościanami o wymiarach $A \times B \times C$, zgodnie z tabelą 1. Cechują się krzywoliniowymi otworami przelotowymi oraz zamkami doczołowymi, zgodnie z rysunkiem 1. Opracowane rozwiązanie chronione jest patentami [13, 14]. Rysunek 2 przedstawia gotowe murowe elementy ścienne APS i WAPS. Skład mieszanki betonowej służącej do wytworzenia murowych elementów ściennych APS i WAPS zamieszczono w tabeli 2, natomiast procentowe udziały granulatu gumowych SBR oraz płatków PET w tych bloczkach w tabeli 3. W tabeli 4 podano wyniki badań betonu modyfikowanego mieszanką SBR i PET [10].

Tests of recycling concrete mix

SBR rubber granulate in the following fractions: $0 \div 1$; $0,8 \div 2$ and $2 \div 4$ mm, as well as polyethylene

Badania recyklingowej mieszanki betonowej

Do wykonania mieszanki kompozytywnej zastosowano granulaty gumowy SBR o frakcjach: $0 \div 1$; $0,8 \div 2$ i $2 \div 4$ mm oraz politereftalan etylenu w postaci płatków PET. Składniki te połączone spoiwem w postaci

terephthalate in the form of PET flakes, were used to make the composite mix. These ingredients were combined with a polyester resin, acting as a binder. The basic properties of the SBR rubber granulate are presented in Table 5.

The chemical elements comprising the SBR rubber granulate were identified. The tests were carried out using a scanning electron microscope (SEM) featuring a chemical composition analysis system based on X-ray dispersive spectroscopy (*Energy Dispersive Spectroscopy, EDS*). The photograph shows the microstructure of the SBR rubber granulate at 200x magnification, together with maps of the distribution of the

dominant elements in the studied area. The results of the SEM/EDS analysis of the SBR rubber granulate are shown in Figure 3. The EDS analysis involved measuring the number of elements at four measurement points and calculating the average amount of each element. The EDS analysis shows that the predominant element in the SBR rubber granulate is carbon (red), with an average quantity of 33.21%. Iron (green) averaged 6.25%, sulphur (blue) averaged 3.05% and zinc (purple) averaged 3.16%. Other elements, such as magnesium, aluminium, sulphur, phosphorus, potassium, calcium, cobalt and copper, did not exceed an average of 1%. PET flakes were also used in the composite mix. This material is reused in the production of food packaging and PET bottles. Table 6 shows the basic properties of polyethylene terephthalate in the form of PET flakes.

The recycled materials were combined with polyester resin, a synthetic material resistant to water, tension and compres-

Table 1. Technical data of APS and WAPS masonry units
Tabela 1. Dane techniczne murowych elementów ściennych APS i WAPS

Actual dimensions/ Wymiary rzeczywiste	masonry unit length – l_u / długość elementu murowego – l_u	490 mm
	masonry unit width – t_u / szerokość elementu murowego – t_u	240 mm
	unit height – h_u / wysokość elementu murowego – h_u	240 mm
Shape and structure/Kształt i budowa		group 2 according to EN 1996-1-1/grupa 2 wg EN 1996-1-1
Unit weight/Masa elementu		43,8 kg
Compressive strength (perpendicular to the 490×240 supporting surface) Wytrzymałość na ściskanie (prostopadle do powierzchni wsporczej 490x240)		26,7 N/mm ²
Water absorption/Absorpcja wody		4,9 g/(m ² s)
Durability (against freeze-thaw)/Trwałość (odporność na zamrażanie/odmrażanie)		frost resistant/mrozoodporny

Table 2. Composition of the concrete mixture of APS and WAPS masonry units (values are given per 1 m³ of volume)

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej murowych elementów ściennych APS i WAPS (wartości podano na 1 m³ objętości)

c/w	w/c	Cement CEM I 32,5 R [kg/m ³]	Water Woda [l/m ³]	Sand Piasek [kg/m ³]	Gravel 2÷8 mm Żwir 2÷8 mm [kg/m ³]	Superplasticiser in the amount of 1.2% of the cement mass [l/m ³]/Superplastyfikator w ilości 1,2% masy cementu [l/m ³]	Share of additives in the cement mass [%]/Udział dodatków w masie cementu [%]	SBR rubber granulate [kg/m ³]/Granulat gumowy SBR [kg/m ³]			PET flakes [kg/m ³]/Płatki PET [kg/m ³]
								0÷1 mm	0,8÷2 mm	2÷4 mm	
2,1	0,476	416	193,1	306	1107	4,99	15	11,23	11,23	33,69	6,24

Table 3. Percentages of SBR rubber granulates and PET flakes in APS and WAPS masonry units

Tabela 3. Procentowe udziały granulatów gumowych SBR oraz płatków PET w murowych elementach ściennych APS i WAPS

Recycling additives/Dodatki recyklingowe	Percentage of granulates [%]/Udział granulatów [%]
SBR rubber granulate 0 ÷ 1 [mm] Granulat gumowy SBR 0 ÷ 1 [mm]	18
SBR rubber granulate 0,8 ÷ 2 [mm] Granulat gumowy SBR 0,8 ÷ 2 [mm]	18
SBR rubber granulate 2 ÷ 4 [mm] Granulat gumowy SBR 2 ÷ 4 [mm]	54
PET flakes/Płatki PET	10
Total additives/Suma dodatków	100

Table 4. Test results of concrete modified with a mixture of SBR and PET of APS and WAPS masonry units

Tabela 4. Wyniki badań betonu modyfikowanego mieszanką SBR i PET murowego elementu ściennego APS i WAPS

w/c	Percentage of additives in the cement mass [%]/Udział dodatków w masie cementu [%]	Consistency class/Klasa konsystencji	Average compressive strength f_{cm} [MPa]/Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]
0,476	15	S1/S2	39,8

zywczyc i butelek PET. Podstawowe właściwości politereftalanu etylenu w postaci płatków PET przedstawiono w tabeli 6.

Zastosowane materiały recyklingowe połączono żywicą poliesterową, która jest tworzywem syntetycznym, odpornym na

żywicę poliesterowej. Podstawowe właściwości granulatu gumowego SBR przedstawiono w tabeli 5.

Wykonano identyfikację pierwiastków chemicznych wchodzących w skład granulatu gumowego SBR. Badania zostały przeprowadzone za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (*Scanning Electron Microscopy*) wyposażonego w system analizy składu chemicznego bazującego na dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego – EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Na fotografii przedstawiono mikrostrukturę granulatu gumowego SBR w powiększeniu 200-krotnym wraz z mapami rozmieszczenia domi-

nujących pierwiastków w badanym obszarze. Wyniki analizy SEM/EDS granulatu gumowego SBR przedstawiono na rysunku 3. Analiza EDS polegała na wykonaniu badania ilości pierwiastków w czterech punktach pomiarowych oraz wyliczeniu średniej ilości każdego z nich. Z analizy EDS wynika, że dominującym pierwiastkiem w granulacie gumowym SBR jest węgiel (kolor czerwony) w ilości średnio 33,21%. Widoczne jest również żelazo (kolor zielony) w ilości średnio 6,25%, siarka (kolor niebieski) w ilości średnio 3,05% oraz cynk (kolor fioletowy) w ilości średnio 3,16%. Pozostałe pierwiastki, takie jak magnez, aluminium, siarka, fosfor, potas, wapń, kobalt, miedź nie przekroczyły wartości średniej 1%. Do wykonania mieszanki kompozytowej zastosowano także płatki PET. Materiał ten jest ponownie wykorzystywany do produkcji opakowań spo-

sion. It is produced by polyesterification of e. g. acids and glycols. The resin was used together with a hardener. The basic physical and chemical properties of the polyester resin used in the composite are presented in Table 7. The ingredients of the composite mix for filling the through holes and butt locks of the WAPS masonry units were described in [10].

The final concrete mix from which the APS and WAPS masonry units were made was selected during the design process through experimentation with varying amounts of SBR granulate fractions. The one used was the most effective in terms of compressive strength. Excessive use of the SBR rubber granulate and PET flakes in concrete may reduce its strength.

Consequently, it is necessary to carefully adjust the proportions of these ingredients to achieve the desired properties of the concrete.

Mechanical vibration parameters and testing the damping efficiency of the masonry units

Measuring vibrations makes it possible to observe complex, non-sinusoidal waveforms which can be represented in the form of an amplitude spectrum after frequency analysis. The following are taken into account for the quantitative description of vibrations:

- a) the peak-to-peak value, which indicates the maximum difference between the positive and negative deviation of the signal, making it possible to assess the displacement of selected points following the propagation of a mechanical wave [15];
- b) average relative damping value

Table 5. Physical and chemical properties of SBR rubber granulate

Tabela 5. Właściwości fizyczne i chemiczne granulatu gumowego SBR

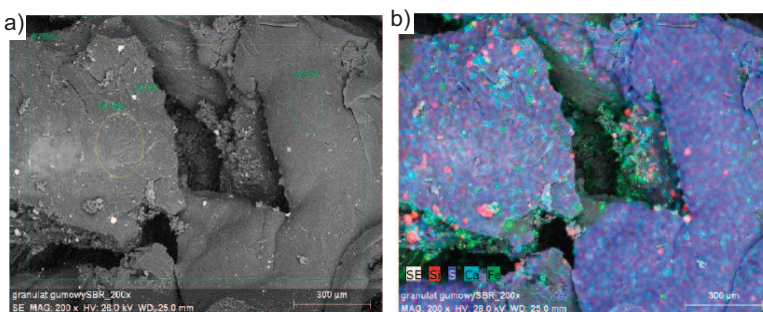
Physical and chemical properties of the SBR rubber granulate/ Właściwości fizyczne i chemiczne granulatu gumowego SBR	
Physical state/Postać	rubber granulate/granulat gumowy
Colour/Kolor	black/czarny
Smell/Zapach	mild/łagodny
Solubility/Rozpuszczalność	not soluble in water/nie rozpuszcza się w wodzie
Ignition point/Punkt zapłonu	> 350°C*
Ignition temperature/ Temperatura zapłonu	>350°C*
Thermal degradation/ Rozkład termiczny	>180°C*
Granulate density*/Gęstość granulatu*	
Fraction:/ Frakcja:	(0 – 1 mm) 450 – 550 kg/m ³
	(0,8 – 2 mm) 370 – 390 kg/m ³
	(2 – 4 mm) 340 – 350 kg/m ³

* data based on the technical data sheet of the product used/
dane na podstawie karty technicznej użytego produktu

wodę, rozciąganie i ściskanie. Powstaje w procesie poliestryfikacji m.in. kwasów i glikoli. Żywicę zastosowano razem z utwardzaczem. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne żywicy poliestrowej, zastosowanej w mieszance kompozytowej przedstawiono w tabeli 7. Projekt składu mieszanki kompozytowej do wypełnienia otworów przelotowych i zamków doczołowych murowego elementu ściennego WAPS opisano w [10].

Docelową mieszankę betonu, z której wykonano murowe elementy ścienne APS i WAPS, wybrano w procesie projektowania metodą eksperymentalną, uwzględniając różne ilości frakcji granulatu SBR. Zastosowany był najbardziej efektywny pod względem wytrzymałości na ściskanie. Nadmierne stosowanie granulatu gumowego SBR i płatków PET

w betonie może prowadzić do zmniejszenia jego wytrzymałości. Konieczne jest zatem dokładne dostosowanie proporcji tych składników, aby osiągnąć żądane właściwości betonu.



Microstructure of SBR rubber granulate: a) at 200x magnification; b) map of the distribution of dominant elements in the studied area

Mikrostruktura granulatu gumowego SBR: a) w powiększeniu 200x; b) mapa rozmieszczenia dominujących pierwiastków w badanym obszarze

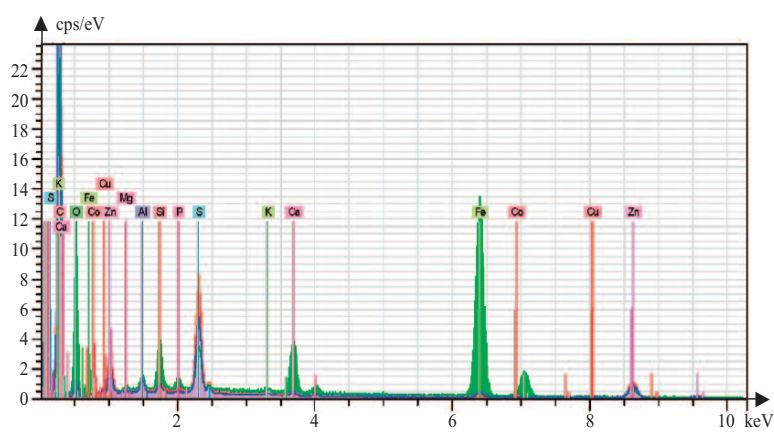


Fig. 3. EDS spectrum in the examined micro-area for SBR rubber granulate

Rys. 3. Widmo EDS w badanym mikroobszarze granulatu gumowego SBR

je maksymalną różnicę odchylenia dodatniego oraz ujemnego sygnału i na tej podstawie można dokonać oceny przemieszczeń wybranych punktów w następstwie propagacji fali mechanicznej [15];

- b) średnią względną wartość tłumienia

Parametry drgań mechanicznych i badanie efektywności tłumienia elementów murowych

Pomiar drgań pozwala zaobserwować przebiegi złożone, niesinusoidalne, które po wykonaniu analizy częstotliwościowej można przedstawić w postaci widma amplitudowego. Do opisu ilościowego drgań przyjmuje się:

- a) wartość międzyszczytową, która wskazuje

Table 6. Physical and chemical properties of PET flakes
Tabela 6. Właściwości fizyczne i chemiczne płatków PET

Physical and chemical properties of polyethylene terephthalate in the form of coloured PET flakes/Właściwości fizyczne i chemiczne politereftalanu etylenu w postaci kolorowych płatków PET	
Physical state/Postać	flakes/płatki
Colour/Kolor	coloured/kolorowe
Intrinsic viscosity/Lepkość graniczna	0,74 ± 0,03 dl/g
Flake size/Rozmiar płatków	< 12 mm
Density/Gęstość	260 ± 50 kg/m ³
Humidity/Wilgotność	< 1%
Specific density/Gęstość właściwa	ok. 1,35 g/cm ³
Dust units/Jednostki pyłowe	< 0,5%
Metal/Metal	< 100 ppm
Paper/Papier	< 50 ppm
PVC	< 50 ppm
Adhesive-coated flakes/Płatki pokryte klejem	< 1000 ppm

Table 7. Physical and chemical properties of polyester resin
Tabela 7. Właściwości fizyczne i chemiczne żywicy poliestrowej

Physical and chemical properties of polyester resin/Właściwości fizyczne i chemiczne żywicy poliestrowej	
Physical state/Stan fizyczny	high viscosity liquid/wysokolepka ciecz
Colour/Kolor	yellow/żółty
Smell/Zpach	sweet to penetrating/słodkawy do przenikliwego
Odour threshold/Próg zapachu	0,43 mg/m ³ (styrene)/0,43 mg/m ³ (styren)
Melting/freezing point/Temperatura topnienia/krzepnięcia	-30°C
Boiling point/Temperatura wrzenia	146°C
Ignition temperature/Temperatura zapłonu	30°C
Self-ignition temperature/Temperatura samozapłonu	400°C
Lower and upper explosion limit/Granice wybuchowości	lower: 1,1 vol%; upper: 8,0 vol% (styrene)/% dolna: 1,1 vol%; górną: 8,0 vol% (styren)
Vapour pressure/Prężność par	approx. 7,3 hPa at 20°C (styrene) ok. 7,3 hPa w 20°C (styren)
Vapour density/Gęstość par	3,6 (styrene)/3,6 (styren)
Density/Gęstość	1,1 g/cm ³ at 20°C
Solubility (in water)/Rozpuszczalność (w wodzie)	very weak/bardzo słaba
Viscosity/Lepkość	300 ÷ 500 mPas

$$w_{tm} = \left(1 - \frac{q_m}{q_{m1}}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

where:

q_m and q_{m1} – the mean values of vibrations obtained integrating the signal function $q(t)$;

c) the effective value of the vibration [15]

$$q_s = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (q(t) - q_m)^2 dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2)$$

where:

t_1 and t_2 – measurement start and end times, respectively, $q(t)$ signal function and q_m – mean vibration value obtained after integrating the signal function;

d) average relative damping of the vibration effective value, which indicates the proportional relationship with the energy carried by the signal and takes into account the amplitude values [16].

$$w_{ts} = \left(1 - \frac{q_s}{q_{s1}}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

where:

q_s and q_{s1} – vibration effective value.

The research part, which aimed to verify the effect of different mechanical wave frequencies on the APS and WAPS masonry units, involved using such equipment as:

- an electrodynamic inductor with a frequency range of up to 9 kHz and a maximum sinusoidal signal strength of 31 N;
- driver for the exciter;
- data acquisition module;
- accelerometers.

The damping effectiveness of the new type of concrete masonry units was determined using an excitation frequency from 8 to 5000 Hz. Performing calculations based on conditions (1) and (3) for the APS and WAPS masonry units made it possible to determine the average relative damping values w_{tm} (Figure 4) and the average relative damping of the effective value w_{ts} (Figure 5), respectively.

$$w_{tm} = \left(1 - \frac{q_m}{q_{m1}}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

q_m i q_{m1} – wartości średnie drgań otrzymane po scałkowaniu funkcji sygnału $q(t)$;

c) wartość skuteczną drgań [15]

$$q_s = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (q(t) - q_m)^2 dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2)$$

gdzie:

t_1 i t_2 – odpowiednio czas rozpoczęcia i zakończenia pomiaru, $q(t)$ funkcja sygnału i q_m wartość średnia drgań otrzymana po scałkowaniu funkcji sygnału;

d) średnie względne tłumienie wartości skutecznej drgań, które wskazuje proporcjonalną relację z energią przenoszona przez sygnał i uwzględnia wartości amplitudy [16]

$$w_{ts} = \left(1 - \frac{q_s}{q_{s1}}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: q_s i q_{s1} – wartość skuteczną drgań.

Część badawczą dotyczącą sprawdzenia wpływu oddziaływania różnej częstotliwości fali mechanicznej na betonowe murowe elementy ściennie APS i WAPS wykonano z zastosowaniem urządzeń, takich jak:

- wzбудnik elektrodynamiczny, który ma zakres częstotliwości do 9 kHz i maksymalną siłę sygnału sinusoidalnego 31 N;
- sterownik do wzбудnika;
- moduł do zbierania danych;
- akcelerometry.

Efektywność tłumienia drgań w przypadku nowego typu betonowych murowych elementów ściennych określono, przyjmując częstotliwość wzbudzania od 8 do 5000 Hz. Dokonując obliczeń na podstawie warunków (1) i (3), w przypadku murowych elementów ściennych typu APS i WAPS, otrzymujemy odpowiednio średnie względne wartości tłumienia w_{tm} (rysunek 4) oraz średnie względne tłumienie wartości skutecznej w_{ts} (rysunek 5).

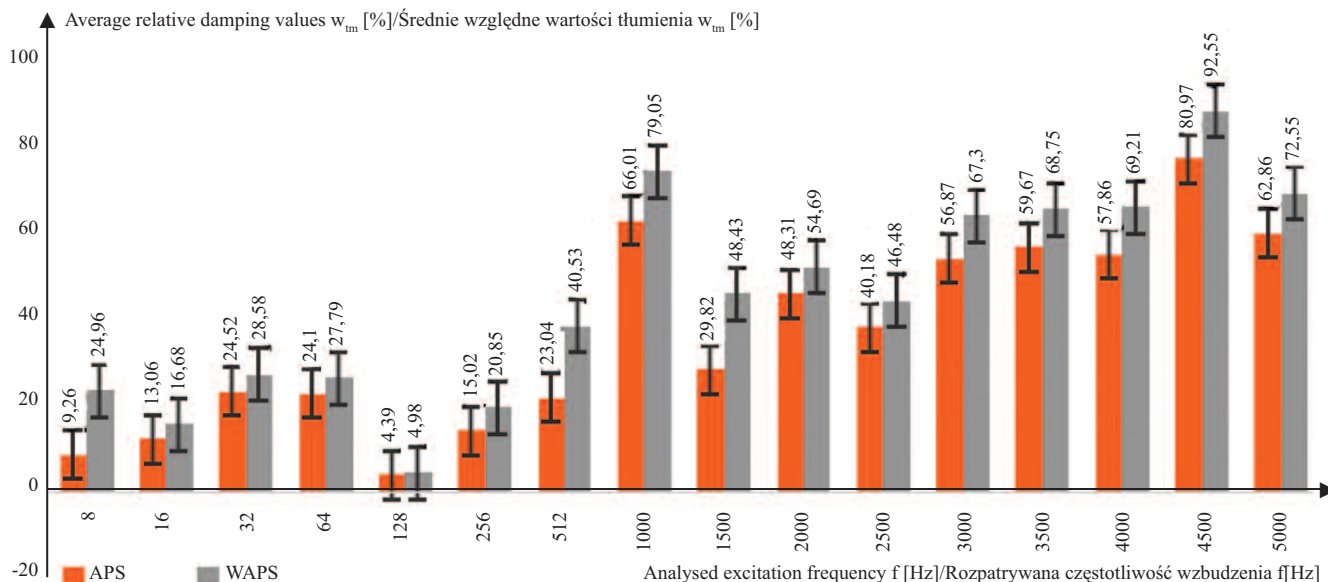


Fig. 4. Distribution of average relative damping values w_m [%] of APS and WAPS masonry units in the excitation frequency range of 8 ÷ 5000 Hz
 Rys. 4. Rozkład średnich względnych wartości tłumienia w_m [%] murowanych elementów ściennych APS i WAPS w zakresie częstotliwości wzbudzenia 8 ÷ 5000 Hz

Summary and conclusions

A comparison of the average relative damping value and the average relative damping of the effective value in the 8 – 5000 Hz frequency range shows that the WAPS masonry units are more effective in limiting mechanical wave propagation compared to the APS masonry units. Only at the frequency of 128 Hz for the average relative damping value and of 16 and 32 Hz for the

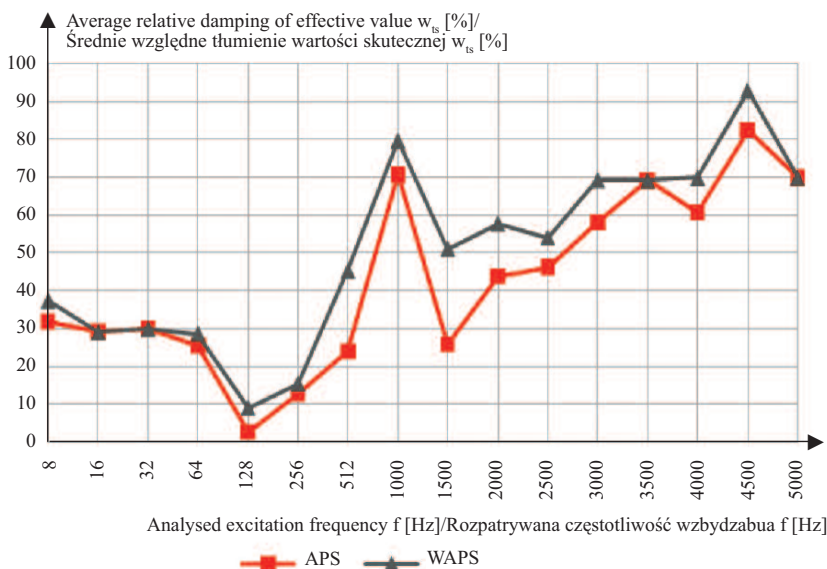


Fig. 5. Average relative damping of the effective value w_s [%] of APS and WAPS masonry units in the frequency range 8 ÷ 5000 Hz
 Rys. 5. Średnie względne tłumienie wartości skutecznej w_s [%] murowanych elementów ściennych APS i WAPS w zakresie częstotliwości 8 ÷ 5000 Hz

average relative damping of the effective value do the two analysed masonry units show similar values.

Analysing the average relative damping value w_m (Figure 4) and the average relative damping of the effective value w_s (Figure 5), it was noted that in the frequency range analysed, i.e. from 8 to 5000 Hz, only at the frequency of 128 Hz for the average relative damping value and of 16 and 32 Hz for the average relative damping of the effective value did the two analysed masonry units show similar values. The APS masonry unit was shown to have lower damping values than the WAPS masonry unit. Filling the through holes of the APS masonry unit with an additional recycled composite mix improves the dynamic vibration reduction efficiency of the

Podsumowanie i wnioski

Porównanie średniej względnej wartości tłumienia oraz średniego względnego tłumienia wartości skutecznej w paśmie analizowanych częstotliwości 8 – 5000 Hz wykazuje większą skuteczność w ograniczeniu propagacji fal mechanicznych murowanych elementów ściennych WAPS w porównaniu z murowymi elementami ściennymi APS. Jedynie w przypadku częstotliwości 128 Hz średnich względnych wartości tłumienia oraz częstotliwości 16 i 32 Hz

średnich względnych tłumień wartości skutecznej oba analizowane murowe elementy ścienne wykazują podobne wartości.

Analizując średnie względne wartości tłumienia w_m (rysunek 4) oraz średnie względne tłumienia wartości skutecznej w_s (rysunek 5), zauważono, że w paśmie analizowanych częstotliwości, tj. od 8 do 5000 Hz, jedynie w przypadku częstotliwości 128 Hz średnich względnych wartości tłumienia oraz częstotliwości 16 Hz i 32 Hz średnich względnych tłumień wartości skutecznej oba analizowane murowe elementy ścienne wykazują podobne wartości. Wykazano, że murowy element ścienny APS ma mniejsze wartości tłumienia niż murowy element ścienny WAPS. Wypełnienie otworów przelotowych murowego elementu ściennego APS dodatkową recyklingową

resulting WAPS masonry unit. Figure 6 shows an assessment of the improvement in this efficiency in the analysed frequency range by comparing the average relative damping w_m [%] of the WAPS masonry unit against the APS unit. It shows that only at 128 Hz is the damping value of the two masonry wall elements comparable, while in the other cases, the difference is 3.62 – 18.6% in favour of the WAPS masonry units (Figure 6). This justifies using the developed composite mixture to reduce the dynamic vibrations of the WAPS masonry unit. The damping efficiency of the APS masonry units compared to the commonly used hollow blocks was demonstrated in [10].

The effectiveness of mechanical wave damping in concrete masonry units is highly dependent on innovative solutions obtainable through numerical simulations. Further real-world ground vibrations transmitted to buildings, evaluating the impact of vibrations on people in buildings and developing practical guidelines for validating modelling and simulation results.

mieszkanką kompozytową poprawia efektywność redukcji drgań dynamicznych murowego elementu ściennego WAPS. Ocena poprawy tej efektywności, w zakresie analizowanych częstotliwości, przez porównanie średniego względnego tłumienia w_m [%] murowego elementu ściennego WAPS względem APS została pokazana na rysunku 6. Wynika z niego, że jedynie w przypadku częstotliwości 128 Hz wartość tłumienia obu

murowych elementów ściennych jest porównywalna, natomiast w pozostałych przypadkach różnica wynosi 3,62 – 18,6% na korzyść murowych elementów ściennych WAPS (rysunek 6). Uzasadnia to zastosowanie opracowanej mieszanki kompozytywnej do redukcji drgań dynamicznych murowego elementu ściennego WAPS. Efektywność tłumienia murowych elementów ściennych APS w porównaniu z powszechnie stosowanymi kanałowymi pustakami ściennymi wykazaliśmy w [10].

Efektywność tłumienia fal mechanicznych w betonowych elementach murowych w bardzo

dużym stopniu zależy od innowacyjnych rozwiązań, które można otrzymać na drodze symulacji numerycznych. Planowane są dalsze badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych, w tym m.in. dotyczące oceny szkodliwości drgań przekazywanych przez podłogę na budynki, oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach oraz opracowanie praktycznych wytycznych walidacji wyników modelowania i symulacji.

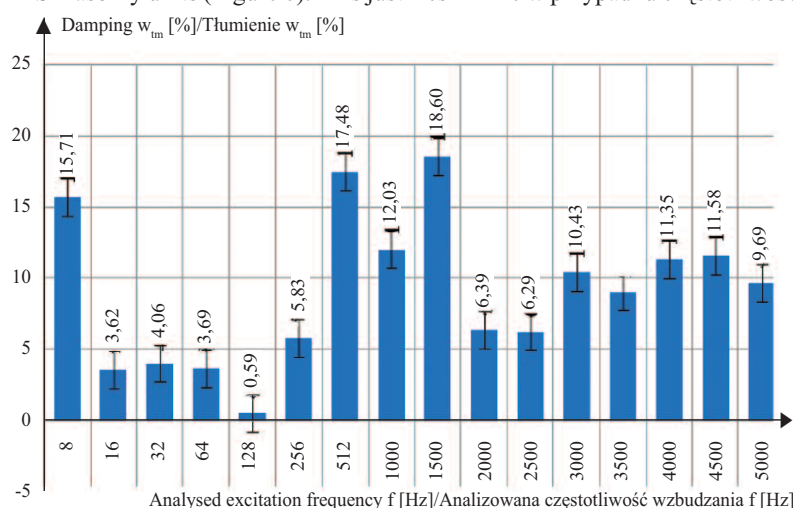


Fig. 6. Comparison of average relative damping values w_m [%], of WAPS masonry units versus APS in the frequency range 8 ÷ 5000 Hz

Rys. 6. Porównanie średnich względnych wartości tłumienia w_m [%], murowego elementu ściennego WAPS względem APS w zakresie częstotliwości 8 ÷ 5000 Hz

Received: 06.05.2024
 Revised: 04.07.2024
 Published: 21.08.2024

Wpłynął do redakcji: 06.05.2024 r.
 Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.07.2024 r.
 Opublikowano: 21.08.2024 r.

References

[1] Zou Ch, Wang Y, Zhang X, Tao Z. Vibration isolation of over-track buildings in a metro depot by using trackside wave barriers. *Journal of Building Engineering*. 2020; DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101270

[2] Arjunan A, Baroutaji A, Robinson J, Vance A, Arafat A. Acoustic metamaterials for sound absorption and insulation in buildings. *Building and Environment*. 2024; DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111250.

[3] Ekanayake SD, Liyanapathirana DS, Leo CJ. Attenuation of ground vibrations using in-filled wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014; DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.10.004.

[4] Rzeszutko M. Ściany akustyczne z pustaków ceramicznych Porotherm, Ściana międzymieszkaniowa z bloczków SILIKAT A. *Materiały Budowlane*. 2008; 8: 7 – 10.

[5] Fraile-Garcia E, Ferreiro-Cabello J, Mendivil-Giro M, San Vicente-Navarro A. Thermal behaviour of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste tyre rubber. *Construction and Building Materials*. 2018; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.015.

[6] Adlahaug SK, Kvande T, Time B, Peuhkuri R. H, Kalamees T, Johansson P, Berardi U, Lohne J, Moisture control strategies of habitable basements in cold climates. *Building and Environment*. 2020; DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106572.

[7] Nikbin IM, Ahmadi H, Fracture behaviour of concrete containing waste tire and waste polyethylene terephthalate: An sustainable fracture design. *Construction and Building Materials*. 2020; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119960.

[8] Halbiniak J, Kater J, Major M, Langier B, Major I. An example of harnessing crushed ceramic pots for the production of watertight concrete. *Structural Concrete*. 2021; DOI: 10.1002/suco.202000039.

[9] Kater J, Halbiniak J, Langier B, Major M, Major I. Influence of Varied Waste Ceramic Fillers on the Resistance of Concrete to Freeze – Thaw Cycles. *Materials*. 2021; DOI: 10.3390/ma14030624.

[10] Major M, Adamczyk I, Kalinowski J. An Innovative Absorption Propagation System Hollow Block Made of Concrete Modified with Styrene–Butadiene Rubber and Polyethylene Terephthalate Flakes to Reduce the Propagation of Mechanical Vibrations in Walls. *Materials*. 2023; DOI: 10.3390/ma16145028.

[11] Adamczyk I, Major M, Kalinowski J. Ocena efektywności tłumienia drgań przez recyklingową mieszankę kompozytową. *Materiały Budowlane*. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.12.35.

[12] Dang B-L, Nguyen-Ngoc H, Duc Hoang T, Nguyen-Xuan H, Abdel Wahab M. Numerical investigation of novel prefabricated hollow concrete blocks for stepped-type seawall structures. *Engineering Structures*. 2019; DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109558.

[13] Major M, Adamczyk-Królak I. Patent nr PL 235427 B1. pt.: Ażurowy pustak ścienny, Politechnika Częstochowska 2020.

[14] Major M, Adamczyk-Królak I. Patent nr PL. 237899 B1 P. Cz. pt.: Wkładka do ażurowych pustaków ściennych, Politechnika Częstochowska 2021.

[15] Kucharski T, System pomiaru drgań mechanicznych, WNT 2018.

[16] Osiński Z, Tłumienie drgań. Warszawa, PWN, 1997.