



Norbert ABRAMCZYK ORCID 0000-0003-4556-7994
Daria ŻUK ORCID 0000-0002-0810-0626
Katarzyna PANASIUK ORCID 0000-0002-7138-0827
Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ADDING RUBBER RECYCLATE ON THE STRENGTH PROPERTIES OF EPOXY-GLASS COMPOSITES

Analiza wpływu dodatku recyklatu gumowego na właściwości wytrzymałościowe kompozytów epoksydowo-szklanych

Abstract: *The article attempts to assess the possibility of using rubber recycle as a component of composite materials. Research is being carried out to develop a technology for the production of composite materials with the addition of rubber waste. These tests are aimed at increasing the reliability and safety of the operation of structures exposed to long-term impact of devices generating vibrations. At the same time, work is underway on the use of complex composite surfaces as sound-absorbing elements. The new direction of using recyclates will have a positive impact on the management of environmentally harmful waste, taking into account a favorable economic factor.*

Keywords: recycling, rubber recycle, new composite materials, vibrations, sound absorption

Streszczenie: *W artykule podjęto próbę oceny możliwości wykorzystania recyklatu gumowego jako składnika materiałów kompozytowych. Prowadzone są badania mające na celu opracowanie technologii wytwarzania materiałów kompozytowych z dodatkiem odpadu gumowego. Badania te są ukierunkowane na zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa obsługi konstrukcji narażonych na długotrwałe oddziaływanie urządzeń generujących wibracje. Jednocześnie trwają prace nad wykorzystaniem złożonych powierzchni kompozytowych jako elementów dźwiękochłonnych. Nowy kierunek wykorzystania recyklatów będzie miał korzystny wpływ na zagospodarowanie szkodliwych dla środowiska odpadów z uwzględnieniem korzystnego czynnika ekonomicznego.*

Słowa kluczowe: recykling, recyklat gumowy, nowe materiały kompozytowe, wibracje, dźwiękochłonność



1. Introduction

Every year, approximately 190,000 tons of new car tires are introduced to the Polish market, while at the same time, 150,000 tons of used tires are withdrawn from use and must be disposed of, processed and managed. Used tires do not degrade in the natural environment even over a period of 100 years and are classified as waste that should be reused in industry [6]. The percentage distribution of used tires around the world is shown in Fig. 1. This distribution clearly shows that the largest share in the rubber waste management process is occupied by material recycling - 42%, and the legal conditions in force in Poland and the European Union force increased recycling of rubber waste, which leads to intensify the search for new ways to manage the ever-increasing amount of rubber waste.

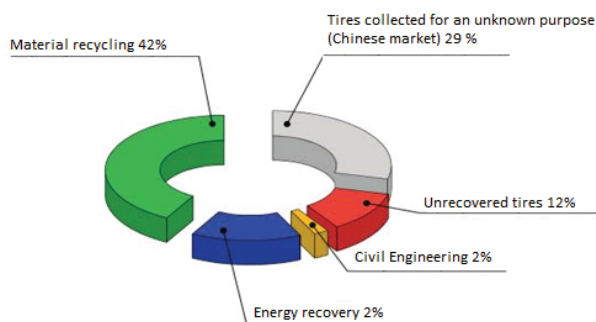


Fig. 1. Waste tire management on a global scale [8]

It is worth noting that in comparison to products made of paper, glass, metals or plastics, recycling of rubber products is a much more complex and technological process [2, 3]. In addition to rubber, a car tire contains steel reinforcement and fibers, and the rubber mixture, apart from rubber, contains environmentally harmful ingredients, i.e. carbon black, silica, kaolin, chalk, lithopone, plasticizers, anti-aging agents, flame retardants, vulcanizing team (sulphur or peroxide). The construction diagram of a car tire is shown in Fig. 2, the percentage composition of a car tire is shown in Tab. 1.

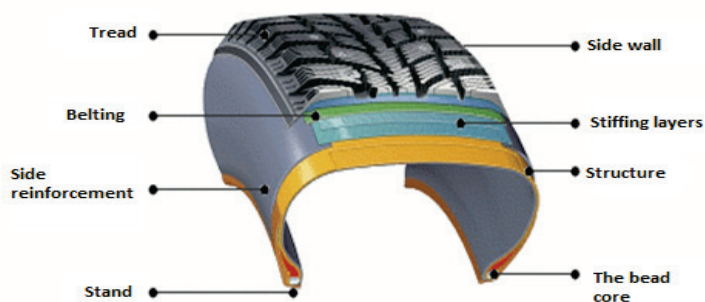


Fig. 2. The scheme of the construction of a car tire [8]

Table 1

Percentage composition of a car tire

Ingredient	Content [%]
Natural rubber	14
Synthetic rubber	27
Soot	28
Steel reinforcement	14-25
Filler, fabric and rest	16-17

Material recycling of used tires consists in their fragmentation in order to obtain recyclate [4, 12]. As a result of grinding, a mixture of rubber, fiber and steel is obtained. The next stage in the production of rubber recyclate is the separation of fibers and fragments of steel reinforcement and the segregation of the crushed rubber into fractions and possible additional grinding. The process of obtaining rubber recyclate from car tires is shown in Fig. 3. The diagram of the rubber grinding line at ambient temperature is shown in Fig. 4.

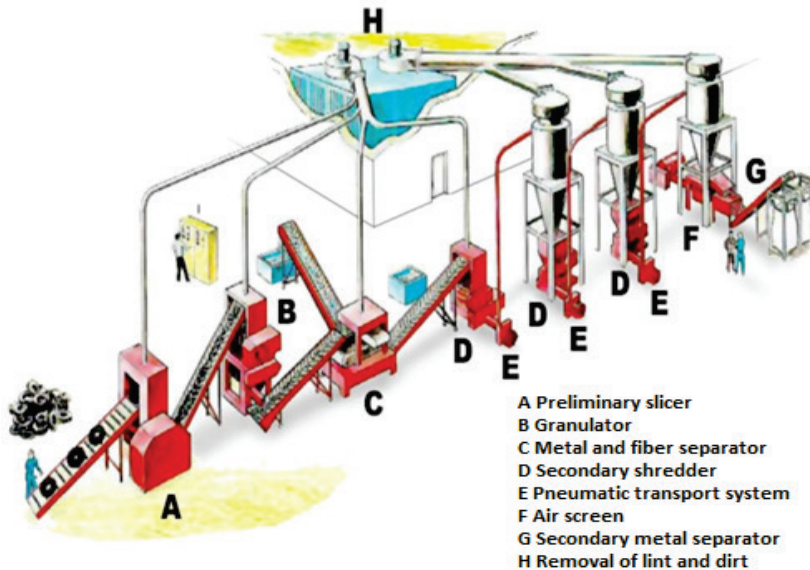


Fig. 3. The process of obtaining rubber recyclate from car tires [6]

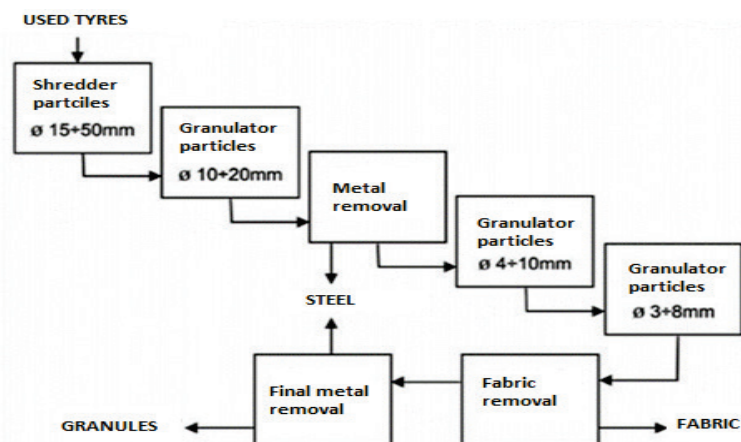


Fig. 4. Diagram of the process of grinding a car tyre [13]

Due to the need to manage rubber recyclate, new solutions are sought for its reuse. Rubber recyclate is used e.g. in gardening as a substrate or as a component of building materials used for playgrounds [4]. Rubber recyclate is also used in the construction of roads, bridges, airports and underground passages. The method of rubber recyclate management is significantly affected by its grain granulation, percentage content in the composite material and the method of distribution. The grain size of the recyclate obtained in the process of its grinding affects the possibility of adding recyclate as a modifier or structural component of new composite materials.

Scientific literature describes examples of the use of rubber recyclate as a filler for new materials, the recyclate is used, for example, for asphalt-rubber and polyurethane mixtures and for the modification of rubber mixtures [1, 9, 10]. The addition of rubber recyclate also changes the properties of mixes with Portland concrete [11, 14]. Rubber recyclate is added to the concrete mix together with steel reinforcement [7]. Research is also being conducted on the effect of adding rubber from recyclate to thermoplastic elastomers [5]. The properties of the rubber recyclate itself as an oil-absorbing agent are also being tested [15].

Recycled rubber granulate has a very high sound attenuation capacity, above 4 dB. Due to its damping properties, rubber recyclate can improve the operating parameters and comfort of users of vessels, i.e. yachts, boats, by using composite materials with the addition of recyclate for the construction of bulkheads and parts of the sheathing of noise-generating rooms, i.e. power plant and leveling vibrations of devices installed in them - pumps, motors.

The aim of the conducted research was to determine the effect of the addition of rubber recyclate on the properties of composites made on the basis of a glass mat with random fiber direction and EPO 652 epoxy resin, together with the Z-1 hardener. Two types of research materials with a 5% addition of rubber recyclate and a different method of adding recyclate to the composite were produced for the tests, and one variant without the addition of recyclate as a comparative material. Samples made of the materials in question were subjected to a static tensile test in order to determine changes in strength parameters caused

by the addition and decomposition of rubber recyclate. As a result of the tests, it was clearly stated that the recyclate addition and the method of its distribution had a significant effect on changes in the parameters recorded during the static tensile test. The analysis of the results obtained during the preliminary tests showed that the epoxy-glass composites based on EPO 652 resin with the addition of rubber recyclate in the form of three sandwich layers between the layers of the glass mat have better strength parameters than the composite with a random addition of recyclate to the matrix. The analyzes carried out make it possible to select the optimal variant of the material depending on the planned application.

2. Material and methods

For the production of new epoxy-glass composites with the addition of rubber recyclate, rubber recyclate with particle size φ from 0 to 8 mm obtained in the process of industrial processing was used. The recyclate fraction with grain size < 1.5 mm obtained using a laboratory sieve shaker LAB-11 -200/UP from EKOLAB, shown in Fig. 5, was used in the tests.



Fig. 5. Obtaining specific fractions of rubber recyclate with the use of a sieve shaker EKOLAB, model: LAB-11 -200/UP

The first stage of the preparation of research materials was to determine the technology for the production of composites, taking into account the addition of rubber recyclate. At the same time, the method of mixing the recyclate and the arrangement of recyclate layers in the research materials were determined.

In the EPO 5 composite material, rubber recyclate in the amount of 5% of the composite weight was added to the composite matrix. The advantage of this solution was the lack of the need for additional calculations regarding the content and distribution of recyclate. The disadvantages of this solution are technological difficulties when using industrial technologies, i.e. vacuum infusion. When using this method, difficulties arise

during the spreading and seepage of the reinforcement. The obtained material is not reproducible due to the randomness of the distribution of rubber recyclate in the composite.

In the EPO 5W composite variant, rubber recyclate in the amount of 5% of the composite weight was placed in the form of three layers, between the 3rd and 4th, 6th and 7th and 9th and 10th layers of the glass mat in the composite. In the case of using this method of distributing the recyclate in the composite, it was possible to implement the manufacturing technology in the industry, and the comparability of the manufactured materials was achieved. At the same time, the disadvantages of this solution are more complicated production processes with the need to use production lines used in vacuum lamination and vacuum infusion processes.

The tested composite materials were produced by hand lamination from a glass mat, rubber recyclate and epoxy resin with a hardener. The reinforcement of the composites was a glass mat with a random direction of fibers and a basis weight of 350 g/m². Epoxy resin EPO 652 was used as the matrix, the technological and strength parameters of which are presented in Tab. 2. Hardener Z-1 was used to harden the matrix in the proportion of 13 g of hardener per 100 g of resin. An aluminum mold, rollers and laminating brushes were used to form the composites, and Honey Wax in the amount of 2 layers was used as a separator. Table 3 shows the composition of the produced research materials. Fig. 6 shows the production of EPO 5 and EPO 5W composite variants by hand lamination.

Table 2

Characteristics of epoxy resin EPO 652

Parameter	Unit	Value
Epoxy number	[Mol/ 100g]	0,488-0,513
Density at 25°C	[mPas]	500-900
Gel time 100 g at 20°C	[min]	50-65
Hardening time at 20°C	[dni]	7
Flexural strength	[MPa]	66,6
Breaking stresses	[MPa]	28,6
Young modulus	[MPa]	2450

Table 3

Composition of composite materials used in the research [16]

Material	Rubber recyclate [%]	Glass mat [%]	Resin [%]	Nr of layers	Glass mat [g]	Resin [g]	Recyclate [g]
EPO 0	0	40	60	12	178,46	267,69	-
EPO 5	5	35	65	12	178,22	266,62	22,3
EPO 5W	5	35	65	12	175,11	263,64	23,5

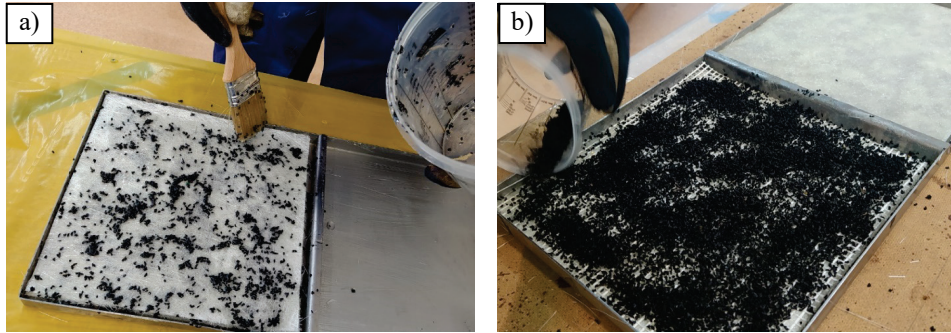


Fig. 6. Production of epoxy-glass composites: EPO 5, with the addition of rubber recycle to the matrix (a); EPO 5W, with 3 layers of rubber recycle (b)

The scope of the tests carried out included a static tensile test and an impact test. In order to eliminate the influence of cutting temperature on the structure of the tested materials, the water cutting method was used to obtain test samples. The samples for the static tensile test were prepared in accordance with the PN-EN ISO 527-4:2022-06 standard. For the static tensile test, a Zwick Roell hydraulically driven universal testing machine with Test Expert II software was used. Figure 7a shows samples of EPO 5 material prepared for static tensile testing. U-notch samples for impact tests were made in accordance with PN-EN ISO 179-1:2010E. The impact strength tests of composite materials were carried out on a Charpy RKP450 - TestXpert II pendulum hammer. Figure 7b shows U-notched EPO 5 samples prepared for impact testing.



Fig. 7. Samples prepared for the static tensile test on the Zwick Roell machine made of EPO 5 material (a); Sample made of EPO 5 material prepared for impact tests on the Charpy RKP450 - TestXpert II pendulum hammer (b)

For static tensile tests, 10 composite samples of each material variant were used. 12 samples of each material were used for impact tests. Fig. 8 shows the static tensile and impact tests on composite materials.

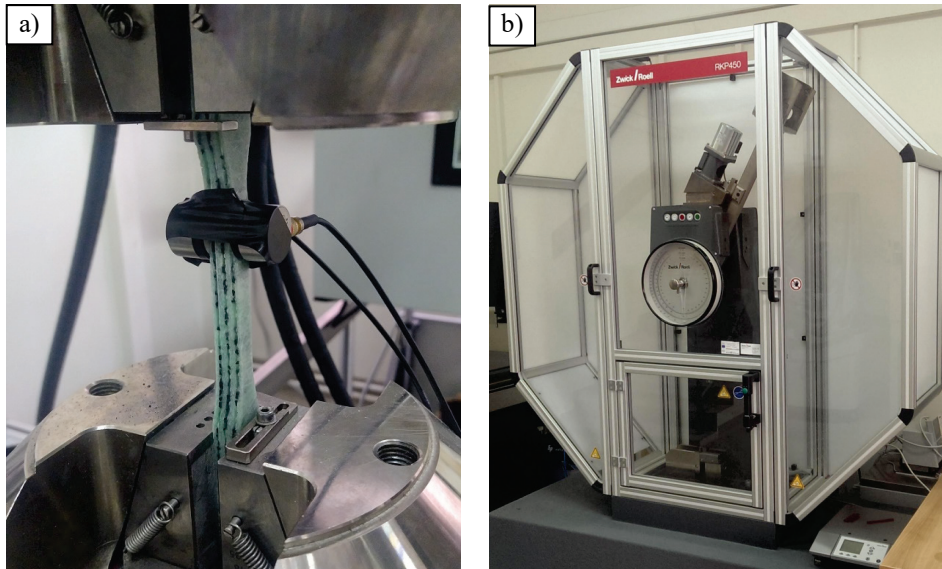


Fig. 7. View of the EPO 5W sample mounted in the holders of the testing machine (a); Charpy impact test (b)

3. Results

As a result of the static tensile tests carried out on composite materials, strength parameters were obtained, i.e. tensile strength σ_m , Young's modulus E and relative deformation ε . The obtained results were averaged for each of the three variants of the composite materials. The list of obtained parameters is presented in Tab. 4.

Table 4

Strength parameters of epoxy-glass composite materials (average of 5 tests) [16]

Material	σ_m [MPa]	E [%]	E [MPa]
EPO 0	91.77	2.34	6061
EPO 5W	79.39	1.82	5938
EPO 5	58.01	2.31	3928

Figure 9 shows three selected tensile curves for each variant of the tested material, obtained during the static tensile test.

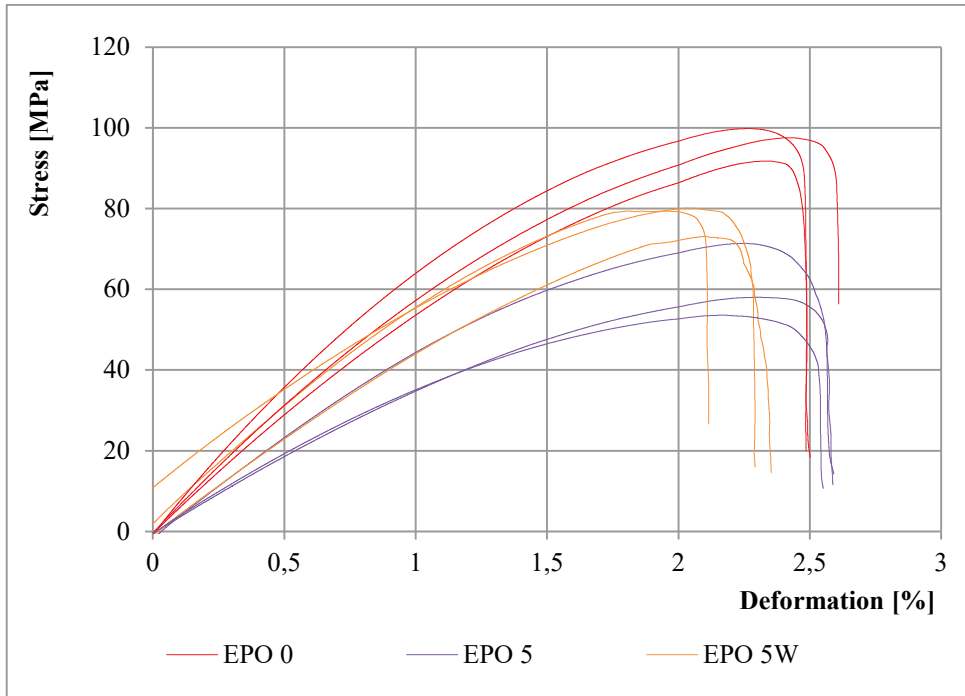


Fig. 9. Tensile curves for the tested composite materials

Table 5 presents the ranges of impact strength values U measured for the tested composite materials and the average impact strength values obtained during the Charpy Hammer impact test.

Table 5

Impact strength values for the tested composite materials

Material variant	EPO 0	EPO 5	EPO 5W
Impact strength U , average value obtained from 12 tests [J/m^2]	74	63	82

Figure 10 shows a graph illustrating the values obtained during the impact test carried out on the tested composite materials using the Charpy Hammer.

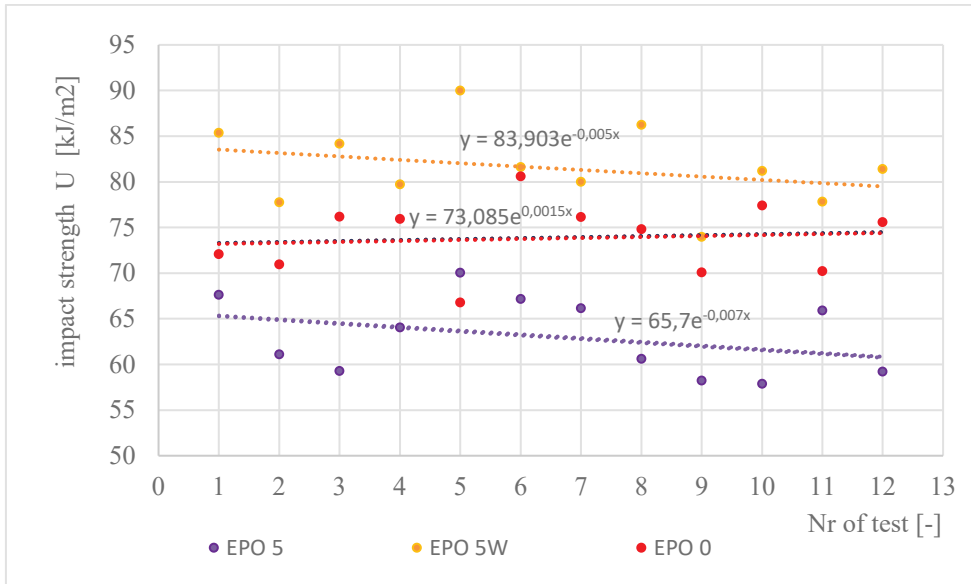


Fig. 10. Graph of the values from the impact test carried out on the materials

4. Analyses of the research results

The analysis of the obtained results showed that the addition of rubber recyclate to the resin reduces the strength parameters of the epoxy-glass composite, but the way the recyclate is distributed in the material significantly affects the values of these parameters. The tensile strength of the composites with the addition of recyclate decreased in comparison with the pure EPO 0 composite: by 13% in the case of the addition of 5% of the recyclate as 3 layers and by about 37% in the case of the addition of 5% of the recyclate to the matrix. It is worth noting the influence of the addition of rubber recyclate on the elasticity, as well as the deformation method of the tested composite materials. A slight change in Young's modulus is important. This parameter for the EPO 5 variant decreased by 35% compared to EPO 0, while for EPO 5W the value of Young's modulus decreased by only 2%. For the EPO 5 variant, the deformation of the material increased by 1.3% compared to the base material, while for the EPO 5W variant it increased by 22.2%. Figure 9 shows three selected tensile curves for each variant of the tested material obtained during the static tensile test.

In the case of impact strength tests, the best values of this parameter were obtained by the EPO 5W composite. In the case of this material, compared to the EPO 0 composite, the impact strength increased by 10%. In comparison, Option EPO 5 showed 15% less impact strength than Option EPO 0.

The tests clearly show that when analyzing the results of the static tensile test, the EPO 5W samples had the best strength parameters compared to the pure epoxy-glass composite. These values were slightly lower than the values obtained for the composite material without the addition of rubber recyclate. In the case of the analysis of the results obtained in the impact strength tests, the EPO 5W samples also showed the highest impact strength parameters, exceeding the values obtained for the composite without the addition of rubber recyclate. A detailed analysis of the results obtained in the static tensile test of the tested materials was presented in an earlier study [16].

5. Conclusions

Depending on the needs and application, the epoxy-glass composites with the addition of rubber recyclate presented in the article can be designed and modified in terms of the required parameters, and their modeling can be based on such factors as; percentage content of recyclate, granulation of recyclate grains and the way of its distribution in the material, which was confirmed by the conducted tests.

The analysis of the strength properties was favorable for the EPO 5W variant, compared to the properties of the pure EPO 0 composite. Analyzing the results obtained at the strength test stage, at a later stage of the work, research aimed at determining the impact of the addition of rubber recyclate on the damping, sound-absorbing and ballistic properties was started. For this purpose, laboratory vibrodiagnostic tests are carried out on the vibration exciter and tests analyzing sound absorption in acoustic chambers, as well as ballistic tests.

The composites based on glass mat and epoxy resin presented in the article, due to the addition of recyclate rubber, which has soundproofing and damping properties, can be an alternative to the materials used so far for soundproofing screens and soundproofing and vibration damping panels. The tested composite materials will be able to be used in the production of structural elements for the walls of industrial halls and production lines (anti-spatter and sound-absorbing chambers).

6. References

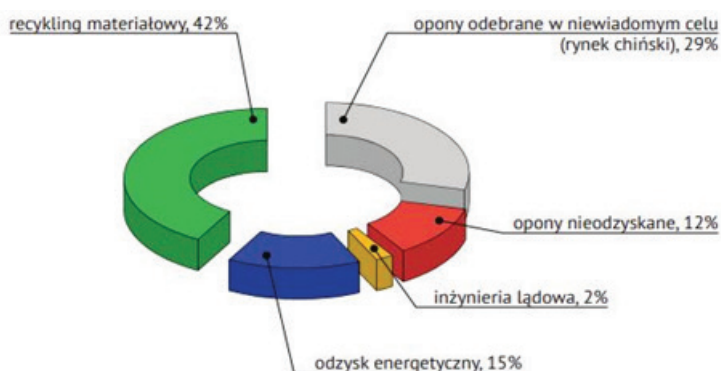
1. Chojnacka M.: Zastosowanie kopolimerów blokowych i recyklatów gumowych do modyfikacji asfaltów. Elastomery, Piastów 2012.
2. De S.K., Isayev A., Khait K.: Rubber recycling. CRC Press, 2005, <https://doi.org/10.1201/9780203499337>
3. Dierkes W.: Produkty recyklingu gumy - wartościowe surowce. Elastomery, Maastricht 1999.

4. Fazli A., Rodrigue D.: Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials*, MDPI, Basel 2020.
5. Grigoryeva O.P., Fainleib A.M., Tolstov A.L., Starostenko O.M., Lievana E., Karger-Kocsis J.: Thermoplastic elastomers based on recycled high-density polyethylene, ethylene-propylene-diene monomer rubber, and ground tire rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005.
6. Gronowicz J., Kubiak T.: *Recykling zużytych opon samochodowych*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań 2007.
7. Guo Y.C., Zhang J.H., Chen G., Chen G.M., Xie Z.H.: Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Constructing and Building Materials., Engineering, Materials Science*, 2013.
8. <https://www.plastech.pl/wiadomosci/Sposoby-zagospodarowania-odpadow-gumowych-17048?p=2>, access 20.06.2022.
9. Lipski R., Zaborowski J.: *Zagospodarowanie odpadowego ścieru gumowego z wyeksploatowanych opon samochodowych*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, Radom 2013.
10. Matkowski A., Balas A., Sielicki P., Janik H.: *Kompozyty poliuretanowo-gumowe wulkanizowane siarką*. Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.
11. Nehdi M., Khan A.: Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties and potential applications. *Cement, Concrete and Aggregates.,ASTM*, West Conshohocken, 2001.
12. Parasiewicz W., Pyskło L.: *Guma w samochodach - odzysk i recykling*. Problemy Eksploatacji, Radom 2005.
13. Parasiewicz W., Pyskło L., Magryta J.: *Recykling zużytych opon samochodowych*. Instytut Przemysłu Gumowego, Piastów 2005.
14. Shu X., Huang B.: Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Constructing and Building Materials, Engineering, Materials Science*, 2014.
15. Wu B., Zhou M.H.: *Recycling of waste tyre rubber into oil absorbent*. *Waste Management*, Elsevier, 2009.
16. Żuk D., Abramczyk N., Panasiuk K.: Analysis of strength parameters at tension of epoxy-glass composites with rubber recycle addition. *Journal of KONBiN*, Vol. 52, Iss. 1, 2022, DOI 10.2478/jok-2022-0009.

ANALIZA WPLYWU DODATKU RECYKLATU GUMOWEGO NA WLAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE KOMPOZYTÓW EPOKSYDOWO-SZKLANYCH

1. Wprowadzenie

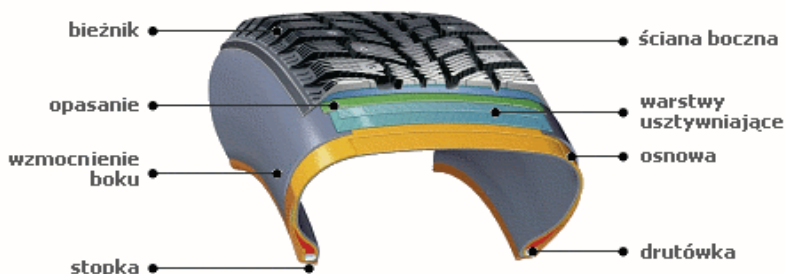
Rokrocznie na rynek polski wprowadzanych jest ok. 190 tys. ton nowych opon samochodowych, jednocześnie z rynku motoryzacyjnego wycofanych zostaje z eksploatacji 150 tys. ton opon zużytych, które muszą zostać zutylizowane, przetworzone i zagospodarowane. Zużyte opony nie ulegają degradacji w środowisku naturalnym nawet w okresie 100 lat i są zakwalifikowane do kategorii odpadów, które powinny być powtórnie wykorzystane w przemyśle [6]. Procentowy rozkład zagospodarowania zużytych opon na całym świecie przedstawia rys. 1. Z rozkładu tego jednoznacznie wynika, że największy udział w procesie zagospodarowania odpadów gumowych zajmuje recykling materiałowy – 42%, a obowiązujące w Polsce i w Unii Europejskiej uwarunkowania prawne wymuszają zwiększenie recyklingu odpadów gumowych, co prowadzi do intensyfikacji poszukiwania nowych dróg do zagospodarowania stale zwiększającej się ilości odpadów gumowych.



Rys. 1. Sposoby zagospodarowania zużytych opon w skali światowej [8]

Warto zauważyć, że w porównaniu z produktami z papieru, szkła, metali czy tworzyw sztucznych, recykling wyrobów gumowych jest procesem znacznie bardziej złożonym

i skomplikowanym pod względem technologicznym [2, 3]. Opona samochodowa oprócz gumy zawiera w swoim składzie zbrojenie stalowe oraz włókna, zaś w skład mieszanki gumowej oprócz kauczuku wchodzi szkodliwe dla środowiska składniki, tj. sadze, krzemionka, kaolin, kreda, litopon, plastyfikatory, środki przeciwstarzeniowe, substancje uniepalniające, zespół wulkanizujący (siarkowy lub nadtlenkowy). Schemat budowy opony samochodowej przedstawiono na rys. 2, procentowy skład opony samochodowej został przedstawiony w tabeli 1.



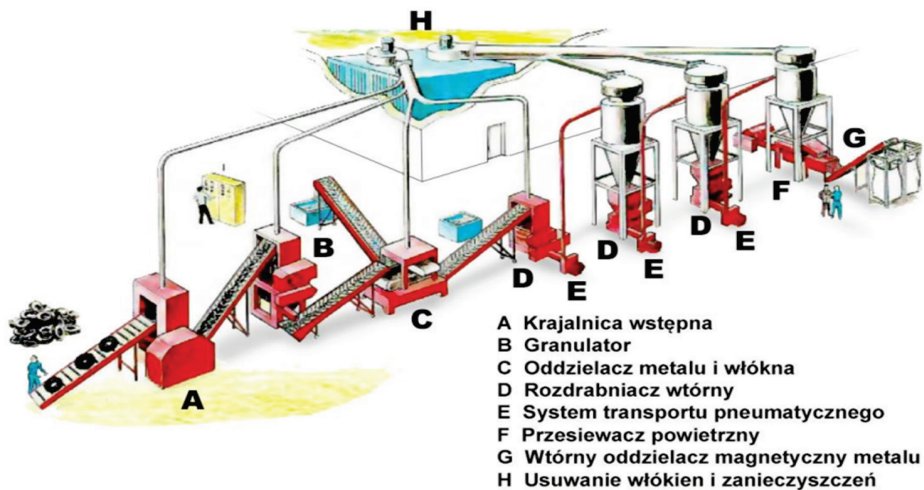
Rys. 2. Schemat budowy opony samochodowej [8]

Tabela 1

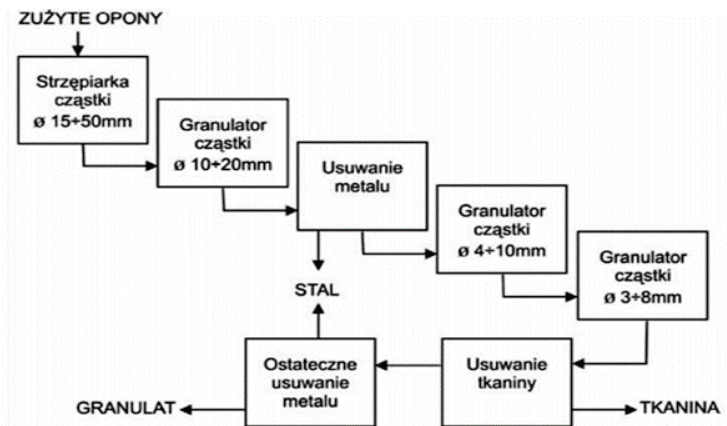
Procentowy skład opony samochodowej

Składnik	Zawartość [%]
Guma naturalna	14
Guma syntetyczna	27
Sadza	28
Zbrojenie stalowe	14-25
Tkanina, wypełniacz i pozostałe	16-17

Recykling materiałowy zużytych opon polega na ich rozdrobnieniu w celu uzyskania recyklatu [4, 12]. W wyniku rozdrabniania otrzymuje się mieszaninę gumy, włókna i stali. Następnym etapem produkcji recyklatu gumowego jest oddzielenie włókien i fragmentów zbrojenia stalowego oraz segregacja rozdrobnionej gumy na frakcje i ewentualne dodatkowe rozdrabnianie. Proces uzyskiwania recyklatu gumowego z opon samochodowych został przedstawiony na rys. 3. Schemat linii do rozdrabniania gumy w temperaturze otoczenia przedstawia rys. 4.



Rys. 3. Proces uzyskiwania recyklatu gumowego z opon samochodowych [6]



Rys. 4. Schemat procesu rozdrabniania opony samochodowej [13]

Z uwagi na konieczność zagospodarowania recyklatu gumowego poszukiwane są nowe rozwiązania pozwalające na jego powtórne wykorzystanie. Recykrat gumowy jest stosowany m.in. w ogrodnictwie jako podłoże czy też jako składnik materiałów budowlanych wykorzystywanych na plac zabaw [4]. Recykrat gumowy ma zastosowanie także przy budowie dróg, mostów, lotnisk, przejść podziemnych. Na sposób zagospodarowania recyklatu gumowego znaczący wpływ ma jego granulacja ziaren, procentowa zawartość w materiale kompozytowym oraz sposób rozmieszczenia. Rozmiar ziaren recyklatu uzyskanych w procesie jego rozdrabniania wpływa na możliwość dodatku recyklatu jako modyfikatora bądź składnika strukturalnego nowych materiałów kompozytowych.

W literaturze są opisane przykłady zastosowania recyklatu gumowego jako wypełniacza do nowych materiałów, jest stosowany np. do mieszanek asfaltowo-gumowych, poliuretanowych oraz do modyfikacji mieszanek gumowych [1, 9, 10]. Dodatek recyklatu gumowego zmienia także właściwości mieszanek z betonem portlandzkim [11, 14]. Recyklat gumowy dodawany jest do mieszanki betonowej wraz ze zbrojeniem stalowym [7]. Są także prowadzone badania nad wpływem dodatku gumy z recyklatu do elastomerów termoplastycznych [5]. Badane są również właściwości samego recyklatu gumowego jako czynnika pochłaniającego oleje [15].

Granulat gumowy pochodzący z recyklingu ma bardzo wysoką zdolność tłumienia dźwięku, powyżej 4 dB. Z uwagi na swoje właściwości tłumiące recyklat gumowy może wpłynąć na poprawę parametrów pracy oraz komfort użytkowników jednostek pływających, np. jachtów, łodzi poprzez zastosowanie materiałów kompozytowych z dodatkiem recyklatu do budowy grodzi i fragmentów poszycia pomieszczeń generujących hałasy (siłowni) oraz niwelowanie drgań urządzeń w nich zamontowanych (pompy, silniki).

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu dodatku recyklatu gumowego na właściwości kompozytów wykonanych na bazie maty szklanej o losowym kierunku włókien oraz żywicy epoksydowej EPO 652, wraz z utwardzaczem Z-1. Do badań zostały wytworzone dwa rodzaje materiałów badawczych z 5% dodatkiem recyklatu gumowego i o różnym sposobie dodatku recyklatu do kompozytu oraz jeden wariant bez dodatku recyklatu jako materiał porównawczy. Próbkę wykonaną z przedmiotowych materiałów zostały poddane statycznej próbie rozciągania w celu określenia zmian parametrów wytrzymałościowych spowodowanych dodatkiem i rozkładem recyklatu gumowego. W wyniku przeprowadzonych badań jednoznacznie stwierdzono zasadniczy wpływ dodatku recyklatu i sposobu jego rozłożenia na zmiany parametrów zarejestrowanych w trakcie statycznej próby rozciągania. Analiza otrzymanych podczas badań wstępnych wyników wykazała, że kompozyty epoksydowo-szklane na bazie żywicy EPO 652 z dodatkiem recyklatu gumowego w postaci trzech warstw przekładkowych pomiędzy warstwami maty szklanej mają lepsze parametry wytrzymałościowe niż kompozyt z losowym dodatkiem recyklatu do osnowy. Przeprowadzone analizy umożliwiają wybór optymalnego wariantu materiału w zależności od planowanego zastosowania.

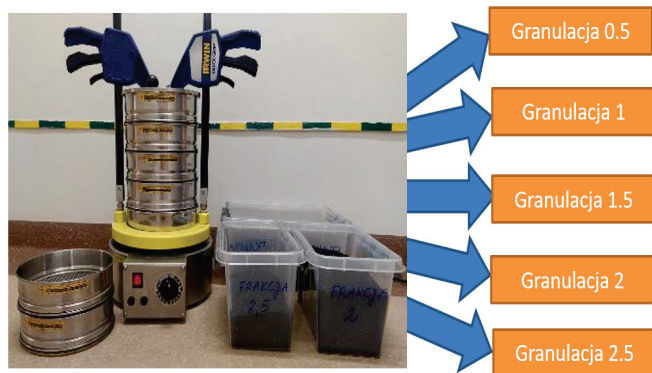
2. Materiały i metody badawcze

Do wytworzenia nowych kompozytów epoksydowo-szklanych z dodatkiem recyklatu gumowego wykorzystano recyklat gumowy o granulacji cząstek ϕ od 0 do 8 mm pozyskany w procesie przetwarzania przemysłowego. W badaniach wykorzystano frakcję recyklatu o wielkości ziaren $< 1,5$ mm uzyskaną przy użyciu laboratoryjnej wstrząsarki sitowej LAB-11 -200/UP firmy EKOLAB, przedstawionej na rys. 5.

Pierwszym etapem przygotowania materiałów badawczych było określenie technologii wytworzenia kompozytów z uwzględnieniem dodatku recyklatu gumowego.

Jednocześnie określono sposób mieszania recyklatu oraz rozmieszczenie warstw recyklatu w materiałach badawczych.

W materiale kompozytowym EPO 5 recyklat gumowy w ilości 5% wagi kompozytu został dodany do osnowy kompozytu. Zaletą tego rozwiązania był brak konieczności dodatkowych kalkulacji dotyczących zawartości i rozkładu recyklatu. Wadami tego rozwiązania są trudności technologiczne podczas zastosowania technologii przemysłowych, tj. infuzja próżniowa. Pojawiają się trudności w trakcie rozprowadzania i przesączania zbrojenia. Uzyskany materiał nie jest powtarzalny z uwagi na losowość uzyskanego rozkładu recyklatu gumowego w kompozycie.



Rys. 5. Pozyskiwanie określonych frakcji recyklatu gumowego z wykorzystaniem wstrząsarki sitowej EKOLAB, model LAB-11 -200/UP

W wariacie kompozytu EPO 5W recyklat gumowy w ilości stanowiącej 5% wagi kompozytu został umieszczony w postaci trzech warstw, pomiędzy 3 i 4, 6 i 7 oraz 9 i 10 warstwą maty szklanej w kompozycie. W przypadku zastosowania tego sposobu rozmieszczenia recyklatu w kompozycie uzyskano możliwość wdrożenia technologii wytwarzania w przemyśle oraz porównywalność wytwarzanych materiałów. Jednocześnie wadami tego rozwiązania są bardziej skomplikowane procesy produkcyjne z koniecznością wykorzystania linii produkcyjnych wykorzystywanych w procesach laminowania próżniowego i infuzji próżniowej.

Badane materiały kompozytowe zostały wytworzone metodą laminowania ręcznego z maty szklanej, recyklatu gumowego oraz żywicy epoksydowej wraz z utwardzaczem. Zbrojenie kompozytów stanowiła mata szklana o losowym kierunku włókien i gramaturze 350 g/m². Jako osnowę zastosowano żywicę epoksydową EPO 652, której parametry technologiczne i wytrzymałościowe przedstawia tab. 2. Do utwardzenia osnowy zastosowano utwardzacz Z-1 w proporcji 13 g utwardzacza na 100 g żywicy. Do formowania kompozytów wykorzystano aluminiową formę, wałki oraz pędzle do laminowania, a jako rozdzielacz dwie warstwy Honey Wax. W tab. 3 przedstawiono skład wytworzonych materiałów badawczych. Na rys. 6 pokazano wytwarzanie wariantów kompozytu EPO 5 oraz EPO 5W metodą laminowania ręcznego.

Tabela 2

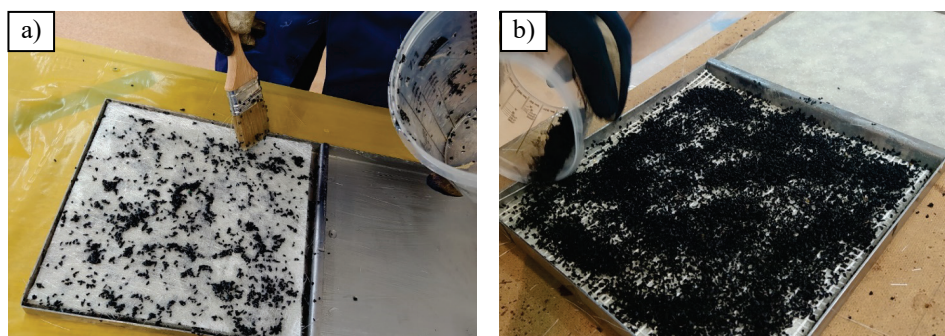
Charakterystyka żywicy epoksydowej EPO 652

Parametr	Jednostka	Wartość
Liczba epoksydowa	[Mol / 100g]	0,488-0,513
Gęstość w 25°C	[mPas]	500-900
Czas żelowania 100 g w 20°C	[min]	50-65
Czas utwardzania w 20°C	[dni]	7
Wytrzymałość na zginanie	[MPa]	66,6
Naprężenia zrywające	[MPa]	28,6
Moduł Younga	[MPa]	2450

Tabela 3

Skład materiałów kompozytowych wykorzystanych w badaniach [16]

Symbol materiału	Recyklat gumowy [%]	Mata szklana [%]	Zawartość żywicy [%]	Liczba warstw	Mata szklana [g]	Żywica [g]	Recyklat [g]
EPO 0	0	40	60	12	178,46	267,69	-
EPO 5	5	35	65	12	178,22	266,62	22,3
EPO 5 W	5	35	65	12	175,11	263,64	23,5



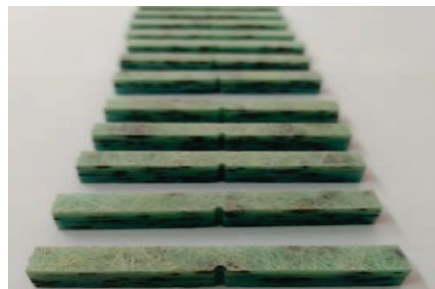
Rys. 6. Wytwarzanie kompozytów epoksydowo-szklanych: EPO 5, z dodatkiem recyklatu gumowego do osnowy (a); EPO 5W, z 3 warstwami recyklatu gumowego (b)

Do zakresu przeprowadzonych badań należały statyczna próba rozciągania oraz próba uduchności. Aby zniwelować wpływ temperatury przy cięciu na strukturę badanych materiałów, zastosowano metodę cięcia wodnego w celu uzyskania próbek do badań. Próbki

do badań statycznej próby rozciągania przygotowano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-4:2022-06. Do statycznej próby rozciągania wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową z napędem hydraulicznym Zwick Roell, z oprogramowaniem Test Expert II. Na rys. 7a pokazano próbki z materiału EPO 5 przygotowane do badania statycznej próby rozciągania. Próbki z karbem U, do badań udarności, wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 179-1:2010E. Badania udarności materiałów kompozytowych przeprowadzono na młocie wahadłowym typu Charpy'ego RKP450 – TestXpert II (rys. 7b).



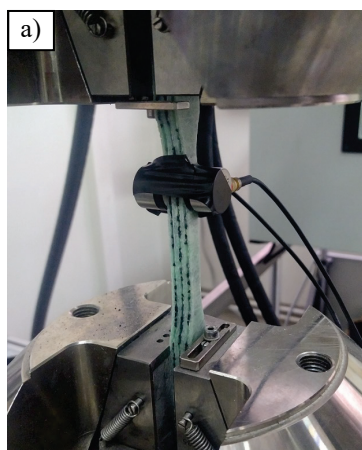
a)



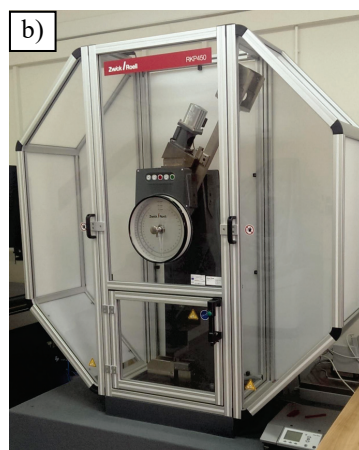
b)

Rys. 7. Próbkki przygotowane do statycznej próby rozciągania na maszynie Zwick Roell wykonane z materiału EPO 5 (a) oraz próbka z materiału EPO 5 przygotowana do badań udarności na młocie wahadłowym typu Charpy'ego RKP450 – TestXpert II (b)

Do statycznych prób rozciągania wykorzystano po 10 próbek kompozytowych z każdego wariantu materiału. Do badań udarności wykorzystano po 12 próbek z każdego materiału. Na rys. 7 pokazano badania statycznej próby rozciągania oraz udarności na materiałach kompozytowych.



a)



b)

Rys. 8. Widok próbki EPO 5W zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (a) oraz próba udarności z wykorzystaniem Młota Charpy'ego (b)

3. Wyniki badań

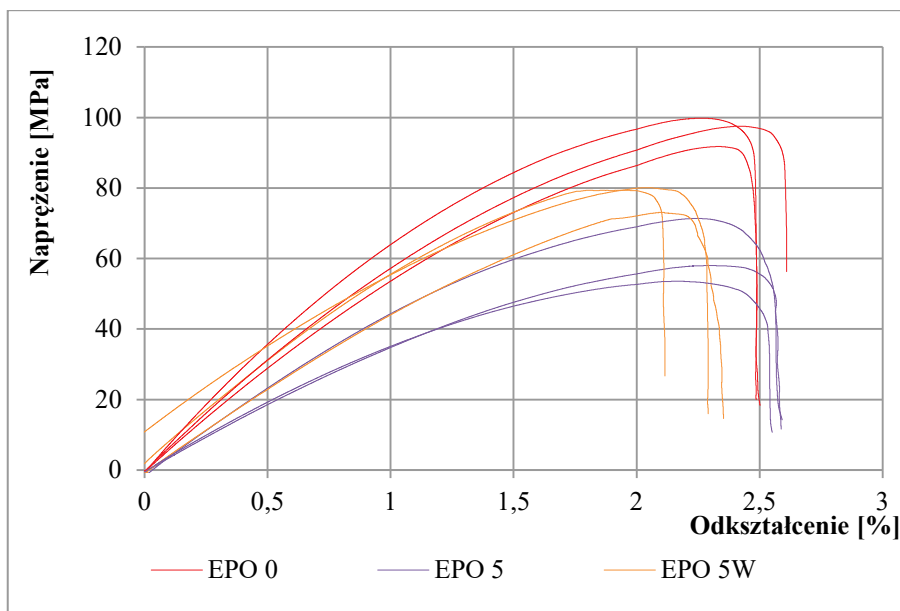
W wyniku przeprowadzonych na materiałach kompozytowych statycznych prób rozciągania otrzymano parametry wytrzymałościowe, tj. wartości wytrzymałości na rozciąganie σ_m , moduł Younga E oraz odkształcenie względne ε . Otrzymane wyniki zostały uśrednione dla każdego z trzech wariantów wykonanych materiałów kompozytowych. Zestawienie otrzymanych parametrów przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4

Parametry wytrzymałościowe materiałów kompozytowych epoksydowo-szklanych (średnia z 5 prób) [16]

Symbol materiału	σ_m [MPa]	E [%]	E [MPa]
EPO 0	91,77	2,34	6061
EPO 5W	79,39	1,82	5938
EPO 5	58,01	2,31	3928

Na rys. 9 przedstawiono po trzy wybrane krzywe rozciągania dla każdego wariantu badanego materiału uzyskane podczas statycznej próby rozciągania.



Rys. 9. Krzywe rozciągania dla badanych materiałów kompozytowych

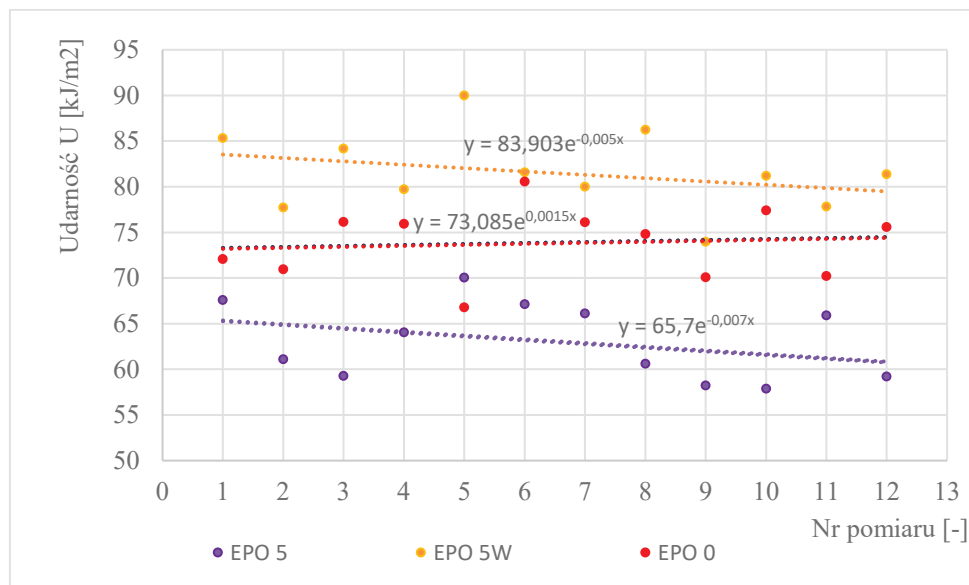
W tab. 5 przedstawione zostały podane zakresy wartości udarności U pomierzonych dla badanych materiałów kompozytowych oraz średnie wartości udarności uzyskane podczas przeprowadzonej na Młocie Charpy'ego próby udarności.

Na rys. 10 przedstawiono wykres ilustrujący wartości uzyskane podczas przeprowadzonej na badanych materiałach kompozytowych próby udarności z wykorzystaniem Młota Charpy'ego.

Tabela 5

Wartości udarności dla badanych materiałów kompozytowych

Wariant materiału	EPO 0	EPO 5	EPO 5W
Udarność U , średnia z 12 prób [J/m ²]	74	63	82



Rys. 10. Wykres wartości z próby udarności przeprowadzonej na materiałach

4. Analiza wyników badań

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że dodatek recyklatu gumowego do żywicy obniża parametry wytrzymałościowe kompozytu epoksydowo-szklanego, ale sposób rozmieszczenia recyklatu w materiale wpływa istotnie na wartości tych parametrów. Wytrzymałość na rozciąganie kompozytów z dodatkiem recyklatu zmniejszyła się

w porównaniu z czystym kompozytem EPO 0: o 13% w przypadku dodatku 5% recyklatu jako trzy warstw oraz o ok. 37% w przypadku dodatku 5% recyklatu do osnowy. Warto zauważyć wpływ dodatku recyklatu gumowego na sprężystość, a także sposób odkształcania badanych materiałów kompozytowych. Istotna jest nieznaczna zmiana wartości modułu Younga. Parametr ten dla wariantu EPO 5 zmalał o 35% w porównaniu z EPO 0, natomiast dla EPO 5W wartość modułu Younga zmalała tylko o 2%. Dla wariantu EPO 5 odkształcenie materiału wzrosło o 1,3% w porównaniu z materiałem bazowym, z kolei dla wariantu EPO 5W zwiększyło się o 22,2%. Na rys. 9 przedstawiono po trzy wybrane krzywe rozciągania dla każdego wariantu badanego materiału uzyskane podczas statycznej próby rozciągania.

W badaniach udarności najlepsze wartości tego parametru uzyskał kompozyt EPO 5W. Udarność tego materiału w porównaniu z kompozytem EPO 0 wzrosła o 10%. Dla porównania wariant EPO 5 wykazał o 15% mniejszą udarność od wariantu EPO 0.

Z przeprowadzonych badań jednoznacznie wynika, że w statycznej próbie rozciągania najlepsze parametry wytrzymałościowe w porównaniu z czystym kompozytem epoksydowo-szklanym miały próbki EPO 5W. Wartości te były nieznacznie niższe od wartości uzyskanych dla materiału kompozytowego bez dodatku recyklatu gumowego. W badaniach udarności również próbki EPO 5W wykazały się najwyższymi parametrami, przekraczającymi wartości otrzymane dla kompozytu bez dodatku recyklatu gumowego. Szczegółowa analiza wyników otrzymanych w statycznej próbie rozciągania badanych materiałów została przedstawiona we wcześniejszym opracowaniu [16].

5. Wnioski

W zależności od potrzeb i zastosowania przedstawione w artykule kompozyty epoksydowo-szklane z dodatkiem recyklatu gumowego mogą być projektowane i modyfikowane pod kątem wymaganych parametrów, a ich modelowanie można oprzeć na takich czynnikach jak: zawartość procentowa recyklatu, granulacja ziaren recyklatu i sposób jego rozmieszczenia w materiale, co potwierdziły przeprowadzone badania.

Analiza właściwości wytrzymałościowych wypadła korzystnie dla wariantu EPO 5W, w porównaniu z właściwościami czystego kompozytu EPO 0. Analizując wyniki otrzymane na etapie badań wytrzymałościowych, w dalszym etapie prac rozpoczęto badania ukierunkowane na określenie wpływu dodatku recyklatu gumowego na właściwości tłumiące, dźwiękochłonne i balistyczne. W tym celu prowadzone są laboratoryjne badania wibrodiagnostyczne na wzbudniku drgań oraz badania analizujące pochłanianie dźwiękową w komorach akustycznych, a także testy balistyczne.

Przedstawione w artykule kompozyty na bazie maty szklanej i żywicy epoksydowej z uwagą na dodatek recyklatu gumowego, który ma właściwości wygłuszające i wytłumiające, mogą stanowić alternatywę dla materiałów dotychczas stosowanych na ekrany dźwiękochłonne oraz panele wygłuszające i wytłumiające drgania. Badane materiały kompozytowe będą mogły znaleźć zastosowanie w produkcji elementów

konstrukcyjnych ścian hal przemysłowych i linii produkcyjnych (komory antyodpryskowe i dźwiękochłonne).

6. Literatura

1. Chojnacka M.: Zastosowanie kopolimerów blokowych i recyklatów gumowych do modyfikacji asfaltów. Elastomery, Piastów 2012.
2. De S.K., Isayev A., Khait K.: Rubber recycling. CRC Press, 2005, <https://doi.org/10.1201/9780203499337>
3. Dierkes W.: Produkty recyklingu gumy - wartościowe surowce. Elastomery, Maastricht 1999.
4. Fazli A., Rodrigue D.: Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. Materials, MDPI, Basel 2020.
5. Grigoryeva O.P., Fainleib A.M., Tolstov A.L., Starostenko O.M., Lievana E., Karger-Kocsis J.: Thermoplastic elastomers based on recycled high-density polyethylene, ethylene-propylene-diene monomer rubber, and ground tire rubber. Journal of Applied Polymer Science, 2005.
6. Gronowicz J., Kubiak T.: Recykling zużytych opon samochodowych. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań 2007.
7. Guo Y.C., Zhang J.H., Chen G., Chen G.M., Xie Z.H.: Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. Constructing and Building Materials., Engineering, Materials Science, 2013.
8. <https://www.plastech.pl/wiadomosci/Sposoby-zagospodarowania-odpadow-gumowych-17048?p=2>, access 20.06.2022.
9. Lipski R., Zaborowski J.: Zagospodarowanie odpadowego ścieru gumowego z wyeksploatowanych opon samochodowych. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, Radom 2013.
10. Matkowski A., Balas A., Sielicki P., Janik H.: Kompozyty poliuretanowo-gumowe wulkanizowane siarką. Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.
11. Nehdi M., Khan A.: Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties and potential applications. Cement, Concrete and Aggregates. ASTM, West Conshohocken, 2001.
12. Parasiewicz W., Pyskło L.: Guma w samochodach - odzysk i recykling. Problemy Eksploatacji, Radom 2005.
13. Parasiewicz W., Pyskło L., Magryta J.: Recykling zużytych opon samochodowych. Instytut Przemysłu Gumowego, Piastów 2005.
14. Shu X., Huang B.: Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. Constructing and Building Materials, Engineering, Materials Science, 2014.

15. Wu B., Zhou M.H.: Recycling of waste tyre rubber into oil absorbent. Waste Management, Elsevier, 2009.
16. Żuk D., Abramczyk N., Panasiuk K.: Analysis of strength parameters at tension of epoxy-glass composites with rubber recyclate addition. Journal of KONBiN, Vol. 52, Iss. 1, 2022, DOI 10.2478/jok-2022-0009.