

Daria ŻUK, Norbert ABRAMCZYK, Katarzyna PANASIUK
Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

ANALYSIS OF STRENGTH PARAMETERS AT TENSION OF EPOXY-GLASS COMPOSITES WITH RUBBER RECYCLATE ADDITION

Analiza parametrów wytrzymałościowych przy rozciąganiu kompozytów epoksydowo-szklanych z dodatkiem recyklatu gumowego

Abstract: *The aim of the research was to analyze the strength parameters of epoxy-glass sandwich composites with the addition of rubber recyclate. Material samples were subjected to a static tensile test performed on a universal testing machine in accordance with the current standard for fiber-reinforced composite materials. The test results showed that the addition of rubber recyclate increases the plastic parameters of the composite, which allows considering the use of the tested material for structures loaded with the vibration and noise scale. The use of rubber recyclate to modify the strength parameters of the composite allows to reduce the amount of rubber waste and ensures the durability of the new material.*

Keywords: reliability, recycling, modern composite materials, static tensile test

Streszczenie: *Celem badań była analiza parametrów wytrzymałościowych kompozytów przekładkowych epoksydowo-szklanych z dodatkiem recyklatu gumowego. Próbki materiałów poddano statycznej próbie rozciągania przeprowadzonej na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej zgodnie z aktualną normą dla materiałów kompozytowych zbrojonych włóknami. Wyniki badań wykazały, iż dodatek recyklatu gumowego zwiększa parametry plastyczne kompozytu, co pozwala na rozważenie zastosowania badanego materiału na konstrukcje obciążone znacznymi drganiami i hałasem. Zastosowanie recyklatu gumowego w celu modyfikacji parametrów wytrzymałościowych kompozytu umożliwia zmniejszenie ilości odpadów gumowych i zapewnia niezawodność wytrzymałościową nowego materiału.*

Słowa kluczowe: niezawodność, recykling, nowoczesne materiały kompozytowe, statyczna próba rozciągania

1. Introduction

The constantly progressing development of the automotive industry contributes to the constant increase in the amount of rubber waste. It is estimated that car tires are waste generated annually in the amount of over 3.6 million tons in the European Union alone [4, 13]. In Poland, 190,000 vehicles are withdrawn from use every year. tons of tires [5, 14]. It is worth noting that compared to products made of paper, glass, metals or plastics, the recycling of rubber products is a much more difficult process. Apart from rubber, the rubber mixture includes many other components that are harmful to the environment, including carbon black, silica, kaolin, chalk, or flame retardants [3, 21]. From the beginning of the 20th century, scientists have been dealing with the issues of rubber waste [13, 16]. In particular, topics related to the disposal of tires through reuse of recyclate, regeneration, retreading, combustion, pyrolysis and biodegradation [18, 19].

Composites are materials with a wide spectrum of modification properties, therefore they are one of the most promising and constantly improved materials in many fields [9, 10]. They have high mechanical and strength parameters which go hand in hand with a low specific weight and often with a low production cost [11]. Such properties of composites make them the leading materials used in aviation, automotive and sports equipment structures [12].

The possibilities of modifying composite materials are very large. New solutions are sought, in which the emphasis is on obtaining a material with different properties while reducing the unit cost of production, as well as using the environmental aspect through the use of additives of various types of recyclates [9-11]. In the work [6], rubber recyclate was used as a component of a new composite based on rice fibers, produced similarly to wood-based materials. As a result, the water resistance, water absorption and swelling of composite boards were better than in the case of ordinary particle boards. The research [1, 18] investigated the possibilities of using recycled rubber granules in cement composites as a substitute for natural aggregates. In these studies, the methods of processing, modification and compositions of concrete-rubber composites were analyzed in order to optimize the usability of the new material.

The paper [22] analyzes the mechanical properties of a composite based on rubber recyclate and rubber waste of different granulation. The composite created in this way had satisfactory functional properties and provided an economic and ecological method of recycling tires. Research is also conducted to analyze the effect of the addition of various types of recyclates to composites based on glass mats [9, 10, 11], or to composites based on elastomers [18]. These studies show that the use of recycled materials allows to reduce the amount of harmful waste while obtaining materials with good performance parameters.

In this study, the authors attempted to examine the strength parameters of the material with the addition of rubber waste recovered from car tires. These tests were aimed at checking the parameters of the new material produced in accordance with the pro-ecological direction of the development of composite technology. The produced composite material had parameters slightly lower than the base material, allowing for its safe operation and the

possibility of further modification. The conducted tests are preliminary tests aimed at developing a technology and a composite material that could be used in structures where vibration resistance and high fatigue strength are particularly required.

2. Research materials and methodology

Two plates, made of an epoxy-glass composite with 5% rubber recyclate, were prepared for the tests. For comparison purposes, a composite plate without the addition of recyclate were prepared. The materials were produced using the manual lamination technology. During the production of one of the versions of the composite material, the addition of 5% recyclate to the epoxy resin constituting the matrix of the composite was used, and in the second variant, the rubber recyclate constituted three sandwich layers in the composite. The recyclate used had a granulation <1 mm. The rubber granulate used as an additive was obtained from car tires. The chemical composition of the recyclate used and its granulation are presented in table 1.

Table 1

Material composition of rubber recyclate [21]

Ingredient	Content [%]
Natural gum	14
Syntetic gum	27
Soot	28
Steel reinforcement	14-25
Fabric, filler and others	16-17

The plates of the tested composite materials were made with the use of metal molds, glass mat, rubber recyclate and epoxy resin. EPO 652 epoxy resin with technological and strength parameters presented in table 2 was used for the production of the composite. EPO 652 resin is a universal epoxy composition used for glass fiber laminates. The reinforcement was a glass mat with a random fiber direction, with a weight of 350 g/m².

Table 2

Characteristics of epoxy resin [7]

Parameter	Unit	Valu
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
Curing time at 20° C	[dni]	7
Flexural strength	[MPa]	66,6
Breaking stresses	[MPa]	28,6
Young's modulus	[MPa]	2450

In the process of producing composite panels, a research material was obtained with a specific number of glass mat layers and the assumed percentage of resin and rubber recycle. The proportions and weight relationships in individual versions of the manufactured materials are presented in table 3.

Table 3

Composition of composite materials used in the research

Symbol materiału	Recyklat gumowy [%]	Mata szklana [%]	Zawartość żywicy [%]	Ilość 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

The composites were produced by the sandwich method. In the case of the addition of rubber recycle, two variants of its distribution in the composite were used. In one of the variants, referred to as EPO 5, the recycle was randomly distributed in the composite as it was an additive to the resin, and in the other variant, called EPO 5W, the recycle layer was a sandwich layer (fig. 1). From the produced composite panels in selected variants, samples were obtained by the method of water cutting (fig. 2), on which a static tensile test was carried out. The geometry of the samples was made in accordance with the PN-EN ISO 527-4_2000P DIN standard regarding the static tensile test for composite materials.



Fig. 1. Composite material with the addition of recycle a) as a sandwich layer b) as an addition to the composite matrix

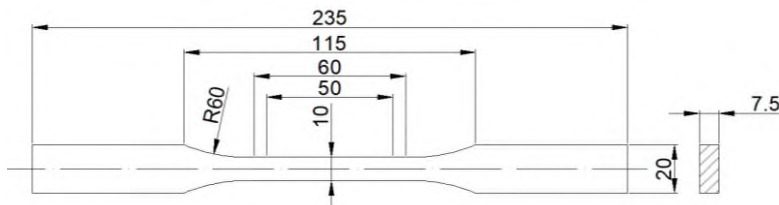


Fig. 2. Shape and dimensions of samples for static tensile tests [15]

The static tensile test was carried out on a series of 5 samples from each of the three variants of the tested material. The test was performed on the MPMD P10B type universal testing machine Zwick Roell, with a hydraulic drive, type MPMD P10B (fig. 3). TestXpert II version 3.61 was used for the test. The test results for the samples were recorded using Zwick & Roell-TestXpert II version 3.61. The test was carried out in accordance with the requirements of EN ISO 527-1.

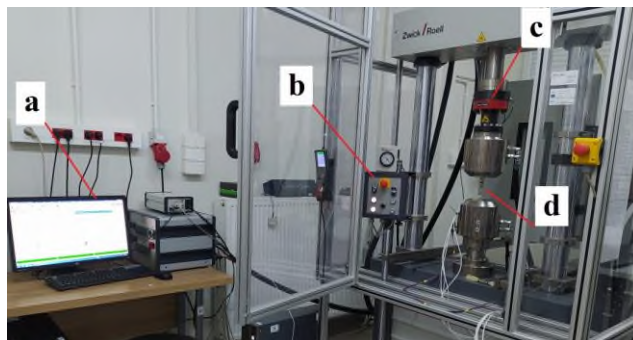


Fig. 3. Zwick & Roell static tensile test stand: a) computer workstation for operating the machine, b) manual control panel, c) hydraulic traverse, d) sample mounted in the holders

With the use of the Axiovert 25 optical microscope, the structure of the tested composite materials was analyzed in terms of adhesion between the layers, the number of pores, i.e. aspects that directly affect their strength. The samples were prepared with the use of papers of various gradations as well as polishing pastes.

3. Test results and analysis

As a result of the research, the strength parameters of the tested materials were obtained, including the tensile strength σ_m , Young's modulus E and relative deformation ε . A summary of the parameters obtained is presented in table 3.

Table 3

Strength parameters of the tested epoxy-glass composite materials (average of 5 tests)

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

The obtained results were averaged for each of the three variants of the composite materials made. Figure 4 shows the tensile curves for sample samples.

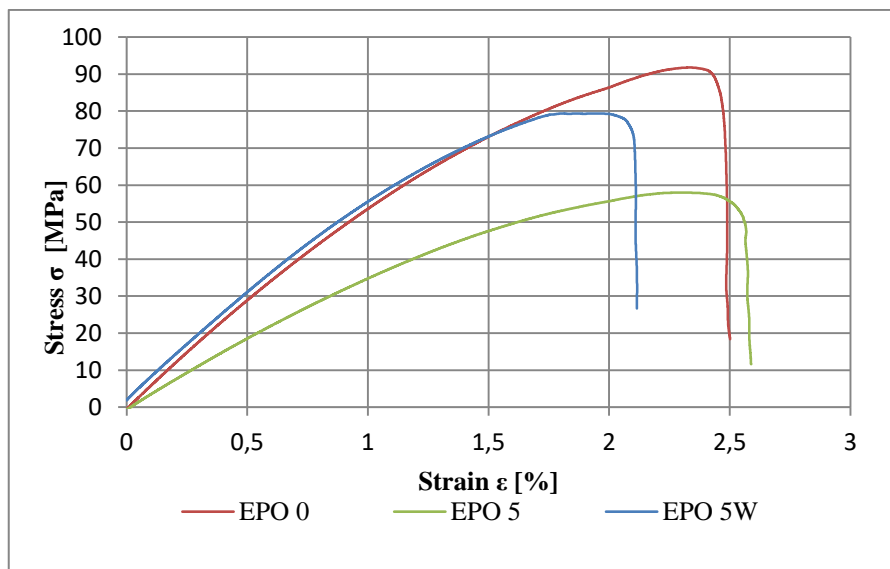


Fig. 4. Tensile curves for the tested epoxy-glass composites

As a result of the analysis of the obtained results, it can be concluded that the epoxy-glass composite with the addition of rubber recyclate as a sandwich layer in the composite has better strength parameters than the composite with the addition of recyclate to the resin. This type of material has slightly lower tensile strength values than a pure epoxy glass composite. The value of the tensile strength σ_m in the sandwich variant is lower by about 13% compared to the material without the addition of recyclate. When recyclate is added to the resin, the tensile strength value drops by 36%. Young's modulus E for the base material was 6061 MPa, for the EPO 5W composite variant, the value of this modulus decreased by 2%, and for the EPO 5L variant, the decrease was of the order of 35%.

However, the plasticity of the material with the addition of recyclate to the resin does not decrease significantly. It is worth noting that the relative deformation value ϵ of the composite with the addition of rubber recyclate is more favorable in the case of adding rubber recyclate to the material matrix. In this case, the decrease in the relative elongation value compared to the pure composite was only 1.1%, while the decrease in the deformation value was 22% for the variant of the composite with the addition of rubber recyclate as a spacer layer.

The structures of composite materials were observed on the Axiovert 25 optical microscope, depending on the method of producing composites. Figure 5 shows the structures of composite materials with a 5% content of rubber recyclate (EPO 5W) layered in the composite.

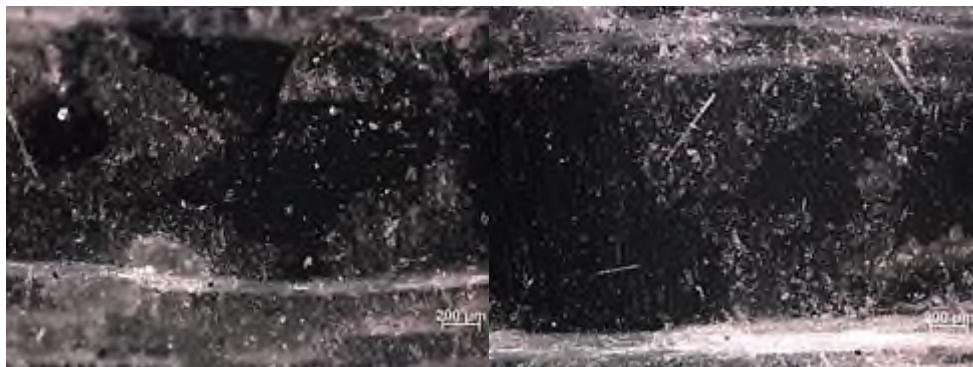


Fig. 5. Structure of composite materials with 5% content of rubber recyclate (EPO 5W) layered in the composite, magnification 50x

When analyzing the structure of composites with a 5% content of rubber recyclate arranged in layers, its relatively uniform distribution in the composite layer is visible. You can see larger and smaller recyclate particles. Single air pores and micropores are noticeable, however, they do not occur directly at the reinforcement-matrix boundary, but are caused by the presence of the recyclate itself. The adhesion between the layers has a direct impact on the strength of this composite, which is also confirmed by the results obtained in the tensile test.

Figure 6 shows the structures of composite materials with a 5% content of recyclate (EPO 5) added to the matrix.

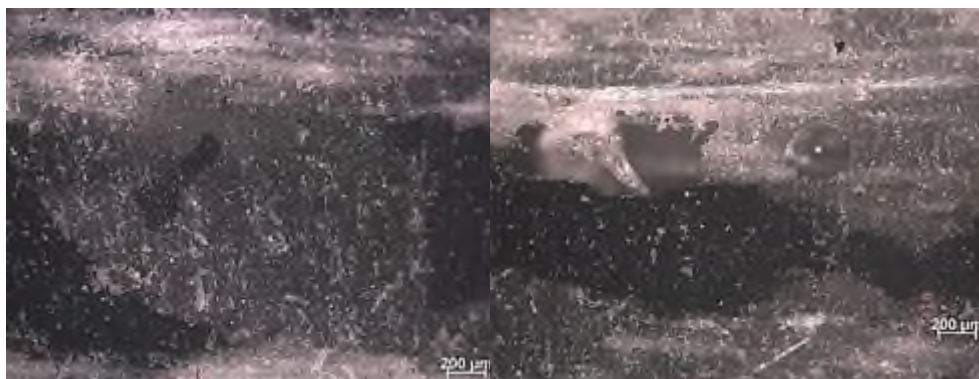


Fig. 6. Structure of composite materials with 5% content of rubber recyclate (EPO 5W) added to the matrix, magnification 50x

Based on the observation of the structures of composites with a 5% content of recyclate added to the matrix, a heterogeneous distribution of the recyclate is noticeable, which results directly from the production technology used. Air pores are visible at the reinforcement itself, and at the reinforcement-matrix boundary, which are caused by the presence of

recyclate particles in these places. Air pores and their number and size, which are a natural phenomenon in hand lamination technology, have a direct impact on durability. The addition of rubber recyclate directly to the matrix disturbs the adhesion between the layers, which makes this composite less durable than the recyclate placed in layers, as shown by tests carried out in a static tensile test.

4. Conclusions

Recycling of waste is an important factor in the development of technology for the production of next-generation materials. Particularly large possibilities of its application appear in composite materials, which include epoxy-glass composites. The possibility of using rubber recyclate, which is a waste generated annually in an increasing amount around the world, undoubtedly has a positive impact on the environment. The use of rubber waste, apart from the environmental aspect, is also important for the development of the market of composite materials. The use of recyclate allows for obtaining material with new, beneficial properties ensuring reliability and safety of work and maintenance of structures made of it. The analysis of the results obtained from the research presented in the article allows to conclude that the addition of recyclate as a spacer layer to the epoxy glass composite slightly reduces its strength parameters, but this material has as good usability as pure epoxy glass composites. In addition, it is worth paying attention to the fact that the addition of rubber recyclate increases the plastic parameters of the composite, which affects the possibility of using this type of materials for structures that require reducing vibrations or damping harmful sounds. It is worth considering further research of the analyzed materials in order to potentially use them in structures ensuring reliable and safe operation of machines generating large-scale vibrations and noise. This direction of research is the priority of further scientific work of the authors of this work.

5. References

1. Amin H., Gamal A., Khatib Z.: Scope of reusing waste shredded tires in concrete and cementitious composite materials: A review. *Journal of Building Engineering*, Vol. 35, 2021.
2. Dębska B.: Materiały budowlane produkowane z wykorzystaniem odpadów, *Izolacje*, nr 5, 2010.
3. Gronowicz K.T.: Recykling zużytych opon samochodowych. *Problemy eksploatacji*, pp. 5-18, 2007.
4. <http://rynekinwestycji.pl/recykling-tworzyw-sztucznych>, [access: 20 01 2022].
5. <https://www.plastech.pl/wiadomosci/Sposoby-zagospodarowania-odpadow-gumowych-17048>, [access: 02.01 2022].

6. Han-Seung Y., Young-Kyu L., Hyun-Joong K., Chun-Won K.: Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresource Technology*, Vol. 95, Iss. 1, October 2004.
7. <https://agbet.eu/zywice/produkt/zywica-epoksydowa-odlewnicza-epidian-652-ida-2>, [access: 10.11.2021].
8. Jakóbiec J.: Recykling energetyczny zużytych opon, *Autobusy*, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe, pp. 205-211, 2011.
9. Kyzioł L., Panasiuk K., Barcikowski M., Hajdukiewicz G.: The influence of manufacturing technology on the properties of layered composites with polyester-glass recyclate additive, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 36 (Iss. 1), s. 18-30, 2020.
10. Kyzioł L., Panasiuk K., Hajdukiewicz G.: The influence of granulation and content of polyester- glass waste on properties of composites. *Journal of KONES*, Vol. 25, No. 4, 2018.
11. Panasiuk K., Hajdukiewicz G.: Production of composites with added waste polyester-glass with their initial mechanical properties, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, nr 52, 2017.
12. Panasiuk K., Hajdukiewicz G.: Influence of the content of a glass-polyester recycled additive on the properties of layered composites in dynamic tests, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, tom 4, nr 56 (128), 2018.
13. Parasiewicz W.: Utylizacja opon - legislacja, technologia, ekonomia. Materiały XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-technicznej Elastomery 2009, *Nowoczesne Materiały i Technologie*, Warszawa 18-20.11.2009.
14. Parasiewicz W., Pyskło L., Magryta J. : Recykling zużytych opon samochodowych, Instytut Przemysłu Gumowego „STOMIL”, Piastów 2005.
15. PN-EN ISO 527-4_2000P, Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami.
16. Rosik-Dulewska C.: Aktualny stan gospodarki odpadami i perspektywy zmian, *Polska Inżynieria Środowiska Pięć Lat Po Wstąpieniu Do Unii Europejskiej*, tom 3, Lublin, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska, 2009, pp. 93-102.
17. Scheirs J.: Rubber tyre recycling. In: *Polymer Recycling*, Wiley Series in Polymer Science, New York, John Wiley and Sons, 1998.
18. Shu Ling Zhang, Zhen Xiang Xin, Zhen Xiu Zhang, Jin Kuk Kim: Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. *Waste Management*, Vol. 29, Iss. 5, 2009.
19. Sienkiewicz M., Kucińska-Lipka J., Janik H., Balas A.: Mikrostruktura kompozytów poliuretanowo-gumowych, otrzymanywanych in situ z elastomerów uretanowych i recyklatów gumowych, 2009.
20. Sławski S., Woźniak A., Bazan P., Mrówka M.: The Mechanical and Tribological Properties of Epoxy-Based Composites Filled with Manganese-Containing Waste. *Materials* 2022, 15, 1579. <https://doi.org/10.3390/ma15041579>.

21. Sprawozdanie z realizacji Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2019, za okres od dnia 1 stycznia 2016 r. do dnia 31 grudnia 2018 r., Warszawa, 2019.
22. Svoboda J., Dvorský T., Václavík V., Charvát J., Máčalová K., Heviánková S., Janurová E.: Sound-Absorbing and Thermal-Insulating Properties of Cement Composite Based on Recycled Rubber from Waste Tires. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2725. <https://doi.org/10.3390/app11062725>.
23. White J.R., De S. K.: *Poradnik Technologia Gumy*, Instytut Przemysłu Gumowego, Piastów 2003.
24. Wielgosinski G.: Przegląd technologii termicznego przekształcania odpadów. *Nowa Energia*, nr 1, 2011.
25. Zhang X.-X., Lu C.-H. and Liang M.: Preparation of rubber composites from ground tire rubber reinforced with waste-tire fiber through mechanical milling. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 103, 2007.

ANALIZA PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH PRZY ROZCIĄGANIU KOMPOZYTÓW EPOKSYDOWO-SZKLANYCH Z DODATKIEM RECYKLATU GUMOWEGO

1. Wstęp

Nieustannie postępujący rozwój przemysłu motoryzacyjnego wpływa na stałe zwiększanie się ilości odpadów gumowych. Szacuje się, że opony samochodowe są odpadem generowanym rokrocznie w liczbie ponad 3,6 mln ton w samej Uni Europejskiej [4, 13]. W Polsce co roku wycofywane jest z eksploatacji 190 tys. ton opon [5, 14]. Warto zauważyć, iż w porównaniu z produktami z papieru, szkła, metali czy tworzyw sztucznych, recykling wyrobów gumowych jest procesem o wiele trudniejszym. W skład mieszanki gumowej oprócz kauczuku wchodzi wiele innych szkodliwych dla środowiska składników m.in. sadze, krzemionka, kaolin, kreda, czy też substancje uniepalniające [3, 21]. Od początku XX w. naukowcy zajmują się problematyką odpadów gumowych [13, 16]. Szczególnie rozważane są tematy dotyczące utylizacji opon poprzez ponowne wykorzystanie recyklatu, regenerację, bieżnikowanie, spalanie, pirolizę oraz biodegradację [18, 19].

Kompozyty są materiałami o szerokim spektrum modyfikacji właściwości, dlatego też są jednymi z najbardziej rokujących i stale ulepszanych materiałów w wielu dziedzinach [9, 10]. Mają one wysokie parametry mechaniczne i wytrzymałościowe, idące w parze z małym ciężarem właściwym oraz często z niskim kosztem wytwarzania [11]. Takie właściwości kompozytów sprawiają, że są one wiodącymi materiałami stosowanymi w konstrukcjach lotniczych, samochodowych czy też w sprzęcie sportowym [12].

Możliwości modyfikacji materiałów kompozytowych są bardzo duże. Poszukiwane są nowe rozwiązania, w których nacisk kładziony jest na uzyskanie materiału o innych właściwościach przy jednoczesnym obniżeniu kosztu jednostkowego produkcji, a także wykorzystaniu aspektu środowiskowego poprzez zastosowanie dodatków różnego rodzaju recyklatów [9–11]. W pracy [6] zastosowano recyklat gumowy jako składnik nowego kompozytu na bazie włókien ryżowych, wytworzonego podobnie jak materiały drewnopochodne. W rezultacie wodoodporność, nasiąkliwość i pęcznienie płyt kompozytowych były lepsze niż w przypadku zwykłych płyt wiórowych. W [1, 18] zbadano możliwości wykorzystania recyklowanego granulatu gumowego w kompozytach cementowych jako zamiennika kruszywa naturalnych. W badaniach tych przeanalizowano sposoby obróbki, modyfikacji i składów kompozytów betonowo-gumowych w celu zoptymalizowania użyteczności nowego materiału.

W pracy [22] dokonano analizy właściwości mechanicznych kompozytu na bazie recyklatu gumowego i odpadów gumowych o różnej granulacji. Powstały w ten sposób kompozyt miał zadowalające własności użytkowe oraz zapewnił ekonomiczną i ekologiczną metodę recyklingu opon. Prowadzone są także badania wpływu dodatku recyklatów różnego rodzaju do kompozytów na bazie maty szklanej [9, 10, 11] czy też do kompozytów na bazie elastomerów [18]. Badania te wykazują, że zastosowanie materiałów pochodzących z recyklingu pozwala na zmniejszenie ilości szkodliwych odpadów przy jednoczesnym uzyskaniu materiałów o dobrych parametrach użytkowych.

W niniejszej pracy autorzy podjęli próbę zbadania parametrów wytrzymałościowych materiału z dodatkiem odzyskanego z opon samochodowych odpadu gumowego. Badania te miały na celu sprawdzenie parametrów nowego materiału wytworzonego zgodnie z proekologicznym kierunkiem rozwoju technologii kompozytowej. Wytworzony materiał kompozytowy uzyskał parametry nieznacznie niższe od materiału bazowego, pozwalające na jego bezpieczną eksploatację i możliwość dalszej modyfikacji. Przeprowadzone badania są badanymi wstępnymi, mającymi na celu opracowanie technologii oraz materiału kompozytowego, który mógłby znaleźć zastosowanie w konstrukcjach, w których szczególnie wymagana jest odporność na drgania, a także duża wytrzymałość zmęczeniowa.

2. Materiały i metodyka badań

Do badań przygotowano dwie płyty z wytworzonego w warunkach laboratoryjnych kompozytu epoksydowo-szklanego o zawartości 5% recyklatu gumowego oraz w celach porównawczych płytę z kompozytu bez dodatku recyklatu. Materiały wytwarzano technologią laminowania ręcznego. Podczas wytwarzania jednej z wersji materiału kompozytowego zastosowano dodatek 5% recyklatu do żywicy epoksydowej stanowiącej osnowę kompozytu, zaś w drugim wariantcie recyklat gumowy stanowił trzy warstwy przekładkowe w kompozycie. Zastosowano recyklat o granulacji < 1 mm. Wykorzystany jako dodatek granulatu gumowy pochodził z opon samochodowych. Skład chemiczny zastosowanego recyklatu i jego granulacja zostały przedstawiony w tab. 1.

Tabela 1

Skład materiałowy recyklatu gumowego [21]

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

Płyty z badanych materiałów kompozytowych wykonano z wykorzystaniem form metalowych, maty szklanej, recyklatu gumowego oraz żywicy epoksydowej. Do wytwarzania kompozytu wykorzystano żywicę epoksydową EPO 652 o parametrach technologicznych i wytrzymałościowych przedstawionych w tab. 2. Żywica EPO 652 jest uniwersalną kompozycją epoksydową stosowaną do laminatów z włókna szklanego. Zbrojenie stanowiła mata szklana o przypadkowym kierunku włókien, o gramaturze 350 g/m².

Tabela 2

Charakterystyka żywicy epoksydowej EPO 652 [7]

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

W procesie wytwarzania płyt kompozytowych uzyskano materiał badawczy o określonej liczbie warstw maty szklanej i założonym składzie procentowym żywicy oraz recyklatu gumowego. Proporcje i zależności wagowe w poszczególnych wersjach wytworzonych materiałów zostały przedstawione w tab. 3.

Tabela 3

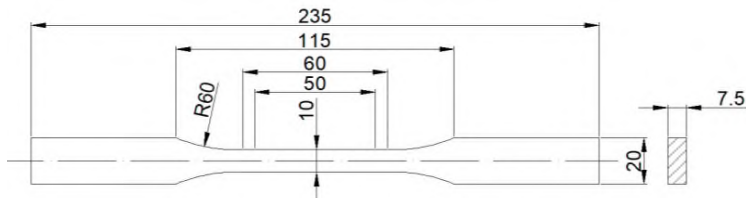
Skład materiałów kompozytowych wykorzystanych w badaniach

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

Kompozyty były wytwarzane metodą przekładkową. W przypadku dodatku recyklatu gumowego zastosowano dwa warianty jego rozmieszczenia w kompozycie. W jednym z wariantów określonym jako EPO 5 recyklat był rozmieszczony losowo w kompozycie, gdyż stanowił dodatek do żywicy, w drugim zaś wariantcie nazwanym EPO 5W warstwa recyklatu stanowiła warstwę przekładkową (rys. 1). Z wytworzonych płyt kompozytowych w wybranych wariantach uzyskano metodą cięcia wodnego próbki (rys. 2), na których została przeprowadzona statyczna próba rozciągania. Geometria próbek została wykonana zgodnie z normą PN-EN ISO 527-4_2000P DIN dotyczącą statycznej próby rozciągania dla materiałów kompozytowych.

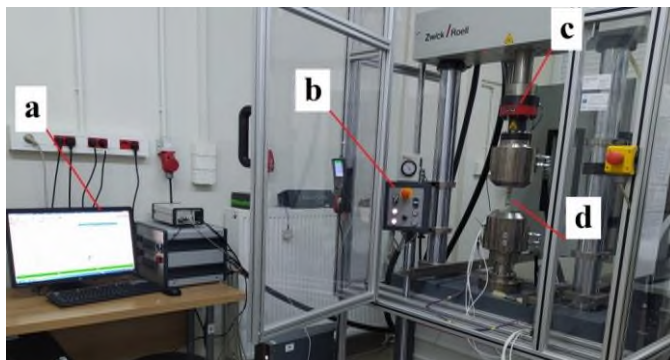


Rys. 1. Materiał kompozytowy z dodatkiem recyklatu: a) jako warstwy przekładkowej, b) jako dodatku do osnowy kompozytu



Rys. 2. Kształt i wymiary próbek do badań statycznej próby rozciągania [15]

Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona na serii pięciu próbek z każdego z trzech wariantów badanego materiału. Badanie wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell typu MPMD P10B, z napędem hydraulicznym typ MPMD P10B (rys. 3). Do próby wykorzystano oprogramowanie TestXpert II w wersji 3.61. Wyniki badań dla próbek zostały zarejestrowane przy użyciu oprogramowania Zwick & Roell-TestXpert II wersja 3.61. Próbę przeprowadzono zgodnie z wymogami normy EN ISO 527-1.



Rys. 3. Stanowisko do badań statycznej próby rozciągania Zwick & Roell: a) stanowisko komputerowe do obsługi maszyny, b) manualny panel sterujący, c) trawersa hydrauliczna, d) próbka zamocowana w uchwytach

Z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Axiovert 25 przeprowadzono analizę struktury badanych materiałów kompozytowych pod kątem adhezji pomiędzy warstwami, ilości porów, czyli aspektów mających bezpośrednio wpływ na ich wytrzymałość. Do przygotowania próbek wykorzystano papiery ściernie o różnej gradacji i pasty polerskie.

3. Wyniki badań i analiza

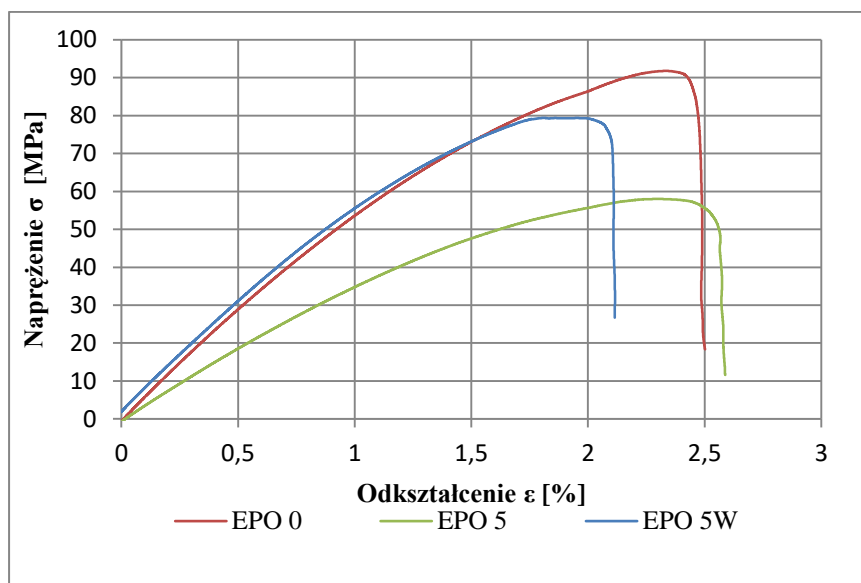
W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano parametry wytrzymałościowe badanych materiałów, do których należały wartości wytrzymałości na rozciąganie σ_m , moduł Younga E oraz odkształcenie względne ε . Zestawienie otrzymanych parametrów przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4

Parametry wytrzymałościowe badanych materiałów kompozytowych epoksydowo szklanych (średnia z pięciu prób)

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

Otrzymane wyniki zostały uśrednione dla każdego z trzech wariantów wykonanych materiałów kompozytowych. Na rys. 4 przedstawiono krzywe rozciągania dla przykładowych próbek.

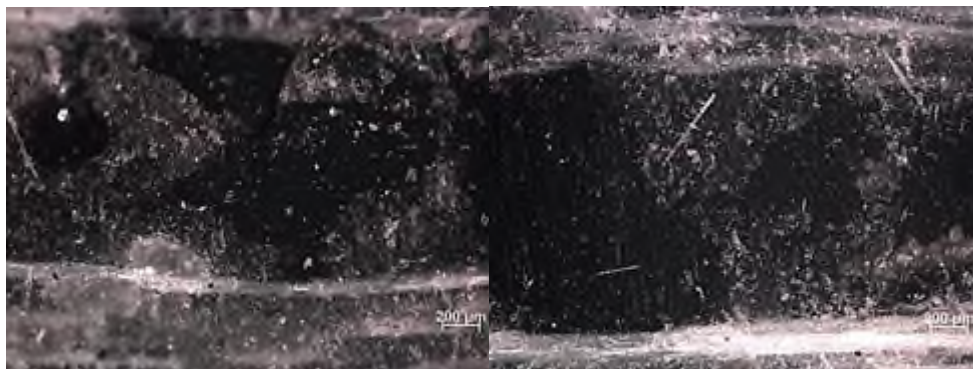


Rys. 4. Krzywe rozciągania dla badanych kompozytów epoksydowo-szklanych

W wyniku analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że kompozyt epoksydowo-szklany z dodatkiem recyklatu gumowego jako warstwy przekładkowej w kompozycie ma lepsze parametry wytrzymałościowe od kompozytu z dodatkiem recyklatu do żywicy. Taki rodzaj materiału ma nieznacznie mniejsze wartości wytrzymałości na rozciąganie od czystego kompozytu epoksydowo-szklanego. Wartość wytrzymałości na rozciąganie σ_m w przypadku wariantu przekładkowego jest mniejsza o około 13% w porównaniu z materiałem bez dodatku recyklatu. W przypadku dodatku recyklatu do żywicy wartość wytrzymałości na rozciąganie maleje o 36%. Moduł Younga E dla materiału bazowego wyniósł 6061 MPa, dla wariantu kompozytu EPO 5W wartość tego modułu zmalała o 2%, zaś w przypadku wariantu EPO 5L spadek ten był rzędu 35%.

Jednakże plastyczność materiału z dodatkiem recyklatu do żywicy nie zmniejsza się znacząco. Warto zauważyć, że wartość odkształcenia względnego ϵ kompozytu z dodatkiem recyklatu gumowego jest bardziej korzystna w przypadku dodatku recyklatu gumowego do osnowy materiału. W tym wypadku spadek wartości wydłużenia względnego w porównaniu do czystego kompozytu wyniósł tylko 1,1%, podczas gdy spadek wartości odkształcenia wynosi 22% dla wariantu kompozytu z dodatkiem recyklatu gumowego jako warstwy przekładkowej.

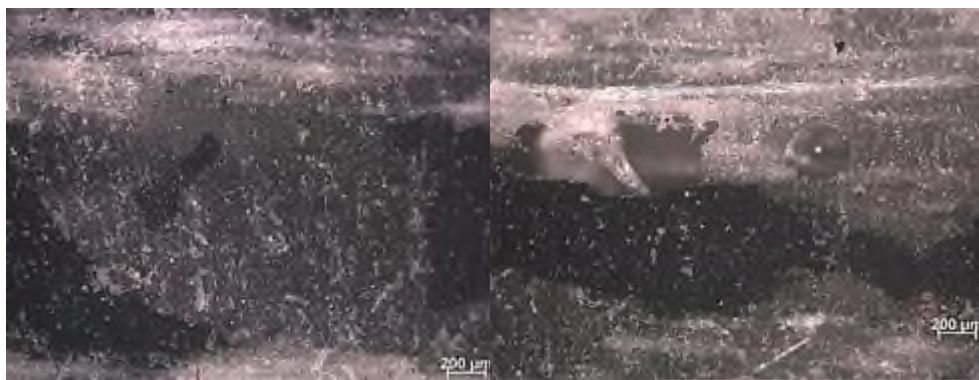
Pod mikroskopem optycznym Axiovert 25 obserwowano struktury materiałów kompozytowych, w zależności od sposobu wytwarzania kompozytów. Na rys. 5 przedstawiono struktury materiałów kompozytowych z 5% zawartością recyklatu gumowego (EPO 5W) ułożonego warstwowo w kompozycie.



Rys. 5. Struktura materiałów kompozytowych z 5% zawartością recyklatu gumowego (EPO 5W) ułożonego warstwowo w kompozycie, powiększenie 50x

Analizując strukturę kompozytów z 5% zawartością recyklatu gumowego ułożonego warstwowo, można zauważyć stosunkowo jednolite jego rozmieszczenie w warstwie kompozytu. Widoczne są większe oraz mniejsze cząstki recyklatu. Zauważalne są pojedyncze pory powietrza oraz mikropory, jednakże nie występują one bezpośrednio na granicy zbrojenie–osnowa, tylko spowodowane są obecnością samego recyklatu. Adhezja pomiędzy warstwami ma bezpośredni wpływ na wytrzymałość tego kompozytu, co również potwierdzają wyniki uzyskane w próbie rozciągania.

Na rys. 6 przedstawiono struktury materiałów kompozytowych z 5% zawartością recyklatu (EPO 5) dodanego do osnowy.



Rys. 6. Struktura materiałów kompozytowych z 5% zawartością recyklatu gumowego (EPO 5W) dodanego do osnowy, powiększenie 50x

W strukturach kompozytów z 5% zawartością recyklatu dodanego do osnowy zauważalne jest niejednorodne rozmieszczenie recyklatu, co bezpośrednio wynika z zastosowanej technologii wytwarzania. Widoczne są pory powietrza przy samym zbrojeniu oraz na granicy zbrojenie–osnowa, które spowodowane są występowaniem w tych miejscach

cząstek recyklatu. Pory powietrza oraz ich ilość, jak i wielkość, które są naturalnym zjawiskiem występującym w technologii laminowania ręcznego, mają bezpośredni wpływ na wytrzymałość. Dodanie recyklatu gumowego bezpośrednio do osnowy zaburza adhezję pomiędzy warstwami, przez co kompozyt ten charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością w stosunku do recyklatu ułożonego warstwowo, co pokazują badania przeprowadzone w statycznej próbie rozciągania.

4. Wnioski

Recykling odpadów jest ważnym czynnikiem uwzględnianym podczas opracowywania technologii wytwarzania materiałów nowej generacji. Szczególnie duże możliwości jego zastosowania pojawiają się w przypadku materiałów kompozytowych, do których zaliczane są kompozyty epoksydowo-szklane. Możliwość zastosowania recyklatu gumowego, będącego odpadem generowanym rokrocznie w coraz większej ilości na całym świecie, ma niewątpliwie pozytywne oddziaływanie na środowisko. Wykorzystanie odpadu gumowego oprócz aspektu środowiskowego ma także znaczenie dla rozwoju rynku materiałów kompozytowych. Zastosowanie recyklatu pozwala bowiem na uzyskanie materiału o nowych, korzystnych właściwościach, zapewniającego niezawodność i bezpieczeństwo pracy oraz obsługi wykonanych z niego konstrukcji. Analiza wyników uzyskanych z przedstawionych w artykule badań pozwala stwierdzić, że dodatek recyklatu jako warstwy przekładkowej do kompozytu epoksydowo-szklanego nieznacznie obniża jego parametry wytrzymałościowe, ale materiał ten ma równie dobre walory użytkowe jak czysty kompozyt epoksydowo-szklany. Warto zwrócić uwagę na fakt, że dodatek recyklatu gumowego zwiększa parametry plastyczne kompozytu, co wpływa na możliwość zastosowania takiego rodzaju materiałów na konstrukcje wymagające niwelowania drgań czy też tłumienia szkodliwych dźwięków. Warto rozważyć dalsze badania analizowanych materiałów w celu potencjalnego wykorzystania ich w konstrukcjach zapewniających niezawodną i bezpieczną pracę maszyn generujących dużej skali drgania i hałasy. Ten kierunek badań jest priorytetem dalszej pracy naukowej autorów niniejszej pracy.

5. Literatura

1. Amin H., Gamal A., Khatib Z.: Scope of reusing waste shredded tires in concrete and cementitious composite materials: A review. *Journal of Building Engineering*, Vol. 35, 2021.
2. Dębska B.: Materiały budowlane produkowane z wykorzystaniem odpadów, *Izolacje*, nr 5, 2010.
3. Gronowicz K.T.: Recykling zużytych opon samochodowych. *Problemy eksploatacji*, pp. 5-18, 2007.

4. <http://rynekinwestycji.pl/recykling-tworzyw-sztucznych>, [dostęp: 20 01 2022].
5. <https://www.plastech.pl/wiadomosci/Sposoby-zagospodarowania-odpadow-gumowych-17048>, [dostęp: 02.01 2022].
6. Han-Seung Y., Young-Kyu L., Hyun-Joong K., Chun-Won K.: Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresource Technology*, Vol. 95, Iss. 1, October 2004.
7. <https://agbet.eu/zywice/produkt/zywica-epoksydowa-odlewnicza-epidian-652-ida-2>, [dostęp: 10.11.2021].
8. Jakóbiec J.: Recykling energetyczny zużytych opon, *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe*, pp. 205-211, 2011.
9. Kyzioł L., Panasiuk K., Barcikowski M., Hajdukiewicz G.: The influence of manufacturing technology on the properties of layered composites with polyester-glass recycle additive, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 36 (Iss. 1), s. 18-30, 2020.
10. Kyzioł L., Panasiuk K., Hajdukiewicz G.: The influence of granulation and content of polyester-glass waste on properties of composites. *Journal of KONES*, Vol. 25, No. 4, 2018.
11. Panasiuk K., Hajdukiewicz G.: Production of composites with added waste polyester-glass with their initial mechanical properties, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, nr 52, 2017.
12. Panasiuk K., Hajdukiewicz G.: Influence of the content of a glass-polyester recycled additive on the properties of layered composites in dynamic tests, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, tom 4, nr 56 (128), 2018.
13. Parasiewicz W.: Utylizacja opon - legislacja, technologia, ekonomia, *Materiały XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-technicznej Elastomery 2009, Nowoczesne Materiały i Technologie*, Warszawa 18-20.11.2009.
14. Parasiewicz W., Pyskło L., Magryta J. : Recykling zużytych opon samochodowych, *Instytut Przemysłu Gumowego „STOMIL”*, Piastów 2005.
15. PN-EN ISO 527-4_2000P, *Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami*.
16. Rosik-Dulewska C.: Aktualny stan gospodarki odpadami i perspektywy zmian, *Polska Inżynieria Środowiska Pięć Lat Po Wstąpieniu Do Unii Europejskiej*, tom 3, Lublin, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska, 2009, pp. 93-102.
17. Scheirs J.: Rubber tyre recycling. In: *Polymer Recycling*, Wiley Series in Polymer Science, New York, John Wiley and Sons, 1998.
18. Shu Ling Zhang, Zhen Xiang Xin, Zhen Xiu Zhang, Jin Kuk Kim: Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. *Waste Management*, Vol. 29, Iss. 5, 2009.
19. Sienkiewicz M., Kucińska-Lipka J., Janik H., Balas A.: Mikrostruktura kompozytów poliuretanowo-gumowych, otrzymanywanych in situ z elastomerów uretanowych i recyklatów gumowych, 2009.

20. Sławski S., Woźniak A., Bazan P., Mrówka M.: The Mechanical and Tribological Properties of Epoxy-Based Composites Filled with Manganese-Containing Waste. *Materials* 2022, 15, 1579. <https://doi.org/10.3390/ma15041579>.
21. Sprawozdanie z realizacji Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2019, za okres od dnia 1 stycznia 2016 r. do dnia 31 grudnia 2018 r., Warszawa, 2019.
22. Svoboda J., Dvorský T., Václavík V., Charvát J., Máčalová K., Heviánková S., Janurová E.: Sound-Absorbing and Thermal-Insulating Properties of Cement Composite Based on Recycled Rubber from Waste Tires. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2725. <https://doi.org/10.3390/app11062725>.
23. White J.R., De S. K.: *Poradnik Technologia Gumy*, Instytut Przemysłu Gumowego, Piastów 2003.
24. Wielgosinski G.: Przegląd technologii termicznego przekształcania odpadów. *Nowa Energia*, nr 1, 2011.
25. Zhang X.-X., Lu C.-H. and Liang M.: Preparation of rubber composites from ground tire rubber reinforced with waste-tire fiber through mechanical milling. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 103, 2007.