

## OCENA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW ZWYKŁYCH Z ROZDROBNIONĄ GUMĄ ZE ZUŻYTYCH OPON SAMOCHODOWYCH

Ewa Ołdakowska<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zakład Inżynierii Drogowej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, e-mail: e.oldakowska@pb.edu.pl

### STRESZCZENIE

Guma ze zużytych opon kojarzona jest z materiałem nieprzydatnym i uciążliwym dla środowiska, którego najpopularniejszą metodą odzysku, do niedawna, było składowanie (obecnie prawnie zabronione). Przyjęcie i upowszechnienie nowych standardów ekologicznych, formułowanych nie tylko przez prawodawstwo europejskie i krajowe, ale także kształtujących się w wyniku wzrostu świadomości ekologicznej, wymusza konieczność poszukiwania efektywnych sposobów utylizacji opon użytkowych. Przykładowym, przedstawionym w pracy, rozwiązaniem problemu opon wycofanych z eksploatacji jest ich wykorzystanie w postaci rozdrobnionej jako substytutu kruszywa naturalnego do produkcji betonu zwykłego. W artykule zaprezentowano wyniki badań wybranych właściwości modyfikowanego betonu zwykłego, na podstawie których stwierdzono, że guma powoduje obniżenie wytrzymałości na ściskanie, obniżenie ciężaru betonu, ogranicza możliwość wchłaniania wody przez beton, a także nie wpływa znacząco na zjawiska fizykochemiczne towarzyszące formowaniu się struktury kompozytu.

**Słowa kluczowe:** beton, guma, rozdrobnione odpady gumowe.

### ASSESSMENT OF SELECTED PROPERTIES OF NORMAL CONCRETES WITH THE GRINDED RUBBER FROM WORN OUT VEHICLE TYRES

#### ABSTRACT

Rubber from the worn tyres is associated with a useless material, strenuous for environment, whose most popular recovery method until recently was storage (currently forbidden by law). The adoption and dissemination of new ecological standards, created not only by the European and national legislation, but also developing as a result of expanding ecological consciousness, forces the necessity of seeking efficient methods of utilization of the vehicle tyres. The exemplary solution for the problem of tyres withdrawn from the operation, presented in the article, is using them in the grinded form as a substitute for the natural aggregate for the production of normal concrete. The article presents the results of the tests of selected properties of the modified normal concrete, upon the basis of which it has been found that the rubber causes decrease of compression strength, concrete weight, limits water absorbability, and does not influence significantly the physical and chemical phenomena accompanying the composite structure formation.

**Keywords:** concrete, rubber, disintegrated rubber waste material.

### WPROWADZENIE

Do poważnych problemów stojących przed polityką światową należy zahamowanie degradującego wpływu społeczeństw na środowisko naturalne. Ten degradujący wpływ wyraża się w dwóch podstawowych zjawiskach, będących skutkiem często niekontrolowanego wzrostu i rozwoju gospodarczego oraz cywilizacyjnego świata. Pierwszym z nich jest powstawanie różnego rodzaju odpadów, a drugim niepokojącym zjawiskiem jest

wyczerpywanie się zasobów naturalnych środowiska. Działania polityki europejskiej w tej kwestii są bardzo zaawansowane, na co wskazuje liczba aktów prawnych oraz szereg rozwiązań organizacyjnych. Parlament Europejski już w 1999 roku rozpatrzył dwie dyrektywy o istotnym znaczeniu dla rozwiązania problemu zużytych opon:

1) Dyrektywę 1999/31/EC (Landfill Directive) wprowadzającą zakaz składowania całych zużytych opon samochodowych od lipca 2003 roku, a od lipca 2006 roku również opon roz-

drobnionych i zobowiązującą kraje członkowskie do stworzenia warunków umożliwiających realizację tego zamierzenia.

- 2) Dyrektywę 2000/53/EC (End-of-Life Vehicle Directive) określającą sposób postępowania z pojazdami po zakończeniu ich eksploatacji (zgodnie z dyrektywą opony powinny być zdjęte z pojazdu przed jego złomowaniem).

W Polsce, do roku 2001, nie było skutecznych przepisów prawnych, które rozwiązywałyby problem odzysku, recyklingu i utylizacji opon w sposób systemowy. Wejście w życie ustawy z dnia 11 maja 2001 roku o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami oraz o opłacie produktowej i opłacie depozytowej [14] nałożyło na producentów opon obowiązek odzysku z rynku większości (obecnie 75% wyprodukowanej masy) wyprodukowanych opon, a na przedsiębiorców z branży motoryzacyjnej obowiązek ewidencji, składowania i przekazywania do odzysku zużytych opon (w myśl tych przepisów producenci opon, którzy nie odzyskują tonażu uzależnionego bezpośrednio od własnej sprzedaży ponoszą konsekwencje finansowe). Przy czym z 75% wprowadzonych na rynek opon, minimum 15% powinno być poddane recyklingowi, a pozostałe 60% może być poddane innej formie odzysku.

Zużyte opony są poważnym problemem obciążającym środowisko, głównie ze względu na bardzo długi okres naturalnego rozkładu w warunkach środowiska naturalnego. Poza tym nie są ani materiałem niebezpiecznym, ani stwarzającym ryzyko, o ile się je w odpowiedni sposób przetwarza, transportuje i magazynuje. Ponadto opony są nietoksyczne, odporne na pleśń, wilgoć, wykazują bardzo wolny rozkład pod wpływem bakterii. Charakteryzują się odpornością na niektóre oleje, wiele rozpuszczalników, kwasy i inne chemikalia, a ich kształt, waga i elastyczność czynią je surowcami atrakcyjnymi, które można w różnorodny sposób zastosować, czy to w całości, czy też w postaci rozdrobnionej.

Przykładem powtórnego wykorzystania, w postaci rozdrobnionej, opon wycofanych z eksploatacji jest możliwość ich zastosowania do produkcji betonu zwykłego. Guma dodana do betonu wpływa na właściwości, zarówno fizyczne, jak i mechaniczne. Badania prowadzone w kilku ośrodkach wykazały, że obecność rozdrobnionych odpadów gumowych w betonie, niezależnie od ich ilości, pogarsza pewne właściwości me-

chaniczne betonu tradycyjnego. Badaniom wytrzymałościowym (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie) poddawano próbki różnych rozmiarów i kształtów [1, 3, 9, 13].

Najmniejsze spadki wytrzymałości, zarówno na ściskanie jak i na zginanie, notowano przy minimalnych zawartościach frakcji gumowych, co spowodowało, że autorzy [2], po przeprowadzonych doświadczeniach, zasugerowali, by ilość gumy w betonie została ograniczona do 17% w stosunku do masy kruszywa. Obniżenie wytrzymałości może być efektem słabej przyczepności cząstek gumy do zaczynu cementowego. Ma ona charakter adhezyjny, czyli przywierania jednej substancji do drugiej, a występujące siły przyczepności powierzchni stykowych odgrywają tu rolę znaczącą. W literaturze nie ma jednoznacznych wyników dotyczących szczelności strefy stykowej i stopnia przyczepności zaczynu do cząstek gumowych. Obserwowano zarówno adhezję słabą [6, 11], jak i bardzo silną [4, 12]. Obecność gumy w betonie, jak wykazały przeprowadzone badania [5, 10] wpływa korzystnie na właściwości fizyczne badanych betonów.

Beton w budownictwie ma bardzo wszechstronne zastosowania. Każdorazowo należy dostosowywać jego skład i parametry do warunków, w jakich będzie pracował, bowiem wymagania, jakie powinien spełniać są ściśle związane z określonymi warunkami środowiskowymi zależnymi od przeznaczenia budynku. Betony modyfikowane rozdrobnionymi odpadami gumowymi są przykładem betonu, który może być stosowany w stodółkach, garażach narzędzi, maszyn i sprzętu rolniczego, wiatkach czy zadaszeniach, będąc jednocześnie alternatywą dla betonów tradycyjnych [7, 8].

## MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Mieszanke betonową do wykonania próbek sporządzono z następujących składników:

- cement portlandzki CEM I 32,5 spełniający wymagania norm PN-EN 197-1: 2012 i PN-EN 197-2: 2002 [15, 16],
- piasek rzeczny płukany 0–2 mm,
- mieszanka żwirowa 2–8 mm,
- rozdrobnione odpady gumowe o uziarnieniu 0–2 mm (mieszanina pyłu, miazgi, granulatu).

Odpady gumowe produkowane przez firmę ABC Recykling S.A Krosno Odrzańskie, pochodzące ze zużytych opon samochodowych, wprowadzono do zarobu poprzez zmniejszenie

zawartości kruszywa przy uwzględnieniu objętości zamienianych materiałów.

Zaprojektowane receptury charakteryzowały się stałą zawartością cementu ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) oraz stałym składem granulometrycznym kruszywa. Receptury stosowanych mieszanek podano w tabeli 1. Do badań betonów stosowano próbki: beleczkowe o wymiarach  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  oraz próbki kostkowe o wymiarach  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ . Mieszanki betonowe do wykonania próbek beleczkowych sporządzano w mieszarce laboratoryjnej, w której prędkość obrotowa mieszadła wynosiła  $140\text{--}285 \text{ obr/min}$ . Jednorazowy zarób wystarczał do wypełnienia jednej trójdzielnej formy. Przez  $1,5 \text{ min}$  mieszano suche składniki: cement, kruszywo i rozdrobnione odpady gumowe. Następnie dodawano wodę i mieszano przez około  $3 \text{ min}$ . Mieszankę układano w formach w dwóch warstwach i zagęszczano. Zagęszczanie przeprowadzano na stoliku wibracyjnym o częstotliwości drgań  $50 \pm 5 \text{ Hz}$  i średniej amplitudzie  $0,5 \text{ mm}$ .

Mieszanki do wykonywania próbek kostkowych przygotowywano w laboratoryjnej betoniarnie przeciwbieżnej. Mieszanki zagęszczano na stoliku wibracyjnym w dwóch warstwach. Całkowity czas wibrowania nie przekraczał  $2 \text{ min}$ .

Wykonane z mieszanek próbki, po normowym okresie dojrzewania, poddano badaniom: wytrzymałości na ściskanie, gęstości objętościowej, nasiąkliwości oraz badaniom struktury przy wykorzystaniu elektronowej mikroskopii skaningowej.

Podstawowe badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach sześciennych, natomiast na połówkach próbek beleczkowych  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  wykonano porównawcze badanie wytrzymałości na ściskanie. Do badań wykorzystano legalizowaną prasę hydrauliczną trójzakresową o regulowanej szybkości narastania naprężenia. Próbki umieszczano w specjalnej wkładce zapewniającej nacisk na powierzchnię odpowiednio  $100$  i  $16 \text{ cm}^2$ . Zakres pomiarowy siłomierza prasy

wytrzymałościowej dobrano tak, aby największa siła potrzebna do zniszczenia próbki nie przekraczała  $70\%$  pełnego zakresu obciążeń. Szybkość przyrostu naprężenia wynosiła  $0,2 \text{ MPa/s}$ . Wytrzymałość określano jako średnią z sześciu pomiarów wyznaczanych przy wykorzystaniu wzoru:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdzie:  $F$  – obciążenie niszczące,  $[\text{N}]$ ,  
 $A_c$  – pole przekroju poprzecznego próbki,  $[\text{mm}^2]$ .

Oznaczenie wykonano po  $28, 90$  i  $180$  dniach dojrzewania próbek. Pomiar nasiąkliwości, określający maksymalną masę wody wchłoniętą przez próbkę zanurzoną w wodzie, pod działaniem normalnego ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono na próbkach beleczkowych, które uprzednio wysuszono w temperaturze  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  do stałej masy, po  $28$  dniach ich dojrzewania.

Gęstość objętościową betonu określono na podstawie rzeczywistych pomiarów masy oraz objętości próbek.

Badanie struktury stwardniałych betonów wykonano, przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego. Obserwacje prowadzono bez napyłania materiałem przewodzącym prąd elektryczny i bez konieczności stosowania wysokiej próżni. Za pomocą mikroskopii skaningowej badano mikrostrukturę i skład fazowy stwardniałego zaczynu betonów z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych oraz porównawczo betonu zawierającego tylko kruszywo naturalne.

## WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań próbek betonu kontrolnego oraz próbek betonu zawierającego rozdrobnione odpady gumowe zaprezentowano w tabeli 2.

**Tabela 1.** Składy mieszanek betonowych na  $1 \text{ m}^3$

**Table 1.** Concrete mix compositions per  $1 \text{ m}^3$

Wymagania	Beton kontrolny (1)	Beton z dodatkiem gumowym		
		(2)	(3)	(4)
Cement [kg]	300	300	300	300
Kruszywo naturalne [kg]	1996	1927	1854	1783
Rozdrobnione odpady gumowe [kg] (%) <sup>*</sup>	–	39 (2) <sup>*</sup>	78 (4) <sup>*</sup>	117 (6) <sup>*</sup>
Woda [kg]	150	146	143	140

<sup>\*</sup> – w stosunku do masy kruszywa (czyli  $10\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$  piasku wymienionego objętościowo na rozdrobnione zużyte opony samochodowe).

**Tabela 2.** Wyniki badań cech fizycznych i wytrzymałościowych betonów  
**Table 2.** The results of tests of the physical and strength properties of concretes

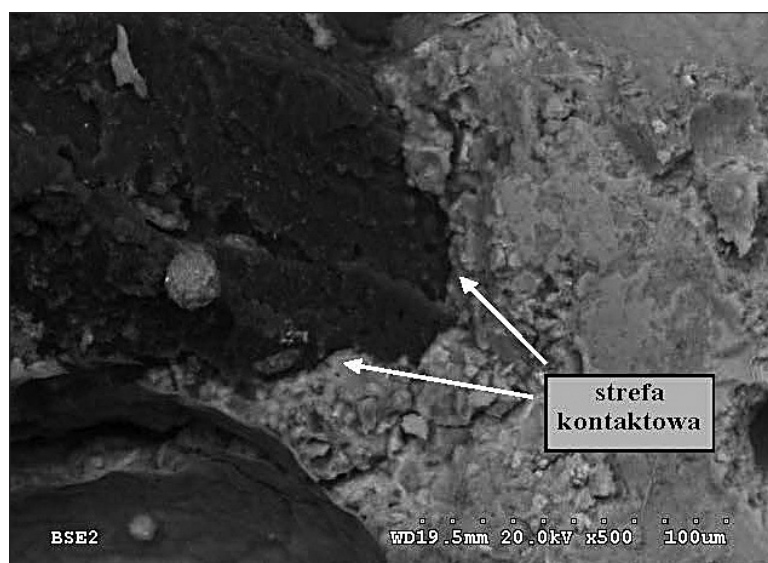
Nr serii	Wytrzymałość na ściskanie				Nasiąkliwość	Gęstość objętościowa
	Próbki 10×10×10 cm	Połówki próbek 4×4×16 cm				
		po 28 dniach	po 28 dniach	po 90 dniach		
	[MPa]					
1	36,6	33,5	38,8	42,4	5,27	2,38
2	29,4	26,5	30,6	34,2	4,55	2,13
3	27,6	24,9	29,0	33,3	4,19	2,11
4	24,6	23,1	26,7	28,8	3,77	2,09

Stwierdzono wpływ frakcji „gumowej” zarówno na cechy fizyczne, jak i wytrzymałościowe badanych betonów. W przypadku wytrzymałości na ściskanie obserwowano ujemny wpływ rozdrobnionych zużytych opon samochodowych – powodują one spadek wytrzymałości, zauważalny już po 28 dniach. Betony zawierające 2% rozdrobnionej gumy charakteryzują się 20% spadkiem wytrzymałości, zawartość modyfikatora w ilości 4% zmniejsza wytrzymałość o 25% natomiast obecność 6% frakcji „gumowej” to wytrzymałość o 33% mniejsza w stosunku do betonu tradycyjnego. Analogiczne różnice w wynikach badania wytrzymałości na ściskanie otrzymano także po 90 i 180 dniach dojrzewania próbek.

Wraz ze wzrostem ilości rozdrobnionej gumy uzyskano coraz niższe wartości nasiąkliwości. Dodatek 2% mieszaniny pyłu, miazgi i granulatu gumowego powodował obniżenie nasiąkliwości o ponad 13%, 4% „gumowego modyfikatora” to wartości mniejsze o 20%, a rozdrobnione odpady

w ilości 6% to nasiąkliwość o prawie 29% mniejsza w stosunku do nasiąkliwości betonu kontrolnego zawierającego tylko kruszywo piaskowo-żwirowe. Wyraźny wpływ rozdrobnionych poeksploatacyjnych opon stwierdzono także w przypadku pomiaru gęstości, która zmniejsza się wraz ze wzrostem ilości „kruszywa gumowego”. Ma to naturalny związek z gęstością samej gumy, różniącą się znacznie od gęstości kruszywa naturalnego i umożliwia uzyskanie kompozytów o obniżonym ciężarze.

Obserwacje prowadzone na przelomach próbek (rys. 1 i rys. 2) przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego, pozwoliły na jakościową ocenę wpływu rozdrobnionych odpadów gumowych, pochodzących ze zużytych opon samochodowych, oraz na mikrostrukturę i skład fazowy stwardniałego zaczynu cementowego. Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że dla betonu kontrolnego, jak i betonu modyfikowanego, produktami hydra-

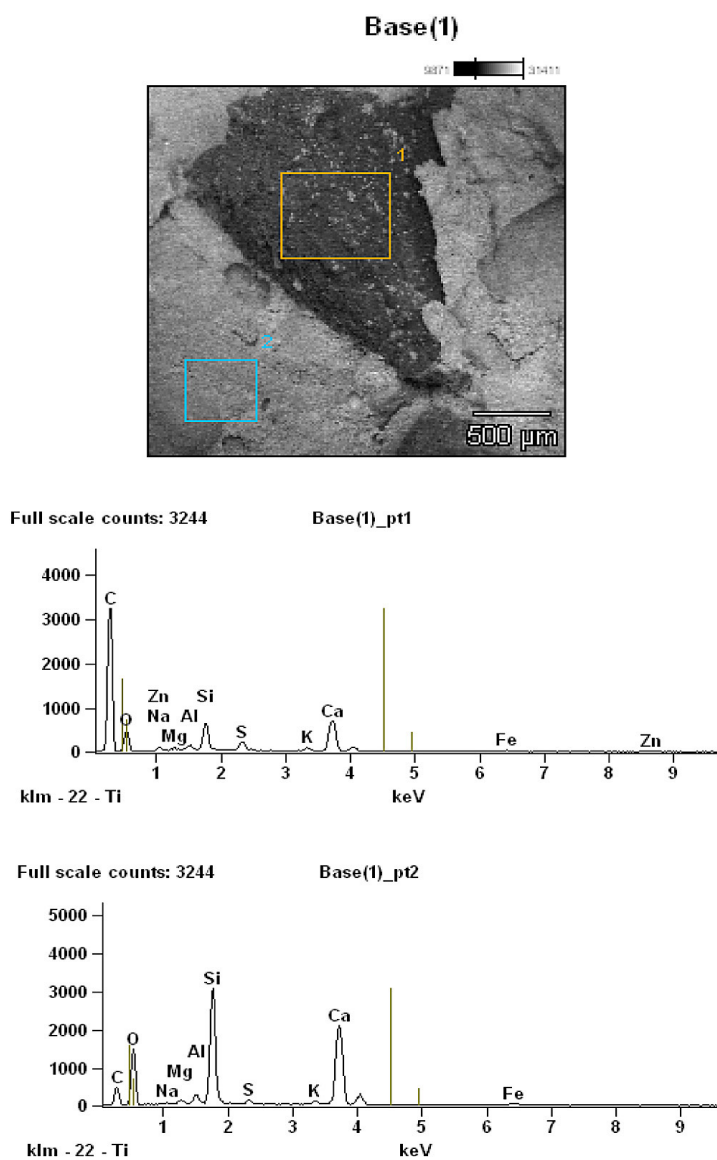


**Rys. 1.** Widok strefy kontaktowej guma – beton (powiększenie ×500)  
**Fig. 1.** View of the contact zone rubber – concrete (magnification ×500)





Rys. 2. Widok strefy kontaktowej guma – beton (powiększenie  $\times 1200$ )  
 Fig. 2. View of the contact zone rubber – concrete (magnification  $\times 1200$ )



Rys. 3. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej  
 Fig. 3. Results of X-ray microanalysis

tacji są w głównej mierze odmiany krzemianów wapnia charakteryzujące się typową włóknistą morfologią oraz płytkowe kryształy portlandytu.

Stwierdzono, że obecność rozdrobnionych poeksploatacyjnych opon w mieszance betonowej wpływa na powstawanie międzypowierzchniowej strefy więzi (matryca cementowa – inkluzja gumowa). W warstwie kontaktowej guma – zaczyn obserwowano więcej portlandytu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , z powodu lokalnie większego współczynnika w/c (migrująca woda w zaczynie tworzy wokół ziarna gumowego nieco grubszą warstwę).

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki mikroanalizy rentgenowskiej mikroobszaru na powierzchni ziarna gumy oraz mikroobszaru na powierzchni zaczynu.

Analiza jakościowa mikroobszaru na powierzchni gumy wskazuje na obecność pierwiastków będących budulcami uwodnionej fazy C-S-H, co świadczy o przyczepności zaczynu cementowego do cząstek gumy (w technologii betonu zwraca się szczególną uwagę na przyczepność zaczynu do ziaren kruszywa). Przyczepność ta ma zdecydowanie charakter adhezyjny, czyli przywierania jednej substancji do drugiej.

## WNIOSKI

Stwierdzono, że zastąpienie w mieszance betonowej kruszywa naturalnego frakcją „gumową” wpływa na zmianę zarówno cech fizycznych, jak i wytrzymałościowych badanych betonów. Obecność dodatku gumowego, niezależnie od jego ilości, powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie sięgający nawet kilkudziesięciu procent (33% w przypadku obecności 6% frakcji „gumowej”), co może ograniczać zastosowanie kompozytów gumowo-betonowych do wybranych rozwiązań konstrukcyjnych.

Zastąpienie w mieszance betonowej kruszywa naturalnego „kruszywem gumowym” wpływa korzystnie na właściwości wilgotnościowe betonów ograniczając możliwość wchłaniania wody przez beton (wartości nasiąkliwości niższe nawet o 29% przy zawartości modyfikatora w ilości 6%) oraz na obniżenie ciężaru takiego betonu (już 2% mieszaniny pyłu, miazgi i granulatu gumowego obniża ciężar o około 10%).

Zastosowanie rozdrobnionej gumy ma, poza aspektem technicznym, również bardzo ważny aspekt ekologiczny związany z zagospodarowaniem odpadów pochodzących ze zużytych opon samochodowych.

## LITERATURA

1. Ali N.A., Amos A.D., Roberts M. 1993. Use of Ground rubber tires in portland cement concrete. In: Proceedings International Conference on Concrete 2000, University of Dundee, UK, 379–390.
2. Biel T.D., Lee H., 1996. Magnesium oxychloride cement concrete with recycled tire rubber. Transportation Research Record No. 1561, 6–12.
3. Eldin N.N., Senouci A.B. 1993. Rubber tire particles as concrete aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering, 5(4), 478–496.
4. Hernandez-Olivares F., Barluenga G., Bollati M., Witoszek B. 2002. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. Cement and Concrete Research, 32(10).
5. Kaloush K.E., Way G.B., Zhu H. 2005. Properties of crumb rubber concrete. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1914, 8–14.
6. Li G., Stubblefield M.A., Garrick G., Eggers J., Abadie Ch., Huang B. 2004. Development of waste tire modified concrete. Cement and Concrete Research, 34(12).
7. Ołdakowska E. 2012. Możliwość zastosowania betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi w budownictwie rolniczym. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, 17(2), 61–68.
8. Ołdakowska E. 2014. Wpływ dodatku z rozdrobnionych opon samochodowych na właściwości mechaniczne betonów stosowanych w budownictwie rolniczym. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, 19(1), 67–75.
9. Rostami H., Lepore J., Silverstraim T., Zundi I., 1993. Use of recycled rubber tires in concrete. In: Proceedings International Conference on Concrete 2000, University of Dundee, UK, 391–399.
10. Savas B.Z., Ahmad S., Fedroff D. 1996. Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber. Transportation Research Record No. 1574, 80–88.
11. Silvestravičiūtė I., Šleinotaitė-Budrienė L. 2002. Possibility to use scrap tires as an alternative fuel cement industry. Environmental Research, Engineering and Management, 3(21).
12. Skripkiūnas G., Grinys A., Daukšys M. 2007. Using tires rubber waste for modification of concrete properties. Sustainable Construction Materials and Technologies International Conference, Coventry.
13. Topcu I.B. 1995. The properties of rubberized concretes. Cement and Concrete Research, 25(2), 304–310.
14. Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami oraz o opłacie produktowej i opłacie depozytowej. Dz.U. 2001, Nr 63, poz. 639.
15. PN-EN 197-1: 2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
16. PN-EN 197-2: 2002 Cement – Część 2: Ocena zgodności.