

Ewa OŁDAKOWSKA*
Politechnika Białostocka

BADANIE WPLYWU DODATKU ROZDROBNIONYCH ZUŻYTYCH OPON SAMOCHODOWYCH NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

Streszczenie. Odpady w postaci tysięcy zużytych opon samochodowych stanowią ogromny problem ekologiczny i ekonomiczny, w skali światowej. Artykuł przedstawia propozycję zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych do modyfikacji betonów cementowych. Badania własne poświęcono głównie cechom wytrzymałościowym (powszechnie uważanym za najcenniejsze) modyfikowanych betonów. Przeprowadzono także oznaczenie cech wilgotnościowych (wilgotność w stanie naturalnego zawilgocenia, wilgotność sorpcyjna, nasiąkliwość i podciąganie kapilarne) oraz badanie mrozoodporności, porównując modyfikowany beton z betonem zawierającym naturalne kruszywo piaskowo-żwirowe.

THE INFLUENCE STUDY OF GRINDED WORN OUT VEHICLE TYRES ADDITION UPON THE CHOSEN CEMENT CONCRETE PROPERTIES

Summary. The thousands of worn out vehicle tyres are a great ecological and economic problem in the global scale. This article presents the proposal of use of grinded rubber waste in the cement concrete modification. The goal of research was to determine the strength properties of the modified concretes. The research has been performed in range of moisture determination in the natural moisture conditions, sorption moisture, absorbability and capillary rise, by comparing the modified concrete with the concrete which contains the natural sand and gravel aggregate.

1. Wstęp

Stosowanie odpadów w postaci zużytych opon samochodowych, w budownictwie jest dziedziną stosunkowo mało rozpowszechnioną w Polsce. Kraje rozwinięte, starając się

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Radziszewski.

uporządkować gospodarkę odpadami, wydały liczne dyrektywy i decyzje związane z tym problemem. Pierwsza z nich, zwana ramową, ukazała się w 1975 roku i zwracała uwagę między innymi na ochronę zdrowia, ludzi i środowiska przed szkodliwymi skutkami spowodowanymi zbieraniem, transportem, unieszkodliwianiem, magazynowaniem i składowaniem odpadów. Rok 1990 przyniósł powołanie w Unii Europejskiej komisji i grup programowych, które pracowały nad stworzeniem kompleksowego programu rozwiązania problemu odpadów we wszystkich krajach członkowskich. Zużyte opony uznano za jeden z istotnych strumieni odpadów. Polska w latach 2001-2002 uchwaliła ustawy zgodne z europejskimi dyrektywami. Ustawa „O odpadach” wprowadziła zakaz składowania całych zużytych opon na wysypiskach od 1 lipca 2003 roku, a rozdrobnionych opon – od lipca 2006 roku, zakazała także importu zużytych opon do spalania. Ustawy „O obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami” oraz „O opłacie produktowej i depozytowej” nałożyły na producentów (i importerów) opon obowiązek uzyskiwania, wyznaczonego (w poszczególnych latach), poziomu odzysku wprowadzanych na rynek opon (od 25% w 2002 roku, do 75% w 2007 roku). Zgodnie z ustawą „czyszczącą” wskaźnik recyklingu powinien być na poziomie 6% (2004 roku) i ma wzrastać rokrocznie o 3% do 15% (w 2007). Stanowi to poważne wyzwanie, ponieważ zapotrzebowanie na produkty recyklingu opon w Polsce jest niewielkie. Istnieje, więc konieczność zagospodarowania, według szacunkowych danych, około 180 tysięcy ton rocznie. Podstawowym procesem, umożliwiającym recykling zużytych opon jest ich rozdrobnienie w wyniku, którego otrzymamy gumę, włókna i w większości przypadków kawałki drutu stalowego. W celu wykorzystania niezbędne jest oddzielenie włókien i stali oraz segregacja rozdrobnionej gumy na frakcje o różnej wielkości ziaren i ewentualne dalsze rozdrobnienie. Duże zainteresowanie wzbudza możliwość wykorzystania odpowiednio rozdrobnionych odpadów gumowych do modyfikacji betonu cementowego i chudego betonu, dzięki czemu otrzymamy wartościowy materiał, przeznaczony do wielu zastosowań w budownictwie ogólnym i drogowym.

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych betonów cementowych modyfikowanych różną ilością mieszaniny miazgi i granulatu gumowego.

2. Materiały, próbki i metodyka badań

Do wykonania betonu jako spoiwo zastosowano cement CEM I 32,5 odpowiadający wymogom normy PN-EN 19701. Kruszywem była mieszanina piasku rzecznoego i kruszywa naturalnego grubego, o uziarnieniu do 8 mm. Udział procentowy poszczególnych frakcji kruszywa przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Udział procentowy poszczególnych frakcji kruszywa

Frakcja [mm]	Zawartość frakcji [%]
0 - 0,125	0,576
0,125 - 0,25	4,528
0,25 - 0,50	17,200
0,50 - 1,00	11,936
1,00 - 2,00	5,104
2,00 - 4,00	30,656
4,00 - 8,00	30,000

Składnikiem modyfikującym były rozdrobnione odpady gumowe, wyprodukowane w Krośnie Odrzańskim i pochodzące ze zużytych opon samochodowych. Zastosowano mieszaninę miazgi i granulatu gumowego, które wprowadzano do zarobu przez zmniejszenie zawartości kruszywa, uwzględniając objętość zamienianych materiałów. Projektując mieszankę betonową zachowano jednakową gęstoplastyczną konsystencję. Przygotowano trzy serie mieszanek betonowych, zawierające 10%, 20% i 30% (B1/10%, B1/20%, B1/30%) rozdrobnionych odpadów gumowych oraz mieszankę kontrolną, zawierającą kruszywo piaskowo-żwirowe (B0). Po zarobach próbnych ostatecznie badania laboratoryjne przeprowadzono na składach o następujących proporcjach składników:

- cement – 300 [kg/m³],
- kruszywo – 1 996 [kg/m³],
- woda – 150 [kg/m³].

Tabela 2

Kruszywo do mieszanek betonowych

Wyszczególnienie w [kg/m ³]	Mieszanka betonowa			
	B 0	B 1/ 10%	B 1/ 20%	B 1/ 30%
Piasek 0 – 2 mm	798	718	638	558
Piasek 0 -2 mm zastąpiony miazgą i granulatem gumowym o uziarnieniu 0 -2 mm (objętościowo)	-	80	160	240
Żwir 2 – 4 mm	599	599	599	599
Żwir 4 – 8 mm	599	599	599	599
Suma	1 996	1 996	1 996	1 996

Badanie właściwości wytrzymałościowych betonu z rozdrobnionymi odpadami gumowymi przeprowadzono w zakresie wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wykonano na próbkach sześciennych, o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ cm oraz na połówkach beleczek, pozostałych po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, za pomocą legalizowanej prasy hydraulicznej. Próbki umieszczono tak, by zapewnić właściwy nacisk na powierzchnię, odpowiednio 100 cm^2 i 16 cm^2 . Zakres pomiarowy siłomierza ustalono na poziomie takim, aby największa siła potrzebna do zniszczenia próbki nie przekraczała 70% pełnego zakresu obciążeń. Wytrzymałość określono jako średnią z trzech pomiarów (próbki sześciennie) oraz z sześciu (próbki beleczkowe). Oznaczenie wykonano po 28 dniach dojrzewania; wyniki przedstawiono na rys. 1.

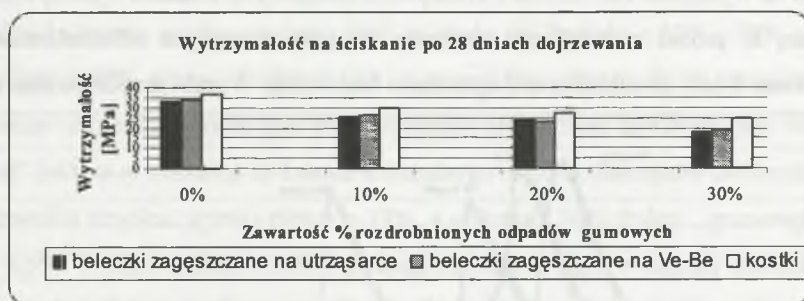
Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykonano na beleczkach $4 \times 4 \times 16$ cm, przy wykorzystaniu systemu badawczego firmy MTS, z zamontowanymi przetwornikami do pomiaru sił oraz przemieszczeń, sprzężonego z komputerem umożliwiającym jednoczesne i synchroniczne sterowanie kilkoma kanałami wymuszeń. Maszynę wytrzymałościową wzbogacono o specjalne wyposażenie, umożliwiające właściwe badanie próbki w kształcie beleczki. Próbki zagęszczano w dwojaki sposób: na utrząsarce oraz na stoliku wibracyjnym (przeznaczonym do badań mieszanki betonowej metodą Vebe), w celu sprawdzenia wpływu zagęszczania na wytrzymałość oraz możliwość rozsegregowywania się materiału podczas wibrowania. Oznaczenie wykonano po 28 dniach dojrzewania próbek w komorze klimatyzacyjnej (temperatura pokojowa, wilgotność $\geq 95\%$). Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określono jako średnią z sześciu pomiarów; wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Zakres badań właściwości wilgotnościowych betonów cementowych, modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi, obejmował badanie wilgotności w stanie naturalnego zawilgocenia (bezpośrednio po wyjęciu z określonych warunków przechowywania), wilgotności sorpcyjnej, nasiąkliwości i podciągania kapilarnego. Wszystkie oznaczenia przeprowadzono na próbkach o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm, po 28 dniach ich dojrzewania. Wyniki oznaczenia wilgotności w stanie naturalnego zawilgocenia są średnią arytmetyczną badania 9 próbek, wykonanych według każdej z receptur. Badanie wilgotności sorpcyjnej, nasiąkliwości i podciągania kapilarnego przeprowadzono na 6 próbkach betonów każdego rodzaju.

Mrozoodporność betonu oceniono na podstawie złuszczeń powierzchniowych pod wpływem zamrażania w obecności roztworu soli odladzającej. Odpowiednio przygotowane próbki sześciennie (po 6 sztuk z każdej receptury) poddawano cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu (56 cykli) w programowalnej komorze testowej MK 720 Binder, o pojemności 720 l i zakresie zmian temperatur od -40°C do 180°C oraz regulowanych szybkościach nagrzewania i chłodzenia.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek (beleczki i kostki) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie f_{c28} [MPa] po 28 dniach dojrzewania
Fig. 1. Compressive strength f_{c28} tests [MPa] after 28 days of curing

Z rys. 1 wynika, że wytrzymałość betonu ulega zmianie wraz ze wzrostem zawartości frakcji „gumowej”. Dodatek 10% rozdrobnionych odpadów gumowych spowodował spadek wytrzymałości o około 20%, dodatek 20% – o około 25%, a 30% – prawie 33%. Badane betony, przy zawartości 300 kg/m^3 cementu portlandzkiego CEM I 32,5, wykazały wytrzymałości odpowiadające betonowi zwykłemu powyżej klasy C 20/25 (betony z 10% i 20% frakcji „gumowej”) i klasy C 16/20 (dodatek 30% frakcji „gumowej”). Ze względu na sposób zagęszczania próbek stwierdzić należy, że największą wytrzymałością charakteryzują się próbki sześciennie o wymiarach $10\times 10\times 10\text{ cm}$, zagęszczane na Vebe. Różnica w stosunku do wytrzymałości określonej na połówkach próbek beleczkowych sięga 27%, przy zawartości 30% gumy. W przypadku porównania wytrzymałości próbek beleczkowych, zagęszczanych na utrząsarce i stoliku wibracyjnym przeznaczonym do badań mieszanki betonowej metodą Vebe, różnica jest niewielka i kształtuje się na poziomie od 2% (B1/10%) do 5% (B1/30%).

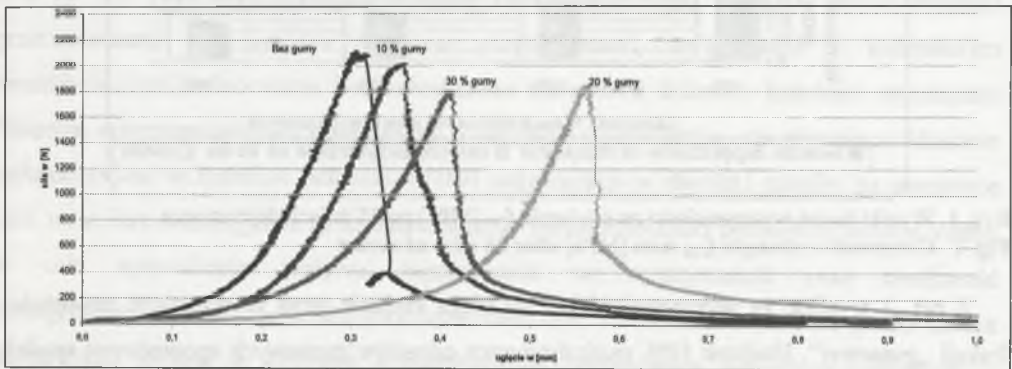
Wyniki wytrzymałości na rozciąganie, przy zginaniu próbek beleczkowych zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ct}'' [MPa] po 28 dniach dojrzewania

Betón	Wyszczególnienie						f_{ct}'' [MPa]
	1	2	3	4	5	6	
B 0	5,1	5,4	5,8	6,2	5,7	5,9	5,7
B 1 (10%)	5,1	5,0	4,9	4,9	5,1	5,3	5,1
B 1 (20%)	5,1	4,6	4,8	4,9	4,7	4,7	4,8
B 1 (30%)	4,2	4,3	4,8	4,8	4,4	4,0	4,4

Podobnie jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie zauważalny jest spadek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Wytrzymałość betonów modyfikowanych kształtuje się na poziomie niższym o 10% (dla B1/10%), 16% (dla B1/20%) i 23% (B1/30%) w stosunku do wytrzymałości betonu z kruszywem naturalnym. Podczas wykonywania badań stwierdzono, że próbki z dodatkami niszczyły się przy większych odkształceniach, które zarejestrowano dzięki specjalistycznej aparaturze badawczej. Wyniki przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zmiany ugięcia beleczek pod wpływem działającej siły

Fig. 2. Queen closures deflection changes under the applied force

Wyniki przedstawione na rys. 2 pokazują wyraźny wpływ dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na zachowanie próbki podczas jej obciążania. Wzrost wartości ugięcia w przypadku próbek z 10% mieszaniny miazgi i granulatu gumowego jest większy o 17%, w przypadku 20% zawartości frakcji „gumowej” aż o 84%, a 30% dodatku powoduje wzrost o 35%.

Tabela 4

Wyniki badań wilgotnościowych oraz badania mrozoodporności

Lp.	Rodzaj badania	Betón			
		B 0	B 1/ 10%	B 1/ 20%	B 1/ 30%
1.	Wilgotność w stanie naturalnego zawilgocenia [%]	3,20	3,02	3,01	2,96
2.	Wilgotność sorpcyjna [%]	4,25	3,89	3,81	3,74

cd. tabeli 4

3.	Nasiąkliwość objętościowa [%]	10,73	9,40	8,63	7,74	
4.	Nasiąkliwość wagowa [%]	5,27	4,55	4,19	3,77	
5.	Podciąganie kapilarne [%] po upływie	1 godz.	1,10	0,84	0,83	0,82
		3 godz.	1,19	0,90	0,89	0,88
		6 godz.	1,36	1,12	1,11	1,10
		24 godz.	1,71	1,43	1,40	1,38
6.	Mrozoodporność oceniana masą złuszczeń próbek betonowych m_{56} [kg/m^2] poddanych cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu w obecności 3% roztworu NaCl	0,169	0,132	0,203	0,411	

Z tabeli 4 wynika, że rozdrobnione odpady gumowe, zawarte w betonach cementowych, wpływają korzystnie na zmniejszenie wilgotności w stanie naturalnego zawilgocenia. W każdym z trzech przypadków (B1/10%, B1/20%, B1/30%) zawartość wody była niższa, w stosunku do betonu porównawczego (B0), o około 6% (próbki z 10% i 20% gumy) oraz 7,5% (próbki z 30% gumy). Podobnie jak w przypadku wilgotności w stanie naturalnego zawilgocenia wilgotność sorpcyjna była najniższa dla próbek zawierających 30% frakcji „gumowej” (niższa w stosunku do betonu kontrolnego o 12%). Zawartość 20% rozdrobnionej gumy pozwoliła uzyskać wyniki niższe o 10%, a obecność 10% frakcji „gumowej” wartości niższe o 8,5%. Wyniki nasiąkliwości i podciągania kapilarnego wykazują dobitnie wyraźny związek między ilością rozdrobnionych odpadów gumowych a możliwością wchłaniania wody. Wzrost ilości miazgi i granulatu gumowego korzystnie osłabia możliwość wchłaniania przez próbkę wody, pod działaniem normalnego ciśnienia atmosferycznego. Nasiąkliwość zarówno wagowa, jak i objętościowa w przypadku betonów modyfikowanych rozdrobnionymi, zużytymi oponami samochodowymi w ilości 10% była niższa o około 13%, dodatek 20% spowodował spadek o prawie 20%, natomiast wyniki z zawartością 30% frakcji „gumowej” kształtowały się na poziomie niższym o 28%.

Zamieszczona w tabeli 4 ocena odporności betonów na jednoczesne działanie mrozu i 3% roztworu NaCl, opierając się na kryteriach stosowanej procedury badawczej [3] pokazuje, że betony modyfikowane rozdrobnionymi odpadami gumowymi oraz beton porównawczy charakteryzują się dobrą mrozoodpornością, wyznaczaną po 56 cyklach zamrażania i odmrażania, po których średnia masa złuszczeń powinna być mniejsza niż $0,20$ [kg/m^2] lub średnia masa złuszczeń m_{56} powinna być mniejsza niż $0,50$ [kg/m^2] i m_{56}/m_{28} powinno być mniejsze niż 2.

4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- rozdrobnione odpady gumowe, pochodzące ze zużytych opon samochodowych mogą stanowić częściowy substytut naturalnego kruszywa w produkcji betonu zwykłego,
- w przypadku betonów zwirowych na cemencie portlandzkim, charakteryzujących się $w/c=0,50$ dodatek frakcji „gumowej” powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 1 klasę, przy jednoczesnym uelastycznieniu ujawniającym się większą odkształcalnością,
- betony zawierające frakcję „gumową” charakteryzują się dobrą mrozoodpornością oraz mniejszą wilgotnością w stanie naturalnego zawilgocenia i wilgotnością sorpcyjną, niższą nasiąkliwością wagową i objętościową oraz ograniczonym podciąganiem kapilarnym w stosunku do betonów zawierających tylko kruszywo naturalne piaskowo - zwirowe.

LITERATURA

1. Goulias D.G., Ali A.H.: Enhancement of portland cement concrete with tire rubber particles, Proceedings of the Twelfth International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA 1996.
2. Grodzicka A.: Trwałość betonów wysokowartościowych w aspekcie oddziaływania zmian termicznych, praca naukowo – badawcza nr NB – 25, ITB, Warszawa 1999.
3. Horodecka R., Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P., Sybilski D.: Wykorzystanie zużytych opon samochodowych w budownictwie drogowym, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jacek Śliwiński