

dr inż. Ewa Oldakowska*

Ocena przydatności gumy ze zużytych opon samochodowych do modyfikacji chudych betonów przeznaczonych do podbudów drogowych

Assessment of suitability of rubber from used vehicle tyres for modification of lean concretes, designed for road foundations

Streszczenie. Podbudowa to istotny element konstrukcji nawierzchni drogowej, przenoszący obciążenia eksploatacyjne, powstające w wyniku działania ruchu drogowego, z górnych warstw nawierzchni na podłoże. W obecnej praktyce inżynierskiej do wykonywania podbudów stosuje się różne grunty, kruszywa, lepiszcza i spoiwa, dzięki czemu powstają podbudowy różniące się właściwościami wynikającymi z zastosowanych materiałów. Jednym z rozwiązań materiałowych jest zastosowanie chudego betonu. W artykule przedstawiono możliwość modyfikacji chudego betonu rozdrobnionymi odpadami gumowymi pochodzącymi ze zużytych opon samochodowych oraz wpływ rozdrobnionej gumy na wybrane właściwości prezentowanych podbudów.

Słowa kluczowe: chudy beton, podbudowa drogowa, rozdrobnione odpady gumowe.

Abstract. The road foundation is an important element of the road pavement design, transferring the operational loads caused by the road traffic from the upper layers to the substrate. In current engineering practice the road foundations are made from various soils, aggregates and binders, which allows to make the foundations of various properties resulting from used materials. One of the material solutions is use of lean concrete. The article presents the possibility of modification of the lean concrete with disintegrated rubber waste material from used vehicle tyres, and the influence of disintegrated rubber on selected properties of presented road foundations.

Keywords: lean concrete, road foundation, disintegrated rubber waste material.

Podbudowa to jedno- lub dwuwarstwowa dolna część konstrukcji nawierzchni drogowej, służąca do przenoszenia obciążeń od ruchu na podłoże. Jej przeznaczeniem jest zmniejszenie naprężeń pochodzących od nacisków kół samochodowych (skupiających się w warstwie ścieralnej na niewielkiej powierzchni styku koła z nawierzchnią), do wartości dopuszczalnego naprężenia, jakie może przemieścić podłoże [1]. Podbudowa, zgodnie z [2], powinna być na tyle jednorodna, równomiernie zagęszczona, by nie powodowała powstawania nadmiernych odkształceń, spękań i innych uszkodzeń wyżej położonych warstw, pozostając jednocześnie stopniowym przejściem od słabego podłoża do warstw o dużym module sztywności (warstwa wiążąca, ścieralna).

Obecnie w praktyce inżynierskiej do wykonywania podbudów stosuje się różne grunty, kruszywa, lepiszcza i spoiwa, dzięki czemu podbudowy różnią się właściwościami wynikającymi z zastosowanych materiałów.

Podbudowy z mieszanek kruszyw związanych spoiwem hydraulicznym

W budownictwie na całym świecie najpowszechniej stosowanym spoiwem hydraulicznym jest cement, którego wiązanie polega na hydratacji poszczególnych jego składników i twardnieniu w postaci sztywnej siatki krystalicznej. Samoistne odkształcenia reologiczne powstające podczas skurczu technologicznego warstw zawierających w swym składzie cement (np. chudy beton) prowadzą do powstawania mikrospekkań. Ułożenie warstw asfaltowych i obciążenie ruchem samochodowym nawierzchni drogowej wpływa na powiększanie się spekkań w podbudowie. Rozszerzanie i kurczenie się materiału podbudowy, w wyniku zmian temperatury i działania obciążenia kołem samochodowym, powoduje pojawianie się naprężeń rozciągających i ścinających w warstwach asfaltowych leżących nad spękaniem w podbudowie [1]. Początkowo powstają one w dolnej części warstw asfaltowych, a po pewnym czasie stają się zauważalne na powierzchni drogi.

W celu wzmocnienia lub przeciwdziałania propagacji spekkań konstrukcji nawierzchni stosuje się wbudowanie w warstwy nawierzchni geosyntetyków [4], powłok z poli-

meroasfaltów oraz innych tworzyw. Takie rozwiązania nie gwarantują jednak uniknięcia propagacji spekkań w nawierzchniach z podbudową ze spoiwem hydraulicznym, natomiast wiąże się ze znacznymi nakładami pracy i wysokimi kosztami. Próbą rozwiązania tego problemu jest zastosowanie rozdrobnionych zużytych opon samochodowych do podbudów z chudych betonów [5]. Guma może wpłynąć na ograniczenie lub likwidację spekkań odbitych oraz poprawić wybrane właściwości techniczne podbudów.

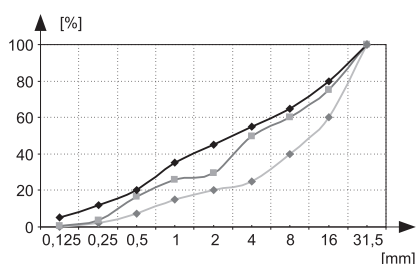
Badania własne

Składniki zastosowane do wykonania chudych betonów:

- cement portlandzki CEM I 32,5 spełniający wymagania [5, 6];
- piasek rzeczny płukany 0 ÷ 2 mm i mieszanka żwirowa 2 ÷ 31,5 mm o krzywej uziarnienia przedstawionej na rysunku 1;
- rozdrobnione odpady gumowe w postaci mieszaniny pyłu, miazgi i granulatu gumowego (uziarnienie 0 ÷ 2 mm), pochodzące ze zużytych opon samochodowych, wprowadzane do zarobu w miejsce kruszywa o takim samym uziarnieniu (wymiana objętościowa).

Przygotowano pięć serii mieszanek betonowych zawierających różną ilość rozdrobnionych odpadów gumowych oraz mieszanek ba-

* Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej

zującą wyłącznie na kruszywie naturalnym. Wszystkie mieszanki charakteryzowały się stałą zawartością cementu i składem granulometrycznym kruszywa. Receptury wykonanych mieszanek zaprezentowano w tabeli 1, w której 1, 2, 3, 4, 5 oznacza mieszankę zawierającą odpowiednio 1,3%, 2,6%, 4%, 5,6% i 7,3% rozdrobnionej gumy w stosunku do masy kruszywa, czyli 10%, 20%, 30%, 40% i 50% piasku wymieniono objętościowo na rozdrobnione zużyte opony samochodowe.

Zgodnie z recepturami przedstawionymi w tabeli 1 przygotowano normowe próbki walcowe średnicy $d = 160$ mm i wysokości $h = 160$ mm oraz płyty o wymiarach 600×600 mm i grubości 60 mm. Próbki walcowe zagęszczono metodą Proctora (2,5 kg ubijak, duża forma Proctora). Każdą z trzech warstw zagęszczano 80 uderzeniami ubijaka, kontrolowanego przez prowadnicę, spadającego z wysokości 30,5 cm. Natomiast płyty o wymiarach 600×600 mm i grubości 60 mm, z których wycinano pojedyncze próbki prostopadłościennie do badania trwałości zmęczeniowej, wstępnie zagęszczano za pomocą płyty wibracyjnej, po czym zagęszczanie kontynuowano ręcznym walcem o masie 165 kg i średnicy wału 50 cm z dostosowaną do formy szerokością zagęszczania, wynoszącą 60 cm. Wskaźnik zagęszczenia chudej mieszanki betonowej każdorazowo wynosił 98% maksymalnego zagęszczenia laboratoryjnego. Tak przygotowane próbki, po normowym okresie dojrzewania, poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości, mrozoodporności, gęstości objętościowej oraz badaniu trwałości zmęczeniowej, a także podjęto próbę oceny ich struktury z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej.

Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na normowych próbkach

Tabela 1. Receptury mieszanek betonowych

Wymagania	Chudy beton (kontrolny)	Beton z dodatkiem gumowym				
		1	2	3	4	5
Cement	130	130	130	130	130	130
Kruszywo (naturalne)	1 970	2 171	2 119	2 067	2 014	1 960
Rozdrobnione odpady gumowe	–	29	57	85	114	143
Woda	214	116	114	112	110	108

kach walcowych, ścisanych w kierunku osi walca, sporządzonych wg czterech pierwszych receptur zawartych w tabeli 1. Próbki chudego betonu wykonane wg wszystkich receptur poddano jedynie badaniom zmęczeniowym. **Badanie nasiąkliwości**, określające maksymalną masę wody wchłoniętą przez próbkę zanurzoną w wodzie, pod działaniem normalnego ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono na normowych próbkach po 28 dniach dojrzewania.

Odporność chudego betonu (kontrolnego i modyfikowanego) na działanie niskiej temperatury oceniano po 50 cyklach zamrażania i odmrażania, w programowalnej komorze klimatycznej do badania mrozoodporności wg normy [7]. Spadek wytrzymałości badanych próbek, pod wpływem cyklicznego zamrażania i odmrażania, określono w stosunku do wytrzymałości próbek kontrolnych przechowywanych w wodzie.

Gęstość objętościową chudego betonu oznaczono na podstawie masy oraz objętości próbek, a **badanie trwałości zmęczeniowej** przeprowadzono metodą czteropunktowego zginania belki prostokątnej (pryzmatycznej) zgodnie z normą [8] w maszynie wytrzymałościowej o hydraulicznym układzie obciążania. Badania prowadzono do momentu zniszczenia próbki (wyraźne pęknięcie i przełamanie próbki).

Badanie struktury stwardniałego zaczynu chudego betonu z dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych oraz kontrolnego zawierającego tylko kruszywo naturalne, wykonano z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego w Katedrze Inżynierii Materiałowej i Technologii Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej. Obserwacje prowadzono bez napyłania materiałem przewodzącym prąd elektryczny i bez konieczności stosowania wysokiej próżni.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości, mrozoodporności i gęstości objętościowej zamieszczono w tabeli 2, natomiast na rysunku 2 zaprezentowano interpretację graficzną zależności trwałości zmęczeniowej chudych betonów i chudych betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi od amplitudy naprężenia.

Tabela 2. Wyniki badań cech fizycznych i wytrzymałościowych chudych betonów przeznaczonych do podbudów drogowych

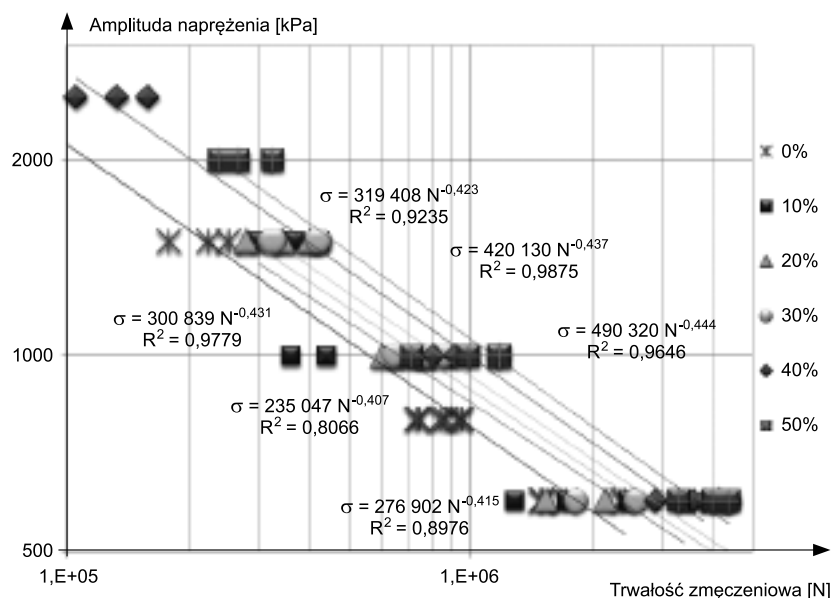
Wymagania	Chudy beton	Beton z dodatkiem gumowym*		
		10%	20%	30%
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 7 dniach po 28 dniach	5,5 9,0	4,9 8,0	4,4 6,8	4,0 6,0
Nasiąkliwość [%]	4,80	4,54	4,36	4,17
Mrozoodporność ΔR [%]	8,10	10,60	12,80	15,40
Gęstość objętościowa [kg/dm ³]	2,25	2,19	2,15	2,10

* ilość dodatku odpowiada wymienionej objętościowo frakcji piaskowej

Uzyskane wyniki wskazują, że obecność dodatku gumowego, niezależnie od jego ilości, wpływa zarówno na cechy fizyczne, jak i wytrzymałościowe badanych betonów. Chude betony zawierające 1,3% frakcji gumowej charakteryzują się 10% spadkiem wytrzymałości na ściskanie, zawartość gumy 2,6% obniża wytrzymałość o 24%, natomiast 4% daje wynik słabszy o 33%, ale jednocześnie mieszczący się w przedziałach wytrzymałości normowej ($3,5 \div 5,5$ MPa po 7 dniach i $6,0 \div 9,0$ MPa po 28 dniach). Wyniki badań cech fizycznych wskazują jednoznacznie, że wraz ze wzrostem ilości rozdrobnionej gumy uzyskujemy coraz korzystniejsze wartości – nasiąkliwość na poziomie 4,54%, 4,36% i 4,17% przy zawartości „modyfikatora” gumowego w ilości odpowiednio 1,3%, 2,6% oraz 4% jest niższa o ponad 5%, 9% i 13% w porównaniu z betonem kontrolnym.

Dodatek gumowy, w ilości występującej w badanych chudych betonach, nie zmienił istotnie odporności na działanie niskiej temperatury. Mrozoodporność, oznaczana jako spadek wytrzymałości betonu po 50 cyklach zamrażania i rozmrażania, nie przekroczyła 20% w każdym z badanych przypadków. Najniższym, bo 8% spadkiem charakteryzował się chudy beton bez dodatków, betony modyfikowane osiągnęły spadki 10,6%, 12,8% oraz 15,4% przy zawartości ponad 1,3%, 2,6% oraz 4% gumy. Z tabeli 2 wynika również, że gęstość objętościowa betonów zmienia się wraz ze wzrostem ilości „kruszywa gumowego”. Ma to związek z gęstością gumy, różniącą się znacznie od gęstości kruszywa naturalnego piaskowo-zwirowego; dodatek 1,3% to gęstość mniejsza o 2,6%, zaś 4% gumy to gęstość obniżona o ok. 7%.

Zaprezentowane na rysunku 2 wyniki badań laboratoryjnych wskazują na wyraźny związek między ilością rozdrobnionych odpadów gumowych a trwałością zmęczeniową badanych próbek. Dodatek gumowy za-



Rys. 2. Zależność trwałości zmęczeniowej chudych betonów i chudych betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi od amplitudy naprężenia

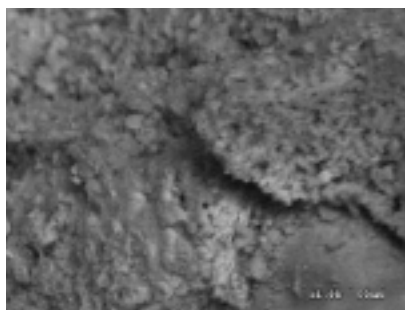
stępujący w 10% frakcję piaskową wpłynął na uzyskanie liczby obciążeń większej średnio o ok. 26%, dodatek w ilości odpowiadającej 20% piasku, to wyniki wyższe średnio o ok. 31%, natomiast w przypadku ilości gumy odpowiadającej 30%, 40% i 50% piasku uzyskano wyniki korzystniejsze odpowiednio o ponad 39%, 52% i prawie 60%. Zaznaczyć należy, że zniszczenie próbek modyfikowanych i niemodyfikowanych różniło się w zasadniczy sposób. Próbki bez dodatku gumowego ulegały mikrospękanom, po których następowało szybkie spękanie prowadzące do przełamania próbki. W przypadku próbek modyfikowanych pojawiały się pęknięcia i mikropęknięcia w bliskim sąsiedztwie gumy, ale nie następowało pęknięcie zniszczeniowe. Podczas badania obserwowano stopniową utratę wartości modułu sprężystości wraz ze wzrostem liczby cykli obciążeniowych.

Obserwacje prowadzone na przełamanych próbkach, z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego, umożliwiły ocenę wpływu rozdrobnionych odpadów gumowych pochodzących ze zużytych opon samochodowych na mikrostrukturę stwardniałego zaczynu cementowego. W chudych betonach kontrolnych występuje typowa, włóknista forma fazy C-S-H (fotografia 1), w skład której wchodzi mikrokryształy C_3S i C_2S oraz kryształy $Ca(OH)_2$. Przyjmuje ona postać trójkierunkowej siatki o budowie przestrzennie izomorficznej, przypominającej zeszytniałą gąbkę z pustkami (porami żelowymi).

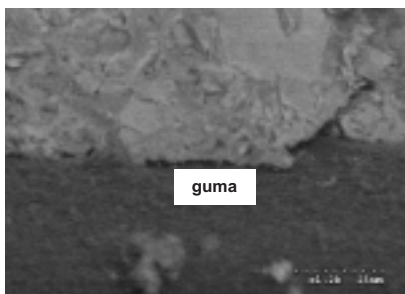
Dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych, w ilości występującej w badanych chudych betonach, nie wpływa na powstanie

fazy C-S-H. Nadal charakteryzuje się ona typową morfologią włóknistą z ujednorodnionym składem chemicznym (fotografia 2). W warstwie kontaktowej guma – zaczyn obserwujemy nieco więcej portlandytu $Ca(OH)_2$ z powodu lokalnie większego współczynnika w/c (migrująca woda w zaczynie tworzy wokół ziarna gumowego nieco grubszą warstwę).

Obserwacje mikroskopowe wskazują na różną postać stref kontaktowych. Występują strefy szczelne z silnie przylegającym



Fot. 1. Widok zaczynu cementowego w chudym betonie (powiększenie $\times 1000$)



Fot. 2. Widok zaczynu w chudym betonie zawierającym rozdrobnione odpady gumowe (powiększenie $\times 1200$)

zaczynem cementowym do ziarna gumowego oraz strefy o luźnej strukturze, będące słabszym ogniwem w przypadku działania bodźca zewnętrznego w postaci sił.

Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że:

- chude betony z różną zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych charakteryzują się lepszymi właściwościami fizycznymi niż betony niemodyfikowane (dodatek „gumowego kruszywa” wpływa na obniżenie gęstości i poprawę odporności na działanie wody). Chude betony modyfikowane gumą charakteryzują się niższą wytrzymałością na ściskanie od betonów bez udziału gumy, ale znacznie lepszą odkształcalnością, obserwowaną szczególnie przy zniszczeniu, którego charakter nie jest tak gwałtowny jak w betonach z kruszywem naturalnym;

- zastąpienie w chudej mieszance betonowej przeznaczonej do podbudów kruszywa naturalnego dodatkiem gumowym wpływa korzystnie na poprawę trwałości zmęczeniowej takiego betonu;

- zastosowanie rozdrobnionej gumy ma, poza poprawą wybranych właściwości, również ważny aspekt ekologiczny związany z zagospodarowaniem odpadów pochodzących ze zużytych opon samochodowych, których corocznie przybywa, a zgodnie z unijnymi dyrektywami nie można ich składować w całości od 1 lipca 2003 r., a od 1 lipca 2006 r. w stanie rozdrobnionym.

Fot. Autorka

Literatura

- [1] Piłat J., Radziszewski P., Nawierzchnie asfaltowe, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007.
- [2] Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P., Technologia materiałów i nawierzchni drogowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [3] Kossakowski M., Zabezpieczenie geosiatką nawierzchni przed spękaniami odbitymi, Drogownictwo nr 3, 2004.
- [4] Oldakowska E., Wpływ dodatku z rozdrobnionych opon samochodowych na właściwości techniczne podbudów drogowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok, 2010.
- [5] PN-EN 197-1:2002 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [6] PN-EN 197-2:2002 Cement – Część 2: Ocena zgodności.
- [7] PN-B-06250:1988 Beton zwykły.
- [8] PN-EN 12697-24:2008 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 24: Odporność na zmęczenie.