Inżynieria Ekologiczna
Vol. 40, 2014, 217–227
DOI: 10.12912/2081139X.84

ZASTOSOWANIE MIAŁU GUMOWEGO ZE ZUŻYTYCH OPON SAMOCHODOWYCH W MIESZANKACH MINERALNO-ASFALTOWYCH

Andrzej Plewa[1]

[1] Zakład Inżynierii Drogowej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok, e-mail: a.plewa@pb.edu.pl

STRESZCZENIE

Wraz z rozwojem przemysłu motoryzacyjnego systematycznie narasta problem utylizacji zużytych opon. Składowanie odpadów gumowych wiąże się z bardzo długim okresem rozkładu gumy w warunkach naturalnych. Z każdym rokiem równolegle rozwijane są technologie, które w przyszłości mogą istotnie wspierać recykling tego typu materiałów. Jednym z bezpiecznych dla środowiska rozwiązań utylizacji odpadów gumowych ze zużytych opon samochodowych jest modyfikacja asfaltów drogowych miałem gumowym. Bardzo ważnym aspektem wspierającym ekologiczne stosowania miału gumowego do modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) jest poprawa ich odporności na zmęczenie. W artykule przedstawiono rezultaty badań odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC16P i AC22P z lepiszczami gumowo-asfaltowymi. Badania wykonano metodą belki pryzmatycznej czteropunktowo zginanej – 4PB-PR. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe zróżnicowano ze względu na ilość zastosowanego dodatku miału gumowego w lepiszczu gumowo-asfaltowym. Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano poprawę właściwości funkcjonalnych mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych w odniesieniu do mieszanek z asfaltami niemodyfikowanymi.

Słowa kluczowe: lepiszcza gumowo-asfaltowe**,** mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe, beton asfaltowy, badanie czteropunktowego zginania (4PB-PR), trwałość zmęczeniowa MMA.

USE OF CRUMB RUBBER FROM USED CAR TIRES IN MINERAL ASPHALT MIXES

ABSTRACT

With the development of the automotive industry the disposal of used tires is constantly growing problem. Storage of waste rubber is associated with a very long period of decomposition of rubber in the natural conditions. Simultaneously new technologies are developed every year, which in the future may significantly promote recycling of this type of materials. The crumb rubbery modification of the road bitumen is the one of the environmentally safe solutions of rubbery decomposition. Improvement of resistance of the crumb rubbery modification of the road asphalt mixtures is the very important ecological aspect of the future. The article presents the results of research on the fatigue life resistance of asphalt concretes AC16P and AC22P with asphalt-rubber binders. The above analyses have been based on the results of

tests of fatigue life of mineral-rubber-asphalt mixes determined by the method of prismatic four-point bending (4PB-PR). Mineral-rubber -asphalt mixes have been diversified according to the amount of the additive of rubber fines in asphalt-rubber binder. On the basis of the test results have been proven improvements functional properties mineral-rubber-asphalt mixes compared with mineral-asphalt mixes with unmodified asphalt.

Keywords: asphalt-rubber binders, mineral-rubber-asphalt mixes, asphalt concrete, modified binder, test of four-point bending (4PB-PR), fatigue life of mineral-asphalt mixes.

WROWADZENIE

W ostatnich latach zarówno w Polsce jak i na świecie widoczna jest nieustająca tendencja wzrostu natężenia ruchu samochodowego. Dynamiczny rozwój motoryzacyjny sprawił, że z punktu widzenia ochrony środowiska, zagospodarowanie zużytych elementów pojazdów samochodowych, w tym także opon, wzrosło do rangi bardzo istotnego problemu ekologicznego. Przyjmuje się, że rocznie w Polsce powstaje około 120 tysięcy ton zużytych opon (tab. 1). Ze względu na gwałtowny progres rozwoju motoryzacji w naszym kraju, należy liczyć się z większym wzrostem odpadów samochodowych, niż było to przewidywane. W tabeli 1 przedstawiono informacje dotyczące ilości zarejestrowanych samochodów oraz zużycie opon samochodowych w niektórych krajach europejskich [Sybilski 2009].

Zasadniczy problem obciążenia środowiska naturalnego przez zużyte opony wiąże się z bardzo długim okresem naturalnego rozkładu gumy w warunkach naturalnych. Mieszanki gumowe stosowane do produkcji opon zawierają złożone z długich łańcuchów polimery, które ulegają biodegradacji w okresie do 100 lat. Dlatego wraz z rozwojem przemysłu motoryzacyjnego systematycznie narasta problem utylizacji zużytych opon. Istnieje kilka sposobów zagospodarowania zużytych opon. Obecnie

Tabela 1. Podaż zużytych opon w krajach UE i Polsce z uwzględnieniem rozwoju motoryzacji [Sybilski 2009]

Table 1. The supply of used tires in EU and Poland, taking into account the development of the automotive industry [Sybilski 2009]

Kraj	Liczba mieszkańców (mln)	Liczba samochodów/ /1000 mieszkańców	Zużycie opon (tys. ton/rok)
Francja	58	419	354
Niemcy	81	399	603
Włochy	58	520	330
Anglia	58	379	378
Hiszpania	39	321	202
Szwecja	8,7	213	119
Polska	**38,7**	**213**	**119**

w zakresie odzysku zużytego ogumienia należy wyróżnić przede wszystkim [Billiter i in. 1997, Takallou i Sainton 1992]:

- odzysk energetyczny, który polega na spalaniu opon w specjalnie do tego celu dostosowanych piecach,
- recykling materiałowy, który polega na przetworzeniu zużytych opon do postaci surowców gotowych do ponownego użycia i wytworzeniu z nich nowych produktów.

Z każdym rokiem równolegle rozwijają się technologie, które w przyszłości mogą istotnie wspierać recykling tego typu materiałów. Materiały otrzymywane z recyklingu zużytych opon samochodowych mają szerokie zastosowanie w nawierzchniach drogowych. Znacznie zmniejszają drgania, hałas oraz pylenie. Tego typu nawierzchnie są w stanie zmniejszyć hałas drogowy nawet do 20% oraz drgania wywołane przez pojazdy o więcej niż 15% [EKOGUMA 2004].

Zastosowanie odpadów gumowych zależne jest od ich stopnia rozdrobnienia. Obecnie, materiał otrzymany w wyniku recyklingu opon klasyfikuje się w zależności od wielkości cząstek rozdrobnionego produktu: strzępy, chipsy, granulat, miał [Pasiewicz i in.2005]. Jednym ze sposobów ponownego wykorzystania odpadów gumowych ze zużytych opon samochodowych jest modyfikacja asfaltów drogowych miałem gumowym. Miał gumowy jest to materiał pozyskiwany w wyniku rozdrobnienia zużytych opon na cząstki o wymiarach poniżej 1mm. Tego typu modyfikacja, w wyniku której powstaje lepiszcze gumowo-asfaltowe, rzadko jeszcze jest stosowana w Polsce. Badania naukowe prowadzone w kraju i zagranicą [Sybilski 2009, SCDT 2003, Radziszewski i in. 2004, Randy i in. 2007. Liseane i in. 2010, Reese 1994] wykazały, że dodatek ten polepsza właściwości reologiczne lepiszcza, a szczególnie rozszerza jego temperaturowy zakres lepkosprężystości. Jest to szczególnie istotne w regionie północno-wschodniej Polski, gdzie warunki klimatyczne, z punktu widzenia pracy nawierzchni drogowej, uważa się za jedne z najsurowszych w kraju [Radziszewski i in. 2011]. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe charakteryzują się polepszonymi właściwościami w zakresie temperatur eksploatacyjnych nawierzchni: wyższa trwałość zmęczeniowa, polepszona odporność na działanie wody oraz na koleinowanie. Poprawa właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych zależy od ilości i jakości dodatku gumowego oraz rodzaju zastosowanej mieszanki mineralno-asfaltowej [Sybilski 2009, SCDT 2003, Radziszewski i in. 2004, Sainton 1990].

Bardzo ważnym aspektem popierającym ekologiczne rozwiązanie stosowania miału gumowego do modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) jest poprawa ich odporności na zmęczenie. Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych to ich zdolność do przeciwstawiania się niszczącemu działaniu krótkotrwałych obciążeń wywoływanych przez poruszające się pojazdy. Jest ona istotnym czynnikiem warunkującym odpowiedni okres eksploatacji nawierzchni drogowej. Niedostateczny poziom odporności na zmęczenie przyczynia się do powstawania wielu nieodwracalnych uszkodzeń nawierzchni,

a w dalszej perspektywie do jej przyspieszonej degradacji [Radziszewski i in. 2011, Piłat i Radziszewski 2010, Skotwicki i Szydło 2005]. Trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych określa się jako liczbę cykli obciążeniowych powodujących obniżenie początkowego modułu sztywności o 50%. W warunkach laboratoryjnych zbadanie odporności na zmęczenie jest możliwe poprzez powtarzalne obciążanie próbek analizowanej mieszanki mineralno-asfaltowej. Warunki pomiarów mają na celu zasymulowanie rzeczywistej sytuacji występującej po wbudowaniu mieszanki w konstrukcję nawierzchni. Spośród znanych metod oznaczania trwałości zmęczeniowej najbardziej zbliżoną do warunków „in situ" jest oznaczanie odporności na zmęczenie w badaniu czteropunktowo zginanej belki pryzmatycznej prostopadłościennej, gdzie obciążenie przekazywane jest sinusoidalnie przy znanej częstotliwości i kryterium pomiaru [Piłat i Radziszewski 2010, Skotwicki i Szydło 2005].

PRZEDMIOT BADAŃ

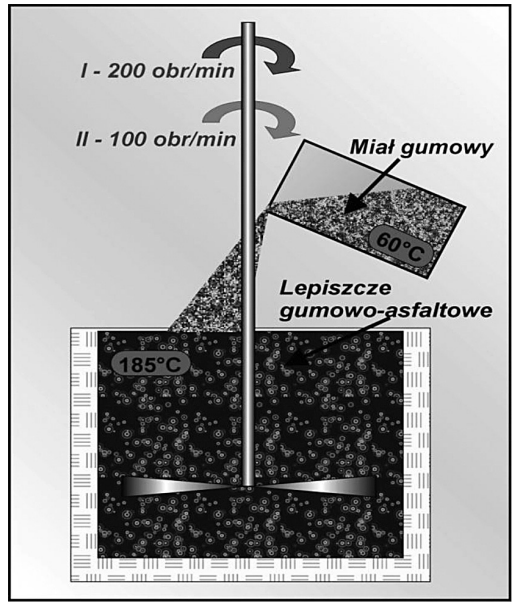
Lepiszcza gumowo-asfaltowe

Do wytworzenia mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P zastosowano lepiszcza gumowo-asfaltowe modyfikowane 15%, 18% i 21% dodatku miału gumowego do asfaltu. Do przygotowania lepiszczy modyfikowanych w laboratorium, jako asfalt wyjściowy wykorzystano asfalt 50/70. Modyfikację asfaltu 50/70 miałem gumowym ze zużytych opon samochodowych wykonano według następującej procedury (rys. 1):

- podgrzanie asfaltu 50/70 do temperatury 185 ^{o}C,
- podgrzanie miału gumowego do temperatury 60 ^{o}C,
- dodanie miału gumowego do asfaltu z równoczesnym szybkoobrotowym mieszaniem (200 obr/min), wymieszanie składników w mieszalniku w temperaturze 185^{o}C, w czasie 20 min.,
- wolnoobrotowe mieszanie (100 obr/min) w temperaturze 185 ^{o}C,
- całkowity czas mieszania lepiszczy gumowo-asfaltowych wynosił 1 h.

Mieszanki mineralno-asfaltowe typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P

Do badań laboratoryjnych odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA), wykorzystano mieszanki typu beton asfaltowy do warstwy podbudowy, kategorii ruchu KR3-6: AC 16P i AC 22P, zaprojektowane zgodnie z WT-2 2010 [GDDKiA 2010]. Mieszanki wykonano z zastosowaniem lepiszczy gumowo-asfaltowych 15%, 18% i 21% dodatku miału gumowego (zastosowane oznaczenia: LGA15, LGA18, LGA21) oraz asfaltu drogowego 50/70 (mieszanka mineralno-asfaltowa referencyjna). Zestawienie składników mieszanek betonów asfaltowych, zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 1. Laboratoryjny proces modyfikacji asfaltu drogowego miałem gumowym ze zużytych opon samochodowych
Fig. 1. Laboratory process of modifying asphalt bitumen to the rubber fines from used car tires

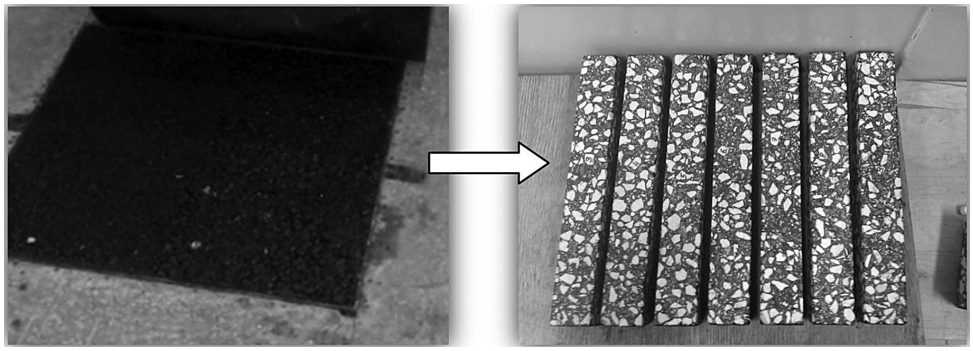
Tabela 2. Zestawienie składników mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P z zastosowaniem lepiszczy gumowo-asfaltowych i asfaltu 50/70
Tables 2. Composition of mineral-asphalt mixes AC 16P and AC 22P with asphalt-rubber bitumens and asphalt 50/70

Rodzaj materiału	AC 16P	AC 22P	AC 16P	AC 22P
	z (50/70 + MG) [zaw. składników w %]		z 50/70 [zaw. składników w %]	
Mączka wapienna	8,5	6,6	8,5	6,6
Piasek łamany 0/2	34,7	32,8	35,0	33,1
Grys 2/8	16,9	15,9	17,1	16,1
Grys 5/16	13,4	12,8	13,7	12,6
Grys 8/16	20,7	18,8	20,9	18,9
Grys 16/22	–	7,5	–	7,9
Lepiszcze asfaltowe	5,8	5,6	4,8	4,8
Zaw. wolnych przestrzeni (4%÷7%)	4,0	4,3	5,5	5,5

Przed przystąpieniem do badań, analizowane mieszanki mineralno-asfaltowe poddano oznaczeniom cech technicznych, zgodnie z wymogami WT-2 2010 (pkt. 8.2.1.3, tab.9) [GDDKiA 2010]. Przeprowadzone badania mieszanek mineralno-asfaltowej wykazały spełnienie wszystkich wymagań technicznych.

Przygotowanie próbek pryzmatycznych z betonu asfaltowego

Przygotowanie próbek do badań, polegało na uformowaniu metodą wałowania w warunkach laboratoryjnych „płyt" z mieszanek mineralno-asfaltowych o wymiarach 80x400x600mm (rys. 2). Następnie, po 24 h z płyt wycinano 7 próbek pryzmatycznych o wymiarach 55×55×400 mm. Wycięte próbki przechowywano „do odprężenia" przez 14 dni. Przed oznaczaniem, próbki sezonowano w temperaturze badania 10 °C przez 6 godzin.



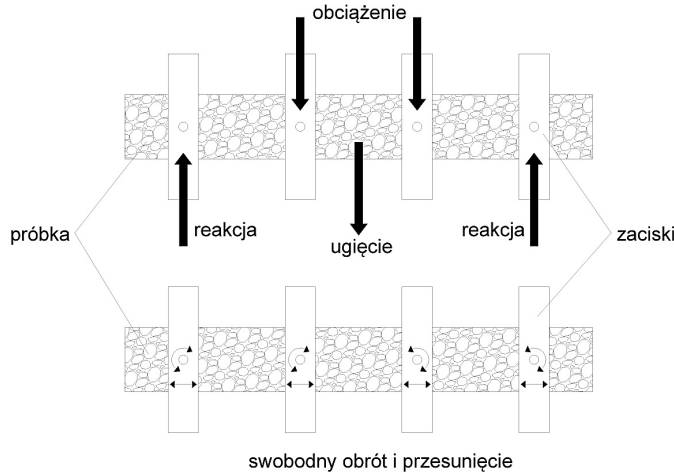
Rys. 2. Widok próbek pryzmatycznych z betonu asfaltowego o wymiarach 55×55×400mm wycięte z płyty o wymiarach 80x400x600mm uformowanej metodą wałowania.
Fig. 2. View prismatic specimens of the asphalt concrete with dimensions of 55x55x400 mm cut plate having a size 80x400x600mm formed by rolling method

BADANIA ODPORNOŚCI NA ZMĘCZENIE MMA AC 16P I AC 22P

Oznaczenia odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano w urządzeniu UTM-25 w Laboratorium Drogowym Zakładu Inżynierii Drogowej na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej.

Metoda badania odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych polega na poddaniu próbki pryzmatycznej czteropunktowemu cyklicznemu zginaniu z zachowaniem swobodnego obrotu oraz poziomego przesunięcia we wszystkich punktach obciążenia i reakcji (rys. 3). Obciążenie zginające działa w dwóch centralnych punktach na kierunku pionowym, prostopadle do osi próbki i ma charakter sinusoidalny. Skrajne punkty podparcia belki pozostają nieruchome w płaszczyźnie pionowej.

Badanie odporności na zmęczenie w czteropunktowym zginaniu przeprowadza się zgodnie z normą PN-EN 12697-24. Odporność na zmęczenie jest to obniżenie wytrzymałości materiału pod wpływem cyklicznego obciążania. Celem oznaczenia jest określenie charakterystyki zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych jako funkcji liczby obciążeń do „zniszczenia" próbki w zależności od odkształcenia. Badanie zostaje zakończone w przypadku osiągnięcia przez próbkę 50% wartości początkowego modułu sztyw-



Rys. 3. Schemat zamontowania próbki z MMA w aparacie czteropunktowego zginania
Fig. 3. Schema of the anchorage prismatic specimens with asphalt concrete on the four--point bending camera

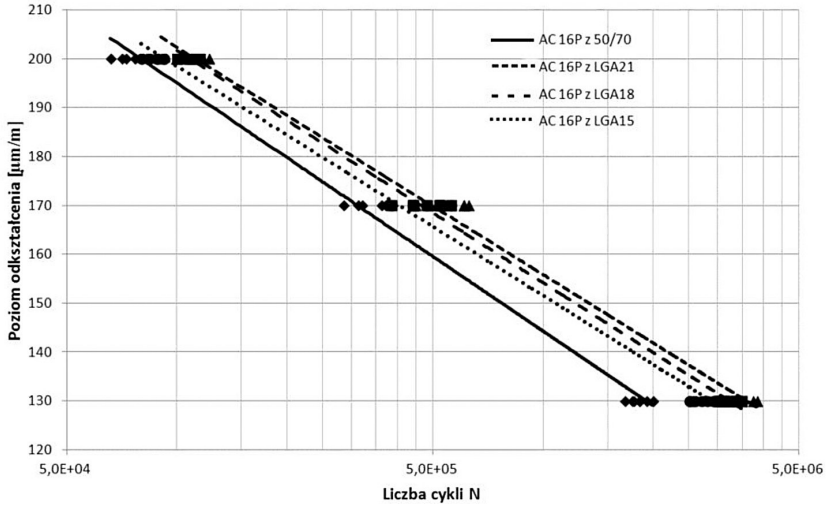
ności wyznaczonego w 100-nym cyklu obciążenia. W procesie badawczym belkę należy umieścić w aparacie w taki sposób aby kierunek, w którym ją zagęszczano zorientowany był prostopadle do obciążenia.

Badania trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P, przeprowadzono przy częstotliwości odkształceń 10 Hz. Poziomy amplitud odkształceń postaciowych przyjęto: 130 μm/m, 170 μm/m i 200 μm/m. Za kryterium zmęczenia przyjęto stan wytężenia próbki, gdy jej moduł sztywności obniży się o 50% w stosunku do wartości początkowej modułu określonej w setnym cyklu badania. Badaniom poddano od 5 do 7 próbek jednej mieszanki mineralno-asfaltowych (jednakowe uziarnienie MMA z jednym rodzajem lepiszcza asfaltowego) na jednym poziomie odkształcenia.

Oznaczenia trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P przeprowadzono w temperaturze badania 10°C. Jest to równoważna średnioroczna temperatura „pracy" warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych podczas eksploatacji w konstrukcji nawierzchni drogowej na terenie Polski [Radziszewski, Piłat, Plewa, Kowalski, Król, Sarnowski, Łaszkiewicz 2011].

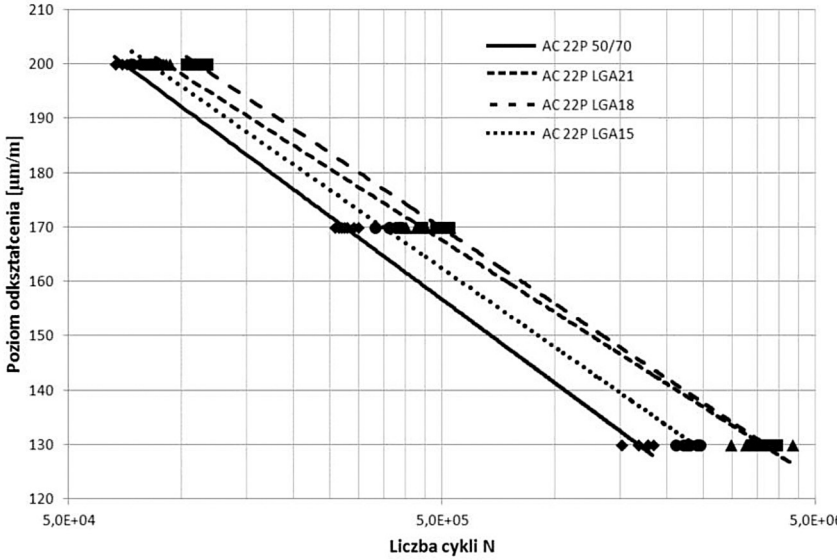
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na rysunkach 4 i 5, w sposób graficzny przedstawiono wyniki badań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P z zastosowaniem lepiszczy gumowo-asfaltowych i asfaltem 50/70 oznaczone na poziomach odkształcenia 130 μm/m, 170 μm/m i 200 μm/m.



Rys. 4. Wykres charakterystyk trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P na różnych poziomach odkształcenia postaciowego (temperatura badania 10 °C)

Fig. 4. Graph of the fatigue life of mineral-asphalt mixes type asphalt concrete AC 16P at different levels strain (test temperature 10 °C)



Rys. 5. Wykres charakterystyk trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 22P na różnych poziomach odkształcenia postaciowego (temperatura badania 10 °C)

Fig. 5. Graph of the fatigue life of mineral-asphalt mixes type asphalt concrete AC 22P at different levels strain (test temperature 10 °C)

Na podstawie uzyskanych wyników badań trwałości zmęczeniowej należy stwierdzić, że najwyższą odpornością na zmęczenie charakteryzują się mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe z lepiszczem modyfikowanym 21% dodatku miału gumowego (AC 16P LGA21, AC 22P LGA21), natomiast najmniejszymi – mieszanki z asfaltem niemodyfikowanym 50/70. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe, w odniesieniu do mieszanek (AC) z asfaltem 50/70, wykazują dwukrotnie wyższą trwałość zmęczeniową na poziomie odkształcenia postaciowego 130 μm/m. Analizując trwałość zmęczeniową betonów asfaltowych z lepiszczami gumowo-asfaltowymi należy stwierdzić, że ich trwałość wzrasta wraz ze wzrostem dodatku miału gumowego w lepiszczu gumowo-asfaltowym.

Należy zauważyć, że mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe odznaczają się mniejszym nachyleniem linii trendu odporności na zmęczenie do osi „x" wykresu, w porównaniu z mieszankami z zastosowaniem asfaltu 50/70. Przy wyższych poziomach odkształceń (200 μm/m) trwałość zmęczeniowa mieszanek modyfikowanych miałem gumowym zbliża się do wartości trwałości zmęczeniowej mieszanek z asfaltem 50/70, natomiast przy niższych poziomach odkształceń (130 μm/m) mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe przyjmują wartości odporności na zmęczenie dwukrotnie większe. Można więc postawić tezę, że mieszanki mineralno-asfaltowe typu beton asfaltowy (AC) z lepiszczem gumowo-asfaltowym będą bardzo dobrze funkcjonowały np. w konstrukcjach o wydłużonym okresie eksploatacji, gdzie występują relatywnie małe odkształcenia postaciowe rzędu 60–70 μm/m.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P z zastosowaniem lepiszczy gumowo-asfaltowych stwierdzono, że:

1. Z punktu widzenia ochrony środowiska, zagospodarowanie zużytych opon samochodowych, wzrosło do rangi bardzo istotnego problemu ekologicznego. Przyjmuje się, że rocznie w Polsce powstaje około 120 tysięcy ton zużytych opon. Ze względu na gwałtowny progres rozwoju motoryzacji w naszym kraju, należy liczyć się z większym wzrostem odpadów samochodowych, niż było to przewidywane.
2. Materiały otrzymywane z recyklingu zużytych opon samochodowych mają szerokie zastosowanie w nawierzchniach drogowych. Zmniejszają drgania i hałas drogowy. Tego typu nawierzchnie są w stanie zmniejszyć hałas drogowy nawet do 20% oraz drgania wywołane przez pojazdy o więcej niż 15%.
3. Jednym ze sposobów ponownego wykorzystania odpadów gumowych ze zużytych opon samochodowych jest modyfikacja asfaltów drogowych miałem gumowym. Badania naukowe wykazały, że dodatek ten polepsza właściwości

reologiczne lepiszcza, a szczególnie rozszerza jego temperaturowy zakres lepkosprężystości. Jest to szczególnie istotne w regionie północno-wschodniej Polski, gdzie warunki klimatyczne, z punktu widzenia pracy nawierzchni drogowej, uważa się za jedne z najsurowszych w kraju.

4. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe charakteryzują się polepszonymi właściwościami w zakresie temperatur eksploatacyjnych nawierzchni: wyższa trwałość zmęczeniowa, polepszona odporność na działanie wody oraz na koleinowanie.
5. Bardzo ważnym aspektem popierającym ekologiczne rozwiązanie – stosowania miału gumowego do modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych jest poprawa ich odporności na zmęczenie.
6. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe, wykazują dwukrotnie wyższą trwałość zmęczeniową w odniesieniu do betonów asfaltowych z asfaltem 50/70 na poziomie odkształcenia 130 μm/m.
7. Spośród badanych mieszanek, najbardziej korzystnymi parametrami charakteryzują się mieszanki betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 21% dodatku miału gumowego do asfaltu, zaś „najniższymi" mieszanki z asfaltem drogowym 50/70.
8. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe odznaczają się inną charakterystyką odporności na zmęczenie, w porównaniu z mieszankami z zastosowaniem asfaltu 50/70. Przy wyższych poziomach odkształceń ich trwałość zmęczeniowa zbliżona jest do wartości określonej dla mieszanek z asfaltem niemodyfikowanym, natomiast przy niższych poziomach odkształceń mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe przyjmują wartości odporności na zmęczenie dwukrotnie wyższe.

BIBLIOGRAFIA

1. Sybilski D. 2009. Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym. Przegląd Budowlany 5, 37–44.
2. Billiter T.C., Davison R.R., Glover C.J., Bullin J.A.. 1997. Physical properties of asphalt-rubber binder. Petroleum Science and Technology, Vol. 15, 205–236.
3. Takallou, H. B., Sainton, A. 1992. Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber. Transportation Research Board, 23–29.
4. EKOGUMA. 2004. Wprowadzenie do recyklingu opon. Stowarzyszenie Przemysłu Gumowego.
5. Parasiewicz W., Pyskło L., Magryta J. 2005. Recykling zużytych opon samochodowych. Instytut Przemysłu Gumowego „STOMIL". Piasków.
6. SCDT. 2003. State of California Department of Transportation. Asphalt Rubber Usage Guide, Sacramento, USA.
7. Radziszewski P., Piłat J., Plewa A. 2004. Influence of amount of crumb rubber of used car tires and heating time on rubber asphalt properties. The Nineteenth International

Conference on Solid waste technology and management, Philadelphia, March 21-24 2004, University of Pennsylvania, Widener University. Philadelphia.
8. Randy C.W., Gale C.P., John G.V., Bouzid C. 2007. Effect of Tire Rubber Grinding Method on Asphalt-Rubber Binder Characteristics. Journal of the Transportation Research Board, 134–140.
9. Liseane P.T., Glicério T., Jorge C.P., Paulo A.A. 2010. Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. Construction and Building Materials, Vol. 24, 1193–1200.
10. Reese R.E. 1994. Development of a physical property specification for asphalt-rubber binder. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63, 373–413.
11. Sainton A. 1990. Advantages of asphalt rubber binder for porous asphalt concrete. Transportation Research Board, 69–81.
12. Radziszewski P., Piłat J., Plewa A., Kowalski K., Król J., Sarnowski M., Łaszkiewicz A. 2011. Analiza możliwości wykorzystania kruszyw polodowcowych z rejonu Polski północno-wschodniej w konstrukcjach nawierzchni asfaltowej dla ruchu ciężkiego i bardzo ciężkiego oraz nawierzchni asfaltowych o wydłużonym okresie trwałości zmęczeniowej. GDDKiA, Warszawa.
13. Piłat J., Radziszewski P. 2010. Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
14. Skotnicki Ł., Szydło A. 2005. Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych i mineralno-cementowo-emulsyjnych. Drogownictwo 10.
15. GDDKiA 2010. Wymagania techniczne WT-2 2010. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno asfaltowe – załącznik nr 2 do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r.