

# APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

## Ocena odporności na zmęczenie betonów asfaltowych w badaniu czteropunktowego zginania 4PB-PR

ANDRZEJ PLEWA

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA,  
ZAKŁAD INŻYNIERII DROGOWEJ

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

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono rezultaty badań odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P z lepiszczami modyfikowanymi. Badania wykonano metodą belki pryzmatycznej czteropunktowo zginanej – 4PB-PR zgodnie z PN-EN 12697-24. Mieszanki mineralno-asfaltowe zróżnicowano ze względu na rodzaj zastosowanego lepiszcza: elastomeroasfalt, lepiszcze gumowo-asfaltowe oraz asfalt drogowy 50/70. Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano poprawę właściwości funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem lepiszczy modyfikowanych w odniesieniu do mieszanek z asfaltami niemodyfikowanymi.

### The assessment of fatigue liferesistance of asphalt concretes in four-point bending 4PB-PR tests

**Keywords:** mineral-asphalt mixes, asphalt concrete, modified binder, mineral-asphalt mixes of high stiffness modulus, test of four-point bending (4PB-PR), fatigue life of mineral-asphalt mixes

### ABSTRACT

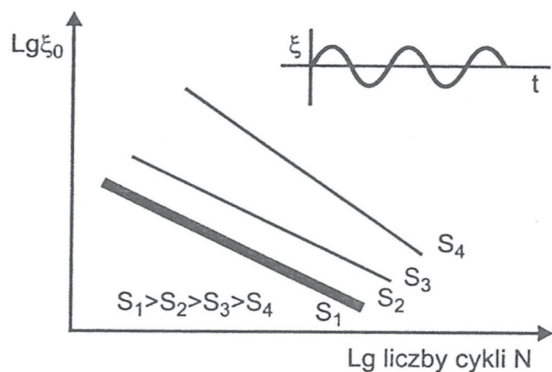
The article presents the results of research on the fatigue life resistance of asphalt concretes AC 16P and AC 22P with modified binders. The above analyses have been based on the results of tests of fatigue life of mineral-asphalt mixes determined by the method of prismatic four-point bending (4PB-PR). Mineral-asphalt mixes have been diversified according to the type of asphalt: elastomeroasphalt, rubber-asphalt and asphalt 50/70. On the basis of the test results have been proven improvements functional properties mineral-asphalt mixes with modified binder compared with mineral-asphalt mixes with unmodified asphalt.

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach zarówno w Polsce, jak i na świecie widoczna jest nieustająca tendencja wzrostu natężenia ruchu samochodowego. W Polsce, na przełomie ostatnich dwudziestu lat, średni dobowy ruch pojazdów ciężarowych wzrósł co najmniej dwukrotnie [1]. Niebagatelny przyrost liczby pojazdów przyczynia się do coraz większej degradacji sieci komunikacyjnej. W budownictwie drogowym w Europie oraz w Polsce technologie nawierzchni asfaltowych stanowią około 90% ogólnej długości dróg o nawierzchniach twardych. Ze względów technicznych i ekonomicznych wymaga się obecnie, aby nowoczesne nawierzchnie dróg były coraz bardziej odporne na zniszczenia powodowane oddziaływaniem ruchu samochodowego i środowiska, a przy tym charakteryzowały się wysoką trwałością zmęczeniową. Trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych ma największy wpływ na czas eksploatacji konstrukcji nawierzchni drogowych. Dotychczasowe opracowania naukowe świadczą o tym, że najskuteczniejszym rozwiązaniem zwiększającym czas eksploatacji nawierzchni drogowych jest stosowanie mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczami modyfikowanymi [2-9]. Znanych jest wiele metod modyfikacji lepiszczy asfaltowych, w różnicowany sposób wpływających na zmianę właściwości reologicznych lepiszczy (dodatki elastomerów, plastomerów, pochodnych kauczuków, utleniaczy). Jednym z dodatków modyfikujących, rzadko jeszcze stosowanym na dużą skalę w Polsce, jest dodatek miazgi gumowej ze zużytych opon samochodowych. Badania naukowe prowadzone w kraju i za granicą [6-8] wykazały, że dodatek ten polepsza właściwości reologiczne lepiszcza, a szczególnie rozszerza jego temperaturowy zakres lepkości. Jest to szczególnie istotne w regionie północno-wschodniej Polski, gdzie warunki klimatyczne, z punktu widzenia pracy nawierzchni drogowych, uważa się za jedno z najsurowszych w kraju [9]. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe charakteryzują się polepszonymi właściwościami w zakresie temperatur eksploatacyjnych nawierzchni takimi, jak: odporność na działanie wody oraz odporność na koleinowanie i trwałość zmęczeniową. Poprawa właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych zależy od ilości i jakości dodatku gumowego oraz rodzaju zastosowanej mieszanki mineralno-asfaltowej [6-8].

Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych to ich zdolność do przeciwstawiania się niszczącemu działaniu krótkotrwałych obciążeń wywołanych przez poruszające się pojazdy. Jest ona istotnym czynnikiem warunkującym odpowiedni okres eksploatacji nawierzchni drogowych. Niedostateczny poziom odporności na zmęczenie przyczynia się do powstawania wielu nieodwracalnych uszkodzeń nawierzchni, a w dalszej perspektywie do jej przyspieszonej degradacji [2, 9, 10]. 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 [2, 10]. Jednym z parametrów decydujących o odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na zmęczenie jest moduł sztywności. Parametr ten wpływa również na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje lepkoplastyczne. Jest to bardzo istotna cecha MMA, a jej poziom w głównej mierze zależy od rodzaju i ilości zastosowanego lepiszcza w mieszance. Jednak wzrost wartości modułu sztywności nie jest wprost proporcjonalny do gradientu podniesienia trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych [2]. Rysunek 1 przedstawia zależność między wartością modułu sztywności a poziomem trwałości zmęczeniowej. Badania dowodzą, że mieszanki sztywniejsze charakteryzują się niższą trwałością zmęczeniową, dlatego uważa się, iż bardzo ważnym parametrem decydującym o trwałości MMA jest jej moduł sztywności [2]. Mieszanki mineralno-asfaltowe, przeznaczone do nawierzchni o największym obciążeniu ruchem drogowym, powinny charakteryzować się wysoką odpornością na zmęczenie przy równocześnie niskiej odkształcalności. Należy mieć na uwadze fakt, że odporność MMA na zmęczenie zapewniana jest przez „jakość” zastosowanego w niej lepiszcza

asfaltowego, którego parametry lepkosprężyste przekładają się bezpośrednio na czas relaksacji naprężeń w MMA. Wynika z tego wniosek, że przy doborze lepiszcza do mieszanki mineralno-asfaltowej należy dążyć do kompromisu, który pozwoli na uzyskanie optymalnych właściwości MMA, zbalansowanych pomiędzy wysoką odpornością na zmęczenie oraz niską podatnością na deformacje [2,10].



**Rysunek 1** Wpływ modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej na trwałość zmęczeniową (badanie przeprowadzone przy stałej wartości odkształcenia), gdzie:  $\xi_0$  – odkształcenie postaciowe próbek z MMA,  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – moduł sztywności próbek z MMA,  $\xi$  – stała wartość odkształcenia zadanego cyklu obciążenia,  $t$  – czas cykli obciążenia [2]

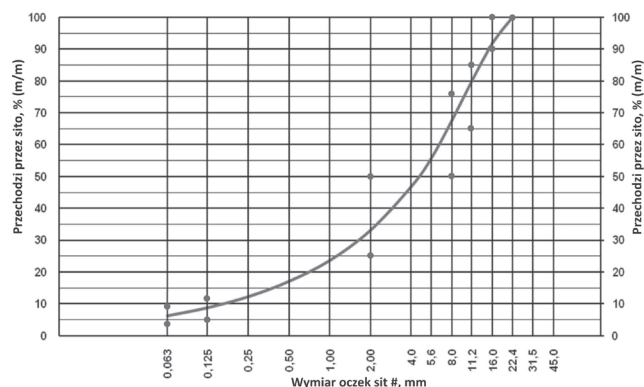
**Figure 1** Influence of modulus stiffness on the fatigue life mineral-asphalt mixes (test was performed at constant strain values);  $\xi_0$  – strain samples HMA,  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – stiffness modules samples HMA,  $\xi$  – constant strain value of load cycle,  $t$  – time of load cycles [2]

## 2. PRZEDMIOT BADAŃ – MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE TYPU BETON ASFALTOWY AC 16P I AC 22P

### 2.1 Skład mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC

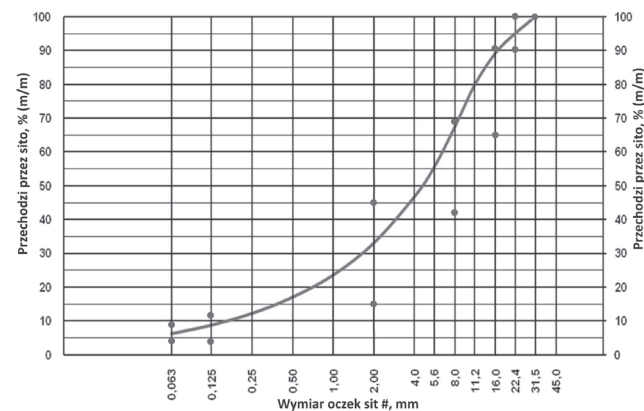
Do badań laboratoryjnych odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych w badaniu 4-punktowego zginania 4PB-PR, wykorzystano mieszanki typu beton asfaltowy do warstwy podbudowy, kategorii ruchu KR3-6: AC 16P i AC 22P, zaprojektowane zgodnie z WT-2 2010 [11]. Mieszanki wykonano z zastosowaniem następujących lepiszczy asfaltowych: lepiszcze gumowo-asfaltowe (asfalt 50/70 modyfikowany 18% dodatku miazgi gumowego), elastomeroasfalt PMB 25/55-60 oraz asfalt drogowy 50/70. Mieszanki mineralno-asfaltowe zaprojektowano przy wykorzystaniu aplikacji „MASA”. Krzywe uziarnienia agregatu mineralnego mieszanek AC 16P i AC 22P przed-

stawiono odpowiednio na Rysunkach 2 i 3. Ze-stawienie składników mieszanek betonów asfaltowych, zamieszczono w Tabeli 1.



**Rysunek 2** Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej betonu asfaltowego AC 16P

**Figure 2** Granulation curve of mineral aggregate in the asphalt concrete AC 16P



**Rysunek 3** Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej betonu asfaltowego AC 22P

**Figure 3** Granulation curve of mineral aggregate in the asphalt concrete AC 22P

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) [11]. Przeprowadzone badania mieszanek mineralno-asfaltowych wykazały spełnienie wszystkich wymagań technicznych.

### 2.2 Przygotowanie próbek pryzmatycznych z betonu asfaltowego

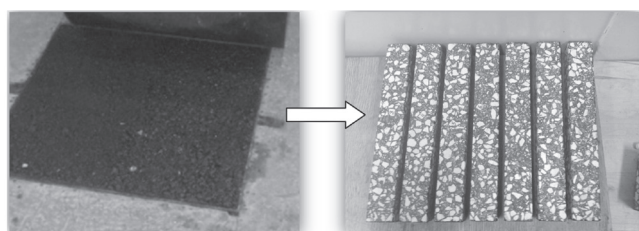
Przygotowanie próbek do badań polegało na uformowaniu metodą wałowania w warunkach laboratoryjnych „płyt” z mieszanek mineralno-asfaltowych o wymiarach 80x400x600 mm (Rys. 4). Następnie, po 24h z płyt wycinano 7 próbek pryzmatycznych o wymiarach 55x55x400 mm.

**Tabela 1** Zestawienie składników mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P z zastosowaniem: lepiszcza gumowo-asfaltowego, elastomeroasfaltu PMB 25/55-60 i asfaltu 50/70

**Table 1** Composition of mineral-asphalt mixes AC 16P and AC 22P with: asphalt-rubber, elastomeroasphalt PMB 25/55-60 and asphalt 50/70

Rodzaj materiału	AC 16P	AC 22P	AC 16P	AC 22P	AC 16P	AC 22P
	z (50/70+18%MG) [zaw. składników w %]		z PMB 25/55-60 [zaw. składników w %]		z 50/70 [zaw. składników w %]	
mączka wapienna	8,5	6,6	8,5	6,6	8,5	6,6
piasek łamany 0/2	34,7	32,8	35,0	33,1	35,0	33,1
grys 2/8	16,9	15,9	17,1	16,6	17,1	16,1
grys 5/16	13,4	12,8	13,9	12,8	13,7	12,6
grys 8/16	20,7	18,8	20,9	18,9	20,9	18,9
grys 16/22	-	7,5	-	7,6	-	7,9
Lepiszczce asfaltowe	5,8	5,6	4,6	4,4	4,8	4,8
Zaw. wolnych przestrzeni (4%÷7%)	4,0	4,3	6,1	5,8	5,5	5,5

Wycięte próbki przechowywano „do odprężenia” przez 14 dni. Przed oznaczaniem próbki sezonowano w temperaturze badania 10°C przez 6 godzin.



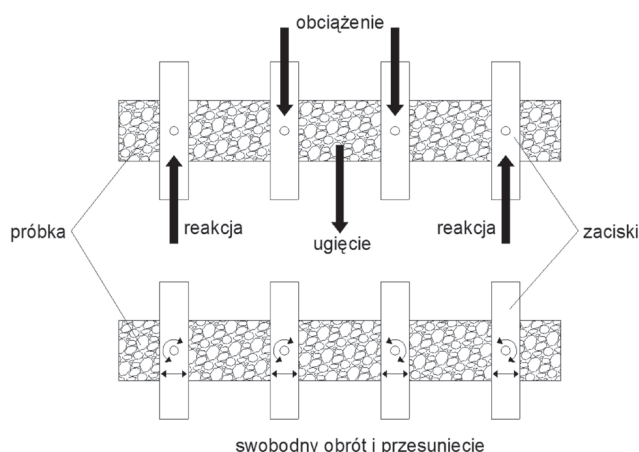
**Rysunek 4** Widok próbek pryzmatycznych z betonu asfaltowego o wymiarach 55x55x400 mm wyciętych z płyty o wymiarach 80x400x600 mm uformowanej metodą wałowania

**Figure 4** View prismatic specimens of the asphalt concrete with dimensions of 55x55x400 mm cut plate having a size 80x400x600 mm formed by rolling method

### 3. BADANIA ODPORNOŚCI NA ZMĘCZENIE MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH TYPU BETON ASFALTOWY 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 cy-

klicznemu zginaniu z zachowaniem swobodnego obrotu oraz poziomego przesunięcia we wszystkich punktach obciążenia i reakcji (Rys. 5). Obciążenie zginające działa w dwóch centralnych punktach na kierunku pionowym, prostopadłe do osi próbki i ma charakter sinusoidalny. Skrajne punkty podparcia belki pozostają nieruchome w płaszczyźnie pionowej.



**Rysunek 5** Schemat zamontowania próbki z MMA w aparacie czteropunktowego zginania

**Figure 5** Schema of the anchorage prismatic specimens with asphalt concrete on the four-point bending camera

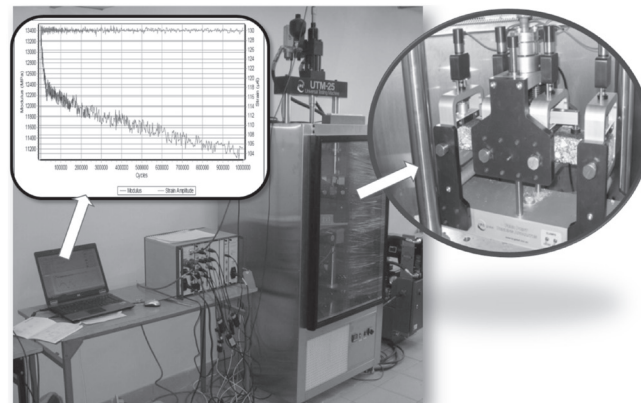
Badanie odporności na zmęczenie w czteropunktowym zginaniu przeprowadza się zgodnie z normą PN-EN 12697-24 [12]. Odporność na zmęczenie jest to obniżenie wytrzymałości materia-



tu pod wpływem cyklicznego obciążenia. Celem oznaczenia jest określenie charakterystyki zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych jako funkcji liczby obciążeń do „zniszczenia” próbek w zależności od odkształcenia. Badanie zostaje zakończone w przypadku osiągnięcia przez próbkę 50% wartości początkowego modułu sztywności wyznaczonego w setnym cyklu obciążenia (Rys. 6). W procesie badawczym belkę należy umieścić w aparacie w taki sposób, aby kierunek, w którym ją zagęszczano, zorientowany był prostopadle do obciążenia.

Urządzenie UTM-25 do badań odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono na Rysunku 7. W skład aparatury badawczej wchodzi: system obciążający z siłownikiem, rama zginająca z zaciskami, system kontrolny ruchów siłownika, czujnik siły, przetwornik przemieszczenia, elektroniczny system zbierania danych, komora termostatyczna. Kompletnie urządzenie jest sprawdzane (kalibrowane) przy pomocy aluminiowej belki referencyjnej o oznaczonym module sztywności.

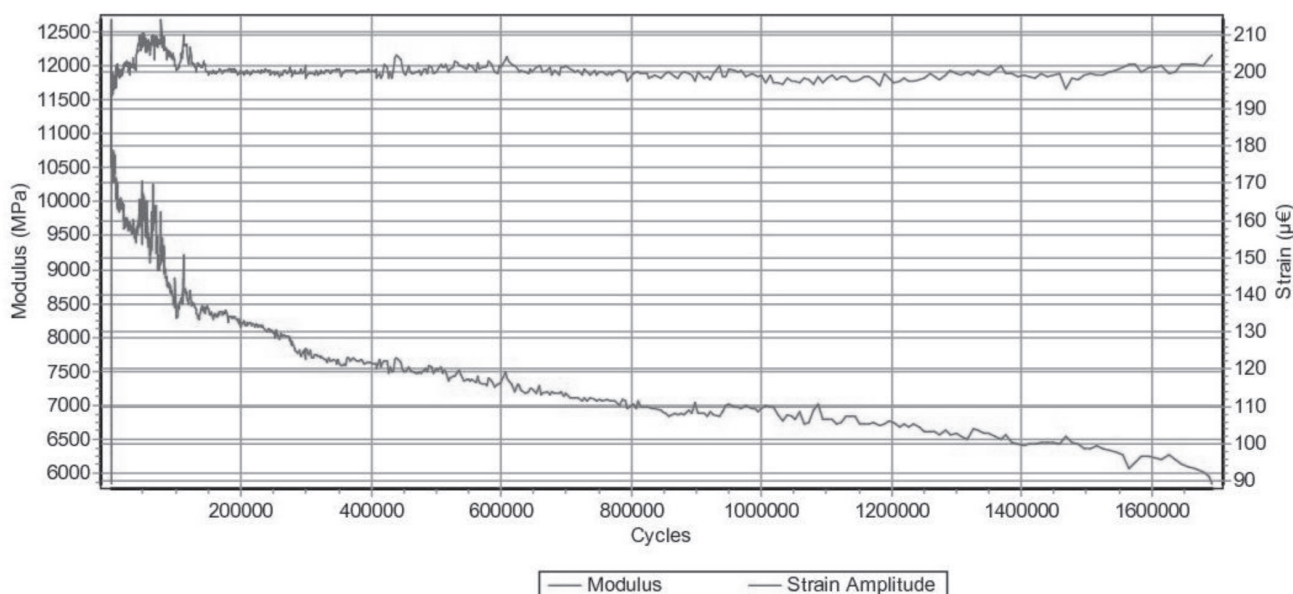
Do oprogramowania obsługującego urządzenie należy wprowadzić zarówno dane dotyczące cech fizycznych poszczególnych próbek, jak i wymagane parametry badania: masa próbki, długość próbki, wysokości i szerokości próbki w miejscach przyłożenia obciążenia oraz reakcji, temperatura badania, częstotliwość obciążenia, amplituda odkształcenia.



Rysunek 7 Maszyna wytrzymałościowa UTM-25

Figure 7 The testing machine UTM-25

Badania trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P przeprowadzono przy częstotliwości odkształceń 10Hz. Przyjęto następujące poziomy amplitud odkształceń postaciowych: 130  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 170  $\mu\text{m}/\text{m}$  i 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Za kryterium zmęczenia przyjęto stan wyłączenia próbki, w którym jej moduł sztywności obniży się o 50% w stosunku do wartości początkowej modułu określonej w setnym cyklu badania [12]. Badaniom poddano od 5 do 7 próbek jednej mieszanki mineralno-asfaltowej (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”



Rysunek 6 Przykład charakterystyki zmęczeniowej mieszanki mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy AC 16P, przy odkształceniu 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  w temperaturze badania 10°C

Figure 6 Example of the fatigue life characteristic of the mineral-asphalt mixes type asphalt concrete AC 16P at 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  strain in the temperature test 10°C

warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych podczas eksploatacji w konstrukcji nawierzchni drogowej na terenie Polski [9].

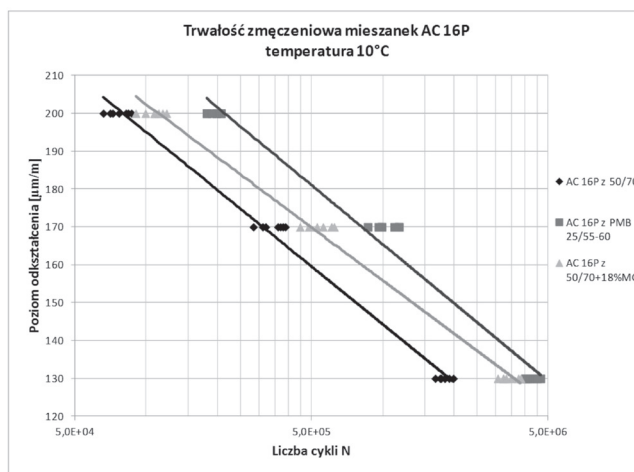
#### 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ODPORNOŚCI NA ZMĘCZENIE MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH TYPU BETON ASFALTOWY AC 16P I AC 22P

Na Rysunkach 8 i 9 w sposób graficzny przedstawiono wyniki badań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych AC 16P i AC 22P z zastosowaniem różnych lepiszczy asfaltowych, oznaczone na poziomach odkształcenia 130  $\mu\text{m/m}$ , 170  $\mu\text{m/m}$  i 200  $\mu\text{m/m}$ .

Na podstawie uzyskanych wyników badań trwałości zmęczeniowej należy stwierdzić, że najwyższą odpornością na zmęczenie charakteryzują się mieszanki z elastomeroasfaltem, natomiast najmniejszymi – mieszanki z asfaltem niemodyfikowanym 50/70. Mieszanki mineralno-asfaltowe z elastomeroasfaltami wykazują dwukrotnie wyższą trwałość zmęczeniową na tych samych poziomach odkształcenia postaciowego w odniesieniu do mieszanek (AC) z asfaltem 50/70. Trwałość zmęczeniowa betonów asfaltowych z lepiszczami gumowo-asfaltowymi kształtuje się między wynikami dwóch pozostałych analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

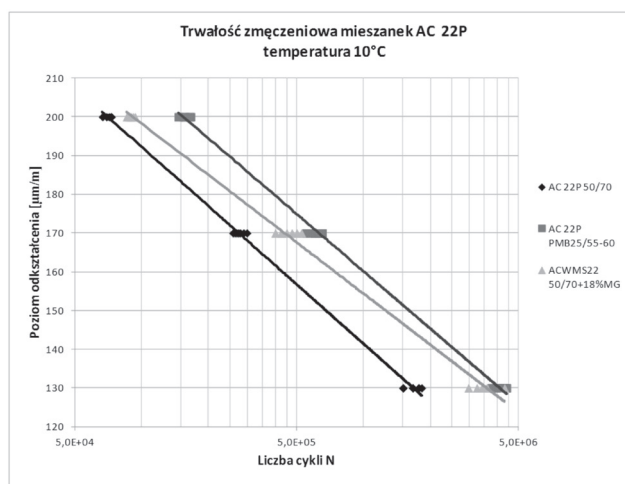
Należy zauważyć, że mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe odznaczają się nietypową (inną), w porównaniu z pozostałymi mieszankami, charakterystyką odporności na zmęczenie. Przy wyższych poziomach odkształceń (200  $\mu\text{m/m}$ ) trwałość zmęczeniowa mieszanek modyfikowanych miałem gumowym jest zbliżona do wartości mieszanek z asfaltem 50/70, natomiast przy niższych poziomach odkształceń (130  $\mu\text{m/m}$ ) mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe przyjmują wartości odporności na zmęczenie bliskie wartościom określonym dla mieszanek mineralno-asfaltowych z elastomeroasfaltem. 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  $\mu\text{m/m}$ .

Na podstawie przeprowadzonych badań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P, opracowano zależności funkcyjne między odkształceniem postaciowym, a trwałością zmęczeniową analizo-



**Rysunek 8** Wykres charakterystyk trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P na różnych poziomach odkształcenia postaciowego (temperatura badania 10°C)

**Figure 8** Graph of the fatigue life of mineral-asphalt mixes type asphalt concrete AC 16P at different levels strain (test temperature 10°C)



**Rysunek 9** Wykres charakterystyk trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 22P na różnych poziomach odkształcenia postaciowego (temperatura badania 10°C)

**Figure 9** Graph of the fatigue life of mineral-asphalt mixes type asphalt concrete AC 22P at different levels strain (test temperature 10°C)

wanych mieszanek. Modele odporności na zmęczenie przedstawiono w Tabeli 2. Modele trwałości zmęczeniowej usystematyzowano z uwzględnieniem maksymalnego uziarnienia mieszanki mineralnej i zastosowanego lepiszcza asfaltowego. Do określenia zależności funkcyjnych między analizowanymi parametrami zastosowano analizę korelacji. Związek dla dwóch zmiennych niezależnych, wyrażano liniowym współczynnikiem korelacji  $R^2$  według Pearsona. Przedstawione w Tabeli 2 modele trwałości zmęczeniowej miesza-

**Tabela 2** Modele trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P  
**Tables 2** Models of the fatigue life of mineral-asphalt mixes type asphalt concrete AC 16P and AC 22P

Rodzaj MMA	Rodzaj zast. lepiszcza	Opis modelu	R <sup>2</sup>
AC 16P	50/70	$N_f = 1,9397E+02 \times \text{EXP}(-2,2414E-07 \varepsilon_f)$	0,87
	50/70+18%MG	$N_f = 1,9207E+02 \times \text{EXP}(-1,1592E-07 \varepsilon_f)$	0,91
	PMB 25/55-60	$N_f = 1,9675E+02 \times \text{EXP}(-9,9475E-08 \varepsilon_f)$	0,93
AC 22P	50/70	$N_f = 1,9056E+02 \times \text{EXP}(-2,3127E-07 \varepsilon_f)$	0,90
	50/70+18%MG	$N_f = 1,8788E+02 \times \text{EXP}(-1,0444E-07 \varepsilon_f)$	0,88
	PMB 25/55-60	$N_f = 1,8976E+02 \times \text{EXP}(-9,2572E-08 \varepsilon_f)$	0,92
<p><math>N_f</math> – trwałość zmęczeniowa [ilość cykli],  <math>\varepsilon_f</math> – odkształcenie postaciowe [<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>].  <math>N_f</math> – fatigue life [number of cycles],  <math>\varepsilon_f</math> – strain [<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>].</p>			

nek betonu asfaltowego mogą posłużyć jako „narzędzie” do wyznaczenia kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych w obliczeniach trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej z wykorzystaniem analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P.

## 5. WNIOSKI

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

1. Spośród badanych mieszanek, najbardziej korzystnymi parametrami charakteryzują się mieszanki betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym PMB 25/55-60, zaś „najslabszymi” z asfaltem drogowym 50/70. Parametry techniczne mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych kształtują się między wynikami dwóch wcześniej wspomnianych mieszanek.
2. Mieszanki mineralno-asfaltowe z elastomeroasfaltami, wykazują dwukrotnie wyższą trwałość zmęczeniową w odniesieniu do betonów asfaltowych z asfaltem 50/70 (na tych samych poziomach odkształcenia).

3. Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe odznaczają się nietypową (inną), w porównaniu z pozostałymi mieszankami, charakterystyką odporności na zmęczenie. 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 bliskie wartościom mieszanek z elastomeroasfaltem. 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.

4. Przedstawione w artykule modele trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych mogą posłużyć jako „narzędzie” do wyznaczenia kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych w obliczeniach trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej z wykorzystaniem analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy AC 16P i AC 22P.

## LITERATURA

- [1] Wyszyński A., Budowa dróg w Polsce do roku 2020 – oczekiwania branży budownictwa drogowego po doświadczeniach z minionego okresu, XXIX Seminarium Techniczne PSWNA, Jachranka, 28-30 października 2013.
- [2] Piłat J., Radziszewski P., Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2010.
- [3] Gonzalo R., Considering Long-Life & Perpetual Pavements, Fugro Transportation Infrastructure International, Road Runner; 3/2009.
- [4] Sybilski D., Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce, Drogownictwo 3/2004.
- [5] Judycki J., Jaskuła P., Nowoczesne nawierzchnie asfaltowe, XLVII Techniczne Dni Drogowe, Szczyrk 2004.
- [6] State of California Department of Transportation, Asphalt Rubber Usage Guide, Sacramento, USA 2003.
- [7] Sybilski D., Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym, Przegląd Budowlany 5/2009.
- [8] Radziszewski P., Piłat J., Plewa A., 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. 2004.
- [9] Radziszewski P., Piłat J., Plewa A., Kowalski K., Król J., Sarnowski M., Łaskiewicz A., 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 2011.
- [10] Skotnicki Ł., Szydło A., Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych i mineralno-cementowo-emulsyjnych, Drogownictwo 10/2005.
- [11] 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.
- [12] PN-EN 12697-24:2008, Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 24: Odporność na zmęczenie.