

## **Wpływ temperatury technologicznej na trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do nawierzchni mostowych**

**Piotr Radziszewski<sup>1</sup>, Andrzej Plewa<sup>2</sup>, Karol J. Kowalski<sup>3</sup>, Jan Król<sup>4</sup>,  
Michał Sarnowski<sup>5</sup>, Piotr Pokorski<sup>6</sup>**

*<sup>1,3,4,5,6</sup> Zespół Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych, Instytut Dróg i Mostów,  
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska,  
e-mail: <sup>1</sup>p.radziszewski@il.pw.edu.pl, <sup>3</sup>k.kowalski@il.pw.edu.pl; <sup>4</sup>j.krol@il.pw.edu.pl;  
<sup>5</sup>m.sarnowski@il.pw.edu.pl, <sup>6</sup>p.pokorski@il.pw.edu.pl*

*<sup>2</sup> Zakład Inżynierii Drogowej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,  
Politechnika Białostocka, a.plewa@pb.edu.pl*

**Streszczenie:** Obiekty inżynierskie stanowią nieodłączny element infrastruktury drogowej. Obecnie następuje intensywnej rozbudowy sieci drogowej w Polsce, powstają także liczne obiekty mostowe. Ze względu na specyfikę pracy całej konstrukcji mostowej, nawierzchnia na takim obiekcie powinna spełniać określone funkcje i wymagania. W artykule przedstawiono wyniki badań trwałości zmęczeniowej wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstw konstrukcyjnych na obiektach mostowych. Zbadano wpływ podwyższonej temperatury procesów technologicznych na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Analizie poddano mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone do różnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Określono moduł sztywności oraz trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych w funkcji wartości odkształcenia. Zależności te przedstawiono w formie równań regresyjnych. Na podstawie wyników badań wykazano istotny wpływ temperatury technologicznej na zmniejszenie trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do nawierzchni mostowych.

**Słowa kluczowe:** mieszanka mineralno-asfaltowa, trwałość zmęczeniowa, nawierzchnia mostowa, temperatura technologiczna

### **1. Wprowadzenie**

Nawierzchnia na moście jest jednym z elementów, który ma decydujący wpływ na trwałość całej konstrukcji. Rodzaj i wielkość obciążenia różni się zdecydowanie od tych, które ma za zadanie przenieść nawierzchnia w typowych rozwiązaniach – na ziemi. Ze względu na specyficzny charakter pracy płyty pomostu, wielkości naprężeń i odkształceń w nawierzchni osiągają duże wartości. Nawierzchnia jest narażona na duże i szybkie zmiany temperatury [1, 2]. Poza podstawowymi funkcjami, które powinna spełniać nawierzchnia (rozkład obciążeń na pomost, zapewnienie przyczepności do podłoża, równość, szorstkość, odporność na ścieranie i powstawanie kolein itd.) [3, 4], powinna ona stanowić ochronę dla pomostu przed destrukcyjnym wpływem wody oraz środków odladzających stosowanych w okresie zimowym [1]. Brak spękań jest warunkiem koniecznym do zapewnienia odpowiedniej szczelności i trwałości nawierzchni mostowej. Jednym z wymagań, jakie muszą być spełnione przez konstrukcje jest jej trwałość zmęczeniowa [5].

## 2. Charakterystyka badanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Na podstawie badań rozpoznawczych oraz przeglądu dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych, do badań trwałości zmęczeniowej wytypowane zostały trzy mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA):

- beton asfaltowy AC 11
- mieszanka grysowo-mastyksowa SMA 8
- mieszanka wysokogrysowa SMA/MA8

Celem badań było określenie trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych na obiektach mostowych w funkcji zmiany obciążenia wyrażonego poprzez zmianę odkształcenia. Zbadano wpływ starzenia technologicznego w podwyższonej temperaturze na trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstw nawierzchni mostowych.

Obok typowych mieszanek mineralno-asfaltowych AC i SMA badaniom poddano również mieszankę mastyksu wysokogrysowego SMA/MA, która stanowi nowe rozwiązanie materiałowo-technologiczne. Mieszanka ta charakteryzuje się rozbudowanym szkieletem grysowym (zbliżonym do SMA), zwiększoną zawartością frakcji piaskowej (jak w asfalcie lanym) oraz wysoką zawartością lepiscza - około 8,5-9% m/m (jak w mastyksie izolacyjnym). Taki skład mieszanki powoduje jej dużą szczelność (zawartość wolnych przestrzeni około 0,5-0,8% m/m) oraz odporność na deformacje trwałe [6, 7].

W celu określenia wpływu temperatur technologicznych na zmianę właściwości mieszanek zbadano mieszanki poddane standardowemu cyklowi produkcji oraz mieszanki poddanej działaniu wysokich temperatur. Do badań przygotowano dwa zestawy próbek. W pierwszym zestawie przed zagęszczeniem próbek mieszankę wygrzewano w temperaturze 135<sup>0</sup>C przez 4 godziny. Próbkę w zestawie drugim były wygrzewano tak jak w zestawie pierwszym, ponadto poddane zostały one dodatkowemu wygrzewaniu w temp 250<sup>0</sup>C przez 2 godziny z pełnym dostępem powietrza [8].

## 3. Metodyka badawcza

Badania laboratoryjne nad trwałością zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano przy użyciu aparatu UTM-25. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



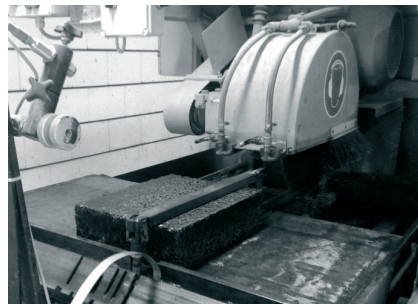
Rys. 1. Uniwersalne urządzenie UTM-25 do badań zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych

Badanie próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano zgodnie z normą: PN-EN 12697-26 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – „Badanie 4-punktowego zginania 4PB-PR”.

Próbki belkowe do badań zmęczeniowych były wycinane z płyt zagęszczanych w warunkach laboratoryjnych metodą wałowania. Zagęszczone płyty miały wymiar 30x40x10 cm. Wycinanie próbek z płyty odbywało się po 24h od ich wykonania (rys. 2, 3).



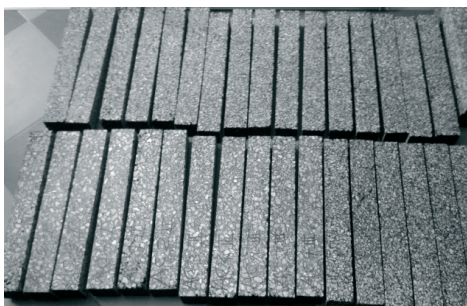
Rys. 2. Widok wycinania próbek z zagęszczonych płyt z mieszanki mineralno-asfaltowej



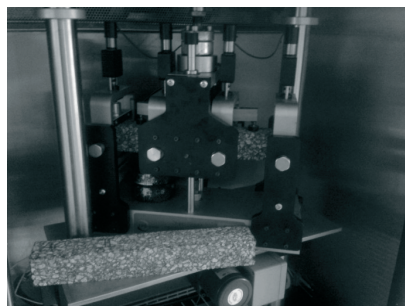
Rys. 3. Widok wyciętej próbki z zagęszczonej płyty z mieszanki mineralno-asfaltowej

Próbki po wycięciu, przez okres 14 dni przechowywane były w temperaturze 20°C (rys. 4). Przed oznaczeniem, próbki sezonowano w temperaturze badania (10°C) przez 4 godziny.

Próbki belkowe poddawano cyklicznemu zginaniu w aparacie belki 4-punktowego zginania z zachowaniem swobodnego obrotu i z poziomym przesunięciem we wszystkich punktach obciążenia i reakcji (podpory rolkowe) (rys. 5).



Rys. 4. Widok próbek belkowych do badań zmęczeniowych



Rys. 5. Widok próbki belkowej umieszczonej w aparacie pomiarowym

Badania laboratoryjne były przeprowadzone przy zachowaniu następujących warunków:

#### Badanie modułu sztywności $E$

- temperatura badania +10°C,
- czteropunktowe cykliczne zginanie belki przy stałej amplitudzie odkształcenia zmieniającej się według funkcji sinusoidalnej,
- amplituda odkształcenia  $\varepsilon = 50 \mu\text{m/m}$ , częstotliwość 10Hz,
- moduł sztywności wyznaczano dla 100-go cyklu obciążenia.

#### Badanie trwałości zmęczeniowej $N_f$

- temperatura badania +10°C,
- czteropunktowe cykliczne zginanie belki przy stałej amplitudzie odkształcenia zmieniającej się według funkcji sinusoidalnej,
- częstotliwość obciążenia 10Hz,
- wartości amplitudy odkształcenia: od 170 do 450  $\mu\text{m/m}$ .

Próbkę uważano za zniszczoną zmęczeniowo w tym momencie obciążenia, w którym moduł sztywności osiągał wartość równą połowie wartości początkowego modułu sztywności. Założono, że przy każdym poziomie odkształcenia w danej serii próbek należy uzyskać 3 wyniki trwałości zmęczeniowej danej mieszanki nie różniące się między sobą o więcej niż 10% [8].

#### 4. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej

Przeprowadzono badania trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego AC 11, mastyksu grysowego SMA 8 i mastyksu wysokogrysowego SMA/MA 8, z uwzględnieniem wpływu wysokiej temperatury technologicznej 250°C.

Zestawienie wyników badań modułów sztywności oraz obliczone indeksy zmiany modułu sztywności  $I_E$  mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono w tabeli 1.

Indeks zmiany modułu sztywności zdefiniowano jako iloraz modułu sztywności mieszanki MMA poddanej dodatkowemu procesowi wygrzewania w temp. 250°C do modułu sztywności mieszanki MMA poddanych typowemu procesowi starzenia technologicznego.

Wyniki badań przekraczające 20% średniej 5 próbek uznano za niepewne.

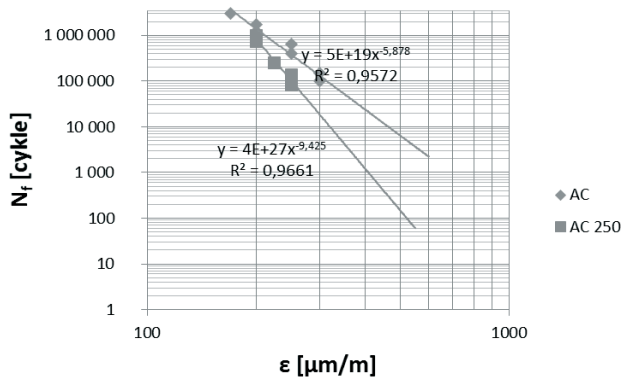
Tabela 1 Wyniki badań modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych

Rodzaj MMA:	Beton asfaltowy AC 11		$I_E$	Mastyks grysowy SMA 8		$I_E$	Mastyks wysokogrysowy SMA/MA 8		$I_E$
Nr próbki	AC	AC_250		SMA	SMA_250		SMA/MA	SMA/MA_250	
1	8916	13895		9414	10641		6424	7802	
2	10078	17112		9731	10257		6508	8100	
3	10973	14211		10095	10824		9673	7319	
4	11043	15474		9398	9273		6819	8667	
5	12350	13437		10506	11121		7005	7927	
Wart. średnia:	10672	14826	1.39	9829	10423	1.06	7286	7963	1.09

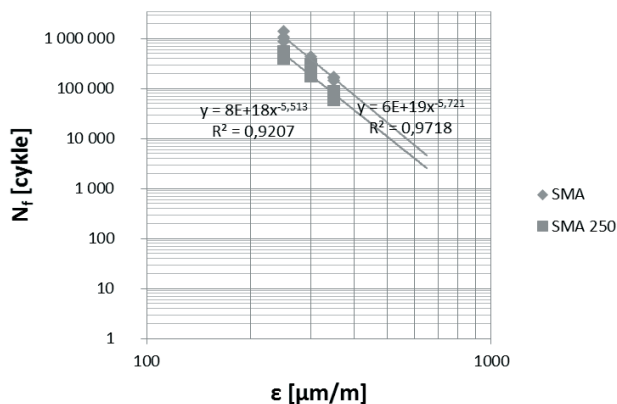
Analizując wyniki przedstawione w tabeli 1 należy stwierdzić, że w temperaturze 10°C mieszanka AC charakteryzuje się największą sztywnością w porównaniu do mieszanek SMA i SMA/MA. Po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C moduł sztywności mieszanek SMA i SMA/MA w niewielkim stopniu uległ zmianie (mniej niż 10%), natomiast moduł sztywności mieszanki AC wzrósł o prawie 40%. Świadczy to o tym, że beton asfaltowy w procesie wygrzewania w większym stopniu ulega niekorzystnym zmianom prowadzącym do utraty właściwości lepkich na rzecz właściwości sprężystych prowadzących do kruchej pęknięcia.

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono na wykresach zależności funkcyjnych  $N_f = f(\epsilon)$  w skali logarytmicznej. Otrzymano równania liniowe równania regresyjne, adekwatnie opisujące wyniki badania z dużą mocą korelacji wyrażoną współczynnikiem  $R^2$ . Na uwagę zasługuje wysoka wartość współczynnika determinacji  $R^2$  (powyżej 0.9) co świadczy o dobrym doborze funkcji regresji charakteryzującej obiekt badania.

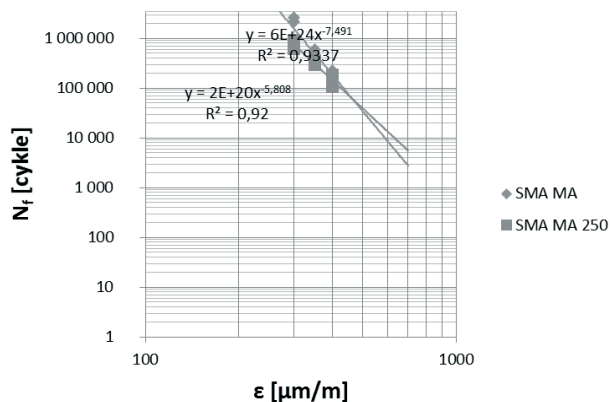
Wyniki badań trwałości zmęczeniowej przedstawiono na rys. 6 (beton asfaltowy AC), rys. 7 (mieszanka grysowo-mastyksowa SMA), rys. 8 (mieszanka SMA/MA).



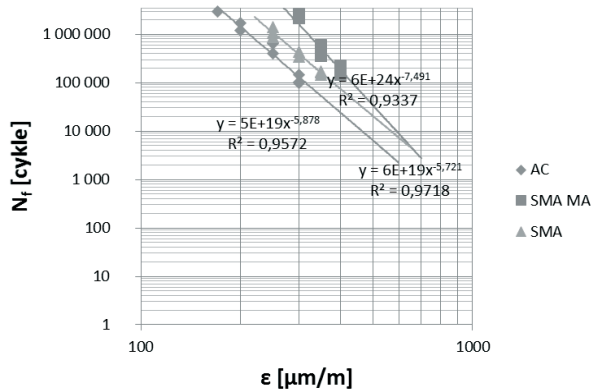
Rys. 6. Wykres trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego AC 11 przed i po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C



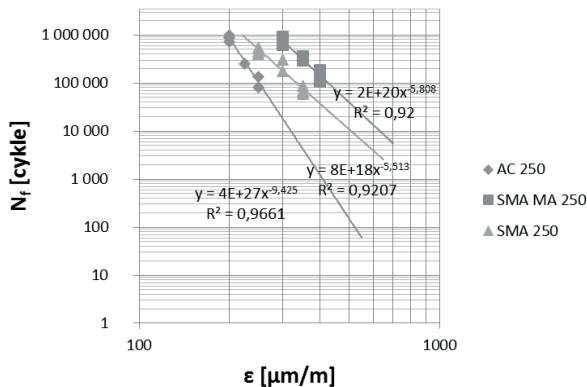
Rys. 7. Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanki grysowo-mastyksowej SMA 8 przed i po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C



Rys. 8. Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA/MA 8 przed i po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C



Rys. 9. Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanek AC 11, SMA 8 i SMA/MA 8 przed procesem wygrzewania



Rys. 10. Wykres trwałości zmęczeniowej mieszanek AC 11, SMA 8 i SMA/MA 8 po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 6 należy stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa betonu asfaltowego po procesie wygrzewania w temperaturze 250°C jest dużo mniejsza niż przed wygrzewaniem. Ta różnica wzrasta wraz ze wzrostem wartości odkształcenia (dla odkształcenia  $\varepsilon = 400 \mu\text{m/m}$  wartość trwałości zmęczeniowej spada z około 25000 do 1000: spadek o 60%). Znacznie mniejsze spadki trwałości zmęczeniowej występują w przypadku mieszanek SMA i SMA/MA (rys.7 i rys. 8).

W celu porównania trwałości zmęczeniowej badanych mieszanek mineralno-asfaltowych, wyniki badań dla wszystkich badanych mieszanek przedstawiono na rysunku 9 (mieszanki nie poddane dodatkowemu wygrzewaniu) oraz na rysunku 10 (mieszanki poddane dodatkowemu wygrzewaniu).

Z rysunku 9 wynika, że dla badanych mieszanek mineralno-asfaltowych następuje wyraźne przesunięcie wykresów równań trwałości zmęczeniowej w kierunku wyższych wartości trwałości zmęczeniowej, zgodnie z następującą kolejnością:

- 1) beton asfaltowy AC,
- 2) mieszanka grysowo-mastyksowa SMA,
- 3) mieszanka grysowo-mastyksowa SMA/MA.

Dla tej samej amplitudy odkształcenia, np.  $\varepsilon = 300 \mu\text{m/m}$ , trwałość zmęczeniowa mieszanki SMA jest około 4 razy, a mieszanki SMA/MA około 20 razy, większa niż trwałość



betonu asfaltowego. Jeszcze większe różnice w trwałości zmęczeniowej występują w przypadku mieszanek poddanych procesowi wygrzewania w temperaturze 250°C (rys. 10). Dla amplitudy odkształcenia  $\epsilon = 300 \mu\text{m/m}$  trwałość zmęczeniowa mieszanki SMA jest około 10 razy a mieszanki SMA/MA około 40 razy większa niż trwałość betonu asfaltowego.

W celu pełniejszej oceny zmian trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych powodowanej wysoką temperaturą wygrzewania określono indeksy zmian trwałości zmęczeniowej. Wartości indeksu wyrażono stosunkiem trwałości zmęczeniowej mieszanek po procesie wygrzewania w wysokiej temperaturze do trwałości zmęczeniowej mieszanek nie poddanych procesowi wygrzewania. Wyniki oznaczenia zmiany indeksu trwałości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Indeks zmiany trwałości zmęczeniowej próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych procesowi wygrzewania

Rodzaj mieszanki MMA	Indeks zmiany trwałości zmęczeniowej, $I_N$
<b>Beton asfaltowy AC11 250- odkształcenie <math>\epsilon</math> [<math>\mu\text{m/m}</math>]</b>	
200	0,59
250	0,21
300	0,16
<b>Mastyks grysowy SMA8 250- odkształcenie <math>\epsilon</math> [<math>\mu\text{m/m}</math>]</b>	
250	0,42
300	0,62
350	0,45
<b>Mastyks wysokogrysowy SMA/MA8 250- odkształcenie <math>\epsilon</math> [<math>\mu\text{m/m}</math>]</b>	
300	0,41
350	0,68
400	0,83

Na podstawie analizy wyników zawartych w tabeli 2 można stwierdzić, że wysoka temperatura wygrzewania mieszanki mineralno-asfaltowej w najmniejszym stopniu powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej mieszanki SMA/MA, w następnej kolejności mieszanki SMA i betonu asfaltowego AC. Wyniki te korelują z wynikami modułów sztywności zawartymi w tabeli 1. Należy ten fakt tłumaczyć tym, że grubość błonki mastyksu otaczającej ziarna kruszywa w mieszance SMA/MA jest największa i w efekcie najmniej podatna na niekorzystne zmiany właściwości lepko-sprężystych pod wpływem wygrzewania.

## 5. Podsumowanie

W celu zapewnienia trwałości obiektu mostowego oraz bezpieczeństwa i komfortu podróży należy stosować odpowiedniej jakości materiały i technologie. Ze względu na specyficzne warunki pracy nawierzchni mostowej jest ona narażona podczas eksploatacji na większe odkształcenia oraz szybsze zmiany temperatury niż typowa nawierzchnia drogowa. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można stwierdzić, że na trwałość nawierzchni istotny wpływ ma przebieg procesów technologicznych oraz odpowiedni poziom wykonawstwa. Z przeprowadzonych badań mieszanek mineralno-asfaltowych wynika, że najmniej odporny na podwyższone temperatury (najmniejsza trwałość zmęczeniowa) okazał się beton asfaltowy AC, natomiast znacznie lepsze właściwości wykazały mieszanki SMA i SMA/MA. Podwyższone temperatury technologiczne podczas produkcji i w budowywania mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do nawierzchni mostowych prowadzą do zmniejszenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni, a tym samym

zmniejszenia trwałości całego obiektu. Najmniejsze zmiany właściwości („technologia wybacząca”) spowodowane wygrzewaniem w wysokich temperaturach dotyczą technologii SMA/MA. Co stawia, tę technologię w rzędzie technologii, które w największym stopniu mogą zapewnić odpowiednią trwałość nawierzchni mostowej w przypadku niezachowania w pełni reżimu technologicznego.

## Literatura

- 1 Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K.: Nawierzchnie asfaltowe i betonowe na obiektach mostowych. Seminarium: Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów Warszawa 2007, s. 49-52.
- 2 Kilariski R.: Trwałość nawierzchni ma pomostach drogowych obiektów mostowych, Materiały Budowlane 4/2006, s. 86-89.
- 3 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U. nr 63 poz 735, 2000.
- 4 Madaj A., Wołowicki W.: Budowa i utrzymanie mostów, Wydawnictwo komunikacji i łączności, Warszawa 2001.
- 5 Sybilski D.: Długowieczne nawierzchnie asfaltowe na świecie i w Polsce. Drogownictwo 3/2004, s. 79-85
- 6 Piłat J., Radziszewski P., Nawierzchnie asfaltowe, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010.
- 7 Mieczkowski P.: Warstwy ochronne z mieszanek mineralno-asfaltowych na obiektach mostowych. Izolacje nr 10/2013, s. 54-61.
- 8 Radziszewski P., Piłat J., Sarnowski M., Kowalski K., Król J., Pokorski P., Liphardt A.: Rozwiązania materiałowo-technologiczne izolacji i nawierzchni obiektów mostowych, praca na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2013.

## Influence of technology temperature on the fatigue cracking resistance of asphalt mixtures used for bridge pavement

Piotr Radziszewski<sup>1</sup>, Andrzej Plewa<sup>2</sup>, Karol J. Kowalski<sup>1</sup>, Jan Król<sup>1</sup>, Michał Sarnowski<sup>1</sup>, Piotr Pokorski<sup>1</sup>

<sup>1,3,4,5,6</sup> Group of Materials and Road Technology, Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, e-mail: <sup>1</sup>p.radziszewski@il.pw.edu.pl, <sup>3</sup>k.kowalski@il.pw.edu.pl; <sup>4</sup>j.krol@il.pw.edu.pl; <sup>5</sup>m.sarnowski@il.pw.edu.pl, <sup>6</sup>p.pokorski@il.pw.edu.pl

<sup>2</sup> Division of Road Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Białystok University of Technology, e-mail: a.plewa@pb.edu.pl

**Abstract:** Bridges are an integral part of road infrastructure. In times of the roadnetwork expansion in Poland a lot of bridges were constructed. Due to the nature of work, a bridge structure should comply with specific features and requirements. This article presents the results of the fatigue life of selected asphalt mixtures used in bridge structures. Mixtures for various pavement layers were investigated. The effect of high temperature on stiffness modulus and fatigue cracking resistance with different levels of strain were analyzed. These relationships were presented in the regression equations form. The crucial influence of increased technology temperature on asphalt mix fatigue life was proved.

**Keywords:** asphalt mixture, fatigue cracking, bridge pavement, technology temperature