

WOJCIECH BAŃKOWSKI<sup>1)</sup>

## ANALYSIS OF FATIGUE LIFE OF ASPHALT CONCRETES CONSIDERING DIFFERENT TYPES OF MIXTURES AND BINDERS

## ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ BETONÓW ASFALTOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM TYPU MIESZANKI I RODZAJU LEPISZCZA

**STRESZCZENIE.** Przedmiotem prac badawczych przedstawionych w artykule jest trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych do warstwy podbudowy. W badaniach uwzględniono dwa rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych: beton asfaltowy i beton asfaltowy o wysokim module sztywności. W ramach każdej z mieszanek przygotowano warianty z różnymi asfaltami, tj. drogowymi, modyfikowanymi polimerem i tzw. wysokomodyfikowanymi. Przeprowadzono badania trwałości zmęczeniowej mieszanek, na podstawie których opracowano ich charakterystyki zmęczeniowe. Wykonano analizę trwałości zmęczeniowej mieszanek oraz typowych konstrukcji nawierzchni podatnych. Dokonano oszacowania tzw. współczynnika przesunięcia, który umożliwia wykorzystanie laboratoryjnych charakterystyk zmęczeniowych w projektowaniu nawierzchni. Zaproponowano definicję dwóch parametrów zmęczeniowych: odkształcenia krytycznego i wskaźnika trwałości zmęczeniowej. Pozwalają one bardziej racjonalnie porównać wyniki trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem trwałości konstrukcji nawierzchni. Przeprowadzone analizy pozwoliły na ocenę odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych biorąc pod uwagę typ mieszanki i rodzaj asfaltu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** beton asfaltowy, beton asfaltowy o wysokim module sztywności (ACWMS), konstrukcja nawierzchni, projektowanie konstrukcji nawierzchni, sztywność, trwałość zmęczeniowa, współczynnik przesunięcia.

**ABSTRACT.** The research described in the paper concerns the fatigue life of base course asphalt mixtures. Two mixture types were chosen for analysis: asphalt concrete and High Modulus Asphalt Concrete. Either of them contained different bitumen types, including standard paving grade bitumens, polymer-modified bitumens (PMB) and so-called highly-modified asphalts (HiMA). Fatigue life tests were carried out and their results were used for fatigue law determination of the mixtures under analysis. Fatigue life analyses were performed both for the analysed mixtures and for typical flexible pavements. The value of the so-called shift factor was estimated to enable application in the design of pavements of the fatigue law parameters determined in laboratory. Two fatigue parameters are proposed in this research: critical strain and fatigue life ratio. They provide a more robust comparison of fatigue life determinations on bituminous mixtures by taking into consideration also the fatigue life of the pavement structure itself. The analyses conducted as part of this research enabled assessment of the fatigue life of asphalt mixtures taking account of the type of both the mixture and the bitumen it contains.

**KEYWORDS:** asphalt concrete, fatigue, high modulus asphalt concrete (HMAC), pavement structure, pavement structure design, shift factor, stiffness.

DOI: 10.7409/rabdim.018.016

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; wbankowski@ibdim.edu.pl

## 1. TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA

Zmęczenie warstw bitumicznych jest jedną z możliwych przyczyn spękań nawierzchni. Zjawisko zniszczenia następuje na skutek kumulacji wielu powtarzających się obciążeń od przejeżdżających pojazdów, a nie z uwagi na przekroczenie wytrzymałości materiału. Zjawisko zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych jest od lat przedmiotem prac naukowo-badawczych na całym świecie. Wyniki badań zmęczeniowych wykorzystuje się w projektowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych do oceny nowych rozwiązań technologiczno-materiałowych oraz w projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych. Badania zmęczeniowe są również od kilkunastu lat prowadzone w Polsce, szczególnie za sprawą stosowania betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (ACWMS).

Trwałość zmęczeniowa w istotnym stopniu zależy od rodzaju i składu mieszanek mineralno-asfaltowych, a w szczególności od rodzaju lepiszcza i jego właściwości, zawartości asfaltu w mieszance, zawartości wolnej przestrzeni, zawartości wypełniacza, pochodzenia kruszywa, powinowactwa kruszywa z lepiszczem asfaltowym (adhezja). Z uwagi na to, że parametry te mogą być wzajemnie od siebie zależne, analiza wpływu każdego z nich na trwałość zmęczeniową jest dość złożona. Z wymienionych czynników do najbardziej istotnych należy zaliczyć skład mieszanki mineralno-asfaltowej i rodzaj zastosowanego lepiszcza. Zasadniczo te czynniki będą uwzględniane w analizach przedstawionych w niniejszym artykule. Uwzględniono dwa rodzaje betonu asfaltowego, tzw. klasyczny AC oraz beton o wysokim module sztywności ACWMS. Obydwie mieszanki należą do tej samej rodziny mieszanek o ciągłym uziarnieniu. Zasadnicze różnice wynikają ze składu i uziarnienia. Mieszanka ACWMS do warstwy podbudowy z definicji charakteryzuje się większą zawartością asfaltu, drobniejszym uziarnieniem i mniejszą zawartością wolnych przestrzeni. Są to czynniki, które istotnie wpływają na właściwości funkcjonalne, a w szczególności poprawiają odporność na zmęczenie. W celu uzyskania wyższej sztywności i lepszej odporności na koleinowanie preferowane jest stosowanie asfaltów twardszych, co z kolei mniej korzystnie wpływa na trwałość zmęczeniową mieszanki. Ostatecznie jednak korzystniejszy bilans w zakresie trwałości zmęczeniowej jest po stronie mieszanek ACWMS [1]. Możliwe jest wydłużenie trwałości projektowanej konstrukcji lub redukcja grubości warstw asfaltowych. W zakresie wpływu rodzaju asfaltu ogólnie znane są relacje, że stosowanie asfaltów bardziej miękkich lub modyfikowanych polimerami czy gumą poprawia trwałość zmęczeniową mieszanki [2-4]. Obecnie na polskim rynku stosowane są również tzw. asfalty wysokomodyfikowane,

## 1. FATIGUE LIFE

Fatigue distress of asphalt courses is one of the possible causes of cracking of pavements. Fatigue damage is caused by the cumulative vehicle load repetitions rather than by exceeding the ultimate strength of the material. Fatigue of asphalt mixtures has been studied for many years by researchers from different countries all over the world. The experimental results are used in the design of asphalt mixtures when needed to evaluate new materials and the associated production processes and also in designing the road pavements. A number of research projects in this area have been carried out in Poland over the last dozen plus years, driven in particular by the use of the High Modulus Asphalt Concrete.

Fatigue life depends, to a large degree, on the mixture type and its composition, the primary factors being the binder type and its properties, the content of bitumen, air voids and filler, origin of aggregate and affinity (i.e. adhesion) between the bituminous binder and aggregate. Possible interrelations between these parameters make determination of their influence on the fatigue life quite a complex task. The factors which are most relevant in this respect are the mixture composition and the type of binder it contains. Generally, it is these two parameters that are taken into consideration in the analyses presented in the further part of this paper. Two types of asphalt concrete are considered: the so-called conventional AC and High Modulus Asphalt Concrete (HMAC). These two mixtures are classified in the same group of continuously (densely) graded asphalt mixtures. The main differences between them are related to different composition and particle size distribution. The HMAC base course mixture has, by its very nature, a higher content of bitumen, smaller size of aggregate particles and less air voids. These characteristics are highly relevant to the material performance, improving in particular its fatigue resistance. When high stiffness and rutting resistance are of essence stiffer bitumens are preferred which are less favourable from the fatigue life viewpoint. With all the pros and cons taken into account, HMAC mixtures outperform other mixtures in terms of fatigue life [1]. They can extend the design life of pavement or, alternatively, enable designing pavements with thinner asphalt courses. As to the effect of the bitumen type, improvement of fatigue life by using softer or polymer/ rubber modified bitumens has been reported [2-4]. In Poland there are also the so-called highly modified bitumens that are much different from the traditional polymer-modified bitumens in terms of rheological behaviour and properties. They were found to considerably

których właściwości i charakterystyka reologiczna jest znacząco różna od klasycznych polimeroasfaltów [5]. Doświadczenia z różnych prac badawczych wskazują na istotną poprawę odporności zmęczeniowej [6-8]. Dostępne są również asfalty do mieszanek mineralno-asfaltowych na ciepło czy asfalty z dodatkami pochodzenia roślinnego, które również korzystnie wpływają na właściwości funkcjonalne, w tym zmęczenie [9, 10]. Ogólnie dobór asfaltów do poszczególnych mieszanek i warstw konstrukcyjnych jest niezmierznie istotny zarówno ze względu na warunki obciążenia ruchem, jak i warunki klimatyczne [11] oraz w odniesieniu do innych poza zmęczeniem potencjalnych mechanizmów zniszczenia [12, 13].

Ocena i interpretacja wyników badania trwałości zmęczeniowej mieszanki mineralno-asfaltowej jest stosunkowo złożonym procesem [14, 15]. W najprostszym podejściu dokonuje się porównania parametru  $\epsilon_6$ , który jest zdefiniowany jako wartość odkształcenia, przy którym trwałość wynosi 1 mln cykli. Ten parametr jest też stosowany jako kryterium oceny w wymaganiach normowych. W bardziej zaawansowanym podejściu dokonuje się porównania charakterystyk zmęczeniowych. Stosowanie metody graficznej porównywania charakterystyk zmęczeniowych w niektórych przypadkach może okazać się dość trudne. Wykresy charakterystyk zmęczeniowych analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych mogą mieć różne nachylenie, przecinać się, a więc wynik porównania będzie zależał od wielkości odkształcenia. Wówczas korzystne jest dokonanie oceny poprzez analizę mechanistyczną trwałości konstrukcji z tymi mieszankami z wykorzystaniem charakterystyk zmęczeniowych [16].

W analizie wyników badania zmęczenia istotne jest również przyjęcie kryterium zmęczenia, czyli definicji momentu zniszczenia próbki. Konwencjonalne kryterium zmęczeniowe, określające trwałość zmęczeniową jako liczbę cykli, po której moduł sztywności badanej próbki osiągnie 50% wartości początkowej, jest często krytykowane. Uważa się, że jest to kryterium subiektywne, związane nie z materiałem, a z próbką [17]. Zakłada ono, że każdy materiał zachowuje się tak samo i niezależnie od warunków badania. Alternatywą jest stosowanie kryterium według metody energii rozproszonej (metody energetycznej) [18]. Metoda energetyczna polega na obserwacji samego procesu zmęczenia, w odróżnieniu od konwencjonalnego kryterium, według którego trwałość zmęczeniowa określana jest arbitralnie jako liczba cykli potrzebna do obniżenia modułu sztywności o 50% w stosunku do wartości początkowej. Wybór kryterium zniszczenia może mieć wpływ na wyniki badań [19].

improve the fatigue life in various research projects [6-8]. Other materials of choice enhancing the mixture performance, including fatigue resistance, are bitumens for warm mix asphalts and bitumens containing plant-derived additives [9, 10]. Selection of appropriate bitumen for a given mixture and pavement course is of utmost importance and the relevant factors that must be taken into account include the traffic loading, climate [11] and also failure mechanisms other than fatigue [12, 13].

In the case of asphalt mixtures evaluation and interpretation of fatigue test data is a relatively complex process [14, 15]. The simplest approach is based on comparing values of the parameter  $\epsilon_6$  defined as the strain leading to 1 million load cycles applied in the fatigue test. This parameter is also prescribed as an evaluation criterion by the applicable codes. A more complex approach is based on comparing the fatigue behaviours. However, comparing the fatigue behaviours based on their graphical representations (curves) can be quite difficult in some cases. This is because the fatigue curves of the asphalt mixtures under analysis can have different slopes and intersect each other and, as a consequence, this analysis can yield different results at the strain values. In such cases it is advisable to carry out such evaluation through fatigue life mechanistic analyses of the pavements constructed with these mixtures, based on the determined fatigue relationships [16].

Also relevant to analysing the fatigue test results is the definition of the failure criterion i.e. the moment at which the specimen is considered damaged. The conventional fatigue criterion which defines the fatigue life as the number of load cycles resulting in 50% reduction of the initial modulus of rigidity is being widely criticised. It is considered a subjective criterion, relating to the material rather than to the specimen [17]. It assumes the same behaviour for all materials independently of the testing conditions. However, there is an option of using the criterion of the dissipated energy method [18]. Other than the conventional criterion based on arbitrary definition of the fatigue criterion as the number of load cycles upon which the initial modulus of rigidity decreases by 50%, the energy dissipation method considers the fatigue process as such. It should be noted that selection of the fatigue failure criterion can influence the test results [19].

## 2. SCOPE AND AIM OF THE ANALYSIS

The paper presents the results of fatigue testing of different base course asphalt mixtures, including the analysis of their bearing on the fatigue life of flexible pavements.

## 2. ZAKRES I CEL ANALIZY

W artykule przedstawiono wyniki badań zmęczenia mieszank mineralno-asfaltowych do podbudowy oraz przeprowadzono analizę wyników w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni podatnych. Analiza jest ukierunkowana na określenie wpływu właściwości zmęczeniowych mieszank do warstwy podbudowy typu AC22P i ACWMS16 z różnymi asfaltami na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni. Uwzględniono dwie typowe konstrukcje podatne przeznaczone do kategorii ruchu KR4 i KR7 według Katalogu (typ A.1) [20]. W analizach wykorzystano wyniki badań właściwości podstawowych MMA (zawartość asfaltu, zawartość wolnych przestrzeni) oraz badań funkcjonalnych (zmęczenie, sztywność).

Obliczenie trwałości konstrukcji nawierzchni zostało przeprowadzone metodą mechanistyczną przy zastosowaniu programu NOAH 2.0. Przyjęto założenia zgodne z zasadami stosowanymi przy projektowaniu nawierzchni w Polsce [21]. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem laboratoryjnych charakterystyk zmęczeniowych w celu obliczenia tzw. odkształceń krytycznych względem analizowanych kategorii ruchu. Porównano również wyniki uzyskane według klasycznego kryterium zmęczenia oraz kryterium energetycznego. Przeprowadzono dyskusję wyników w kontekście wpływu zastosowania rodzaju asfaltu na trwałość zmęczeniową mieszanki i konstrukcji.

## 3. MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE I ICH WŁAŚCIWOŚCI

Mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone do badań zmęczeniowych zostały zaprojektowane na zgodność z wymaganiami WT-2 2014 [22], z przeznaczeniem do kategorii ruchu KR5-7, mogą być więc również zastosowane do konstrukcji KR4. W Tabl. 1 przedstawiono właściwości podstawowe mieszank AC22P i ACWMS16 z poszczególnymi asfaltami do warstwy podbudowy. Podano również parametry warstw, które zostały uwzględnione w obliczeniach metodą mechanistyczną. Mieszanki mineralne danego typu, czyli np. AC22P nie różniły się między sobą składem mieszanki mineralnej i zawartością asfaltu, natomiast opracowano warianty różniące się jedynie rodzajem zastosowanego lepiszcza. W tablicy tej podano również wartości modułów sztywności mieszank określone w badaniu metodą belki 4-punktowo zginanej wg PN-EN 12697-26. Są to wartości niezbędne do wykonania obliczeń trwałości konstrukcji metodą mechanistyczną. Wartości modułów wyznaczono przy częstotliwości 10 Hz i w temperaturze 10°C oraz 13°C. Ustalenie sztywności w temperaturze 13°C jest

AC22P<sup>2)</sup> and ACWMS16<sup>3)</sup> base course mixtures produced with different bitumens are considered in the analysis directed towards determining the effect of the fatigue parameters of asphalt mixtures on the fatigue life of pavements. The pavement structures are two types of flexible pavements for traffic classes KR4 and KR7, type A.1 according to the Polish Pavement Design Catalogue [20]. The analyses take into account the experimentally determined basic properties of the material (bitumen and air void contents) and its performance parameters (fatigue failure and stiffness).

The fatigue life of pavement was determined with the mechanistic method using NOAH 2.0 computer program. The input assumptions are in accordance with the Polish pavement design practice [21]. Additionally, fatigue behaviour parameters were used for calculating the so-called critical strains relative to the analysed traffic classes. Moreover, a comparison was carried out between the results obtained with the conventional fatigue criterion and the energy dissipation criterion. The results are discussed from the point of view of the bearing of the bitumen type on the fatigue life of the mixture and the pavement structure for which it is designed.

## 3. BITUMINOUS MIXTURES AND THEIR PROPERTIES

The asA phalt mixtures prepared for the fatigue tests meet the requirements for KR5-7 traffic classes as per the Polish code of practice No. WT-2 2014 [23] and, as such, they can be used also for KR4 pavements. Table 1 presents the basic material properties of mixtures base course AC22P and ACWMS16 containing the respective bitumens. It gives also the parameters of the pavement courses that were used in the mechanistic calculations. The variants of the same mixture type, such as AC22P, have the same aggregate mix parameters and the same bitumen content, the only difference being the type of bitumen used. The values of the modulus of rigidity determined in the four-point bending tests on the prismatic beam specimens as per EN 12697-26 are also given. These are the indispensable input values for fatigue life calculations of the pavement structures using the mechanistic method. The module values were determined at 10 Hz frequency and at the temperatures of 10°C

<sup>2)</sup> AC22P – short name of asphalt concrete for base course layer used in Poland

<sup>3)</sup> ACWMS16 – short name of high modulus asphalt concrete used in Poland

wymagane w projektowaniu metodą AASHTO zgodnie z zasadami podanymi w Katalogu [20], natomiast wynik w temperaturze 10°C jest potrzebny w analizie z bezpośrednim wykorzystaniem charakterystyk zmęzeniowych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych.

and 13°C. The values obtained at 13°C are required for the AASHTO design method, as prescribed in the Catalogue [20] and the values at 10°C are used in the analysis using fatigue behaviours determined in laboratory.

Table 1. Properties of bituminous mixtures and base courses  
Tablica 1. Właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych i warstw podbudowy

Bituminous mixture / layer Mieszanka mineralno-asfaltowa / warstwa	AC22P			
Bitumen Asfalt	35/50	50/70	25/55-60	25/55-80
Bitumen content [% m/m] Zawartość asfaltu	3.9			
Soluble bitumen content [% m/m] Zawartość asfaltu rozpuszczalnego	3.7			
Air void content [% v/v] Zawartość wolnych przestrzeni	4.1	4.1	5.1	4.6
Stiffness (at 13°C, 10 Hz) [MPa] Szytywność (13°C, 10 Hz)	13 306	11 661	11 990	9 253
Stiffness (at 10°C, 10 Hz) [MPa] Szytywność (10°C, 10 Hz)	15 888	14 740	14 480	11 495
Base course layer, compaction factor 98% / Warstwa podbudowy, wskaźnik zagęszczenia 98%				
Air void content [% v/v] Zawartość wolnych przestrzeni	6.1	7.6	7.0	6.5
Soluble bitumen content [% v/v] Zawartość asfaltu rozpuszczalnego	8.7	8.6	8.7	8.7
Aggregate content [% v/v] Zawartość kruszywa	85.2	83.8	84.3	84.8
Bituminous mixture / layer Mieszanka mineralno-asfaltowa / warstwa	ACWMS16			
Bitumen Asfalt	20/30	10/40-65	25/55-60	25/55-80
Bitumen content [% m/m] Zawartość asfaltu	5.3			
Soluble bitumen content [% m/m] Zawartość asfaltu rozpuszczalnego	5.1			
Air void content [% v/v] Zawartość wolnych przestrzeni	2.8	3.1	3.6	2.8
Stiffness (at 13°C, 10 Hz) [MPa] Szytywność (13°C, 10 Hz)	13 980	11 794	11 874	8 019
Stiffness (at 10°C, 10 Hz) [MPa] Szytywność (10°C, 10 Hz)	16 223	14 452	14 385	9 958
Base course layer, compaction factor 98% / Warstwa podbudowy, wskaźnik zagęszczenia 98%				
Air void content [% v/v] Zawartość wolnych przestrzeni	4.7	5.1	5.5	4.7
Soluble bitumen content [% v/v] Zawartość asfaltu rozpuszczalnego	12.6	12.6	12.5	12.6
Aggregate content [% v/v] Zawartość kruszywa	82.7	82.3	82.0	82.6

## 4. METODA BADANIA

Badania zmęczeniowe przeprowadzono metodą belki 4-punktowo zginanej (4PB) zgodnie z normą PN-EN 12697-24. Warunki badania to temperatura 10°C, częstotliwość 10 Hz, tryb kontrolowanych odkształceń. Na podstawie wyników badań przy różnych wartościach amplitudy odkształcenia wyznaczono parametry tzw. charakterystyk zmęczeniowych. Pod tym pojęciem określa się trwałość zmęczeniową  $N$  w funkcji odkształceń  $\varepsilon$ . Relacja ta opisana jest równaniem:

$$N = A \cdot \varepsilon^b, \quad (1)$$

w którym wartości  $A$ ,  $b$  są współczynnikami określanymi w regresji liniowej.

Wyniki prezentowane są na wykresie o skali logarytmicznej, który nazywany jest wykresem Wöhlera (Rys. 1). Trwałość zmęczeniowa została wyznaczona na podstawie klasycznego kryterium zmęczenia, określającego moment zniszczenia jako liczbę cykli, po której sztywność próbki obniży się o 50% w porównaniu do sztywności początkowej.

W Tabl. 2 przedstawiono parametry charakterystyk zmęczeniowych uzyskanych w wyniku regresji liniowej oraz współczynniki korelacji regresji  $R^2$ .

## 4. TEST METHOD

For determining the fatigue parameters the four point bending method (4PB) as per EN 12697-24 was used in this research. The tests were performed at 10°C temperature and 10 Hz frequency in the controlled strain procedure. The experimental results obtained at different strain amplitudes were used to determine the parameters of the so-called fatigue relationships. By the fatigue relationship we mean the equation relating the fatigue life  $N$  to strain  $\varepsilon$ . This equation is given below:

where  $A$ ,  $b$  are the coefficients of the equation, whose values are determined by linear regression analysis.

The results are represented in a log-log chart called the Wöhler diagram (Fig. 1). The fatigue life was determined using the conventional fatigue damage criterion defined as the number of load cycles after which the initial stiffness is decreased by 50%.

Table 2 gives the fatigue parameters obtained by linear regression analysis and the regression correlation coefficient  $R^2$ .

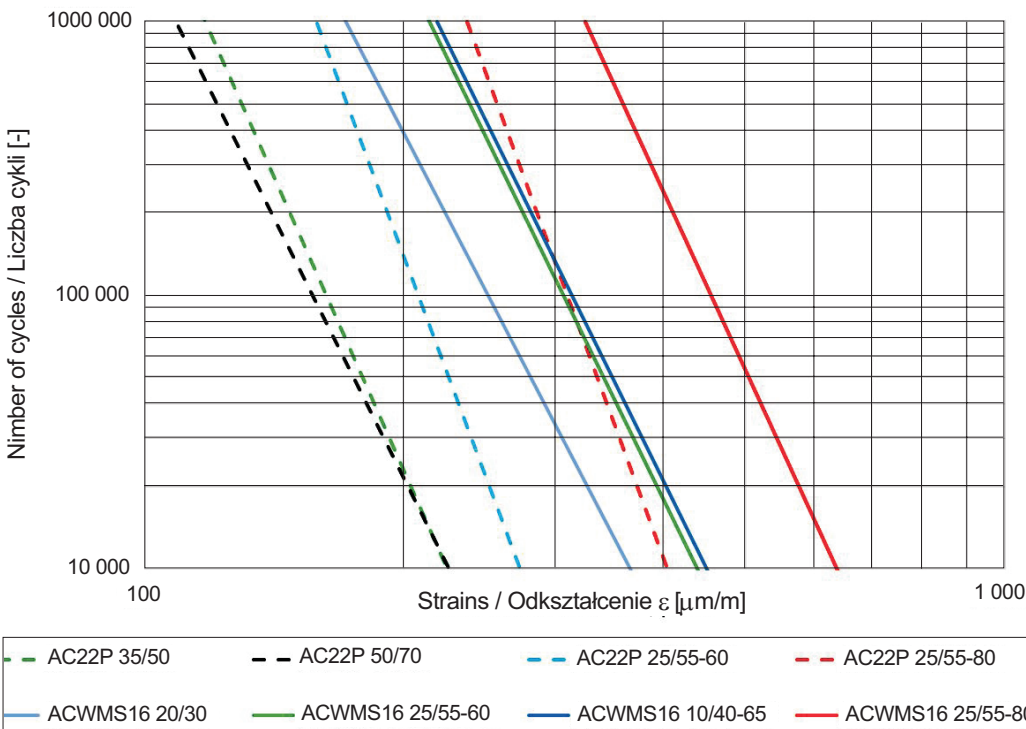


Fig. 1. Diagrams of fatigue behaviours  
Rys. 1. Wykresy charakterystyk zmęczeniowych

Table 2. Parameters of fatigue behaviours of bituminous mixture

Tablica 2. Parametry charakterystyk zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych

Bituminous mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa	Parameters / Parametry		
	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
AC22P 35/50	4.7E+20	-7.1	0.88
AC22P 50/70	6.0E+18	-6.3	0.87
AC22P 25/55-60	3.7E+24	-8.4	0.86
AC22P 25/55-80	1.9E+26	-8.5	0.95
ACWMS16 20/30	2.9E+19	-6.0	0.90
ACWMS16 25/55-60	7.9E+20	-6.4	0.94
ACWMS16 10/40-65	7.0E+20	-6.3	0.87
ACWMS16 25/55-80	1.3E+23	-6.8	0.97

## 5. ZAŁOŻENIA DO ANALIZ OBLICZENIOWYCH

### 5.1. KONSTRUKCJE NAWIERZCHNI

Analizy przeprowadzono na typowych konstrukcjach nawierzchni obciążonych ruchem KR4 i KR7 wg Katalogu [20], typ A.1 z podbudową zasadniczą z mieszanki niezwiązanej C90/3 i podłożu G1. Grubości warstw konstrukcyjnych zostały niezmienione w stosunku do podanych w Katalogu i są podane w Tabl. 3.

Table 3. Layout and thickness of structural layers of the road pavement

Tablica 3. Układ i grubości warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowej

Layer / Warstwa	Thickness of structural layers [cm] Grubość warstw konstrukcji		Resilient modulus [MPa] Moduł sztywności		Poisson's ratio [-] Współczynnik Poissona
	KR4	KR7	13°C	10°C	
Wearing / Ścieralna	4	4	7 000	8 500	0.30
Binder course / Wiążąca	6	8	10 300	12 000	0.30
Base course / Podbudowa zasadnicza	10	18	acc. to Table 1 / wg Tabl. 1		0.30
Base course of an unbound mixture C90/3 Podbudowa zasadnicza z mieszanki niezwiązanej C90/3	20	20	400		0.30
Subsoil / Podłoże gruntowe	–	–	120 (for/dla KR7) 100 (for/dla KR4)		0.35

### 5.2. METODA MECHANISTYCZNA

Metoda mechanistyczna projektowania konstrukcji nawierzchni polega na określeniu trwałości zmęczeniowej na podstawie analizy stanu naprężeń i odkształceń. W tym celu nawierzchnię traktuje się jako układ warstw o określonych grubościach na podłożu gruntowym o nieskończonej grubości. Najczęściej przyjmuje się model warstw sprężystych

## 5. ASSUMPTIONS OF CALCULATION ANALYSES

### 5.1. PAVEMENT STRUCTURES

The analyses were carried out on typical type A.1 pavement structures for KR4 and KR7 traffic class roads as per the Catalogue [20] with C90/3 unbound lower base course resting on G1 capacity subgrade. The thicknesses of the pavement courses, given in Table 3, are the same as in the Catalogue.

### 5.2. MECHANISTIC METHOD

In the mechanistic pavement design method fatigue life is determined by stress-strain analysis. Pavement is treated as a system of layers of definite thicknesses resting on a soil subgrade of infinite thickness. Most often it is modelled by elastic layers supported on elastic half-space. Each layer has a specific thickness  $h_i$ , modulus of elasticity

położonych na półprzestrzeni sprężystej. Poszczególne warstwy charakteryzowane są grubością  $h_i$ , modułem sprężystości (sztywności)  $E_i$  i współczynnikiem Poissona  $\nu_i$ . Moduły sztywności oraz współczynniki Poissona warstw konstrukcyjnych przyjęto zgodnie z wynikami badań oraz z zaleceniami Katalogu.

W celu dokonania obliczeń trwałości analizowanej konstrukcji nawierzchni podatnej konieczne jest wyznaczenie odkształceń rozciągających w spodzie warstw asfaltowych i odkształceń ściskających w stropie podłoża gruntowego. Obliczenia stanu naprężeń i odkształceń w konstrukcji przeprowadzono przy zastosowaniu programu NOAH 2.0, przyjmując założenia zgodnie z przyjętymi w opracowaniu Katalogu [20, 23]:

- nacisk osi 100 kN (nacisk koła 50.0 kN),
- ciśnienie kontaktowe  $q = 850$  kPa,
- temperatura równoważna  $10^\circ\text{C}$  lub  $13^\circ\text{C}$  w zależności od analizowanego wariantu.

Rozważane są dwa kryteria zniszczenia nawierzchni, tj. zmęczenia warstw asfaltowych oraz odkształcenia podłoża gruntowego. Obliczenia przeprowadzono stosując kryteria zalecane do stosowania w Polsce, tj. metodę AASHTO 2004 w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych oraz metodę Instytutu Asfaltowego. Trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych wg kryterium AASHTO 2004 opisana jest następującym równaniem:

$$N_{asf} = 7,3557 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot k'_1 \cdot \varepsilon_t^{-3,9492} \cdot E^{-1,281}, \quad (2)$$

w którym:

$$C = 10^M, \quad \text{gdzie } M = 4,84 \cdot \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right),$$

$N_{asf}$  – trwałość zmęczeniowa [liczba osi obliczeniowych],

$\varepsilon_t$  – odkształcenie rozciągające w spodzie warstw asfaltowych [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ],

$E$  – moduł sztywności [MPa],

$V_b$  – zawartość objętościowa asfaltu [% v/v],

$V_a$  – zawartość wolnych przestrzeni [% v/v],

$k'_1$  – parametr wg wzoru:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 1,374 \cdot h_{ac})}}},$$

$h_{ac}$  – grubość pakietu warstw asfaltowych.

Kryterium odkształcenia podłoża gruntowego przyjęto zgodnie z równaniem Instytutu Asfaltowego:

(rigidity)  $E_i$  and Poisson's ratio  $\nu_i$ . The values of the modulus of rigidity and the Poisson's ratio of the pavement courses were adopted according to the experimental results and as guided by the Catalogue.

For fatigue life calculation of flexible pavements it is necessary to determine the tensile strains at the bottom of asphalt layers and the compressive strains on the top of the soil subgrade. The stress-strain state calculations were carried out in NOAH 2.0 based on the following input data taken from the Catalogue [23]:

- 100 kN single axle load (50 kN wheel load),
- road contact pressure  $q = 850$  MPa,
- reference temperature:  $10^\circ\text{C}$  or  $13^\circ\text{C}$  depending on the analysed variant.

Two pavement failure criteria are considered: fatigue of asphalt courses and subgrade strain criterion. The calculations were carried out using the criteria recommended by the Polish codes, i.e. AASHTO 2004 in relations to the fatigue life of the pavement courses and the Asphalt Institute method. The AASHTO 2004 fatigue life criterion for asphalt courses of pavement is expressed by the following equations:

$$N_{asf} = 7.3557 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot k'_1 \cdot \varepsilon_t^{-3,9492} \cdot E^{-1,281}, \quad (2)$$

where:

$$C = 10^M, \quad \text{wherein } M = 4.84 \cdot \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right),$$

$N_{asf}$  – fatigue life [msa (million standard axles)],

$\varepsilon_t$  – tensile strain at the bottom of asphalt layers [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ],

$E$  – modulus of rigidity [MPa],

$V_b$  – bitumen content by volume [% v/v],

$V_a$  – air void content by volume [% v/v],

$k'_1$  – parameter calculated as follows:

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 1.374 \cdot h_{ac})}}},$$

$h_{ac}$  – asphalt package thickness.

Subgrade strain criterion according to the Asphalt Institute calculated as:

$$\varepsilon_p = 0.0105 \cdot N_g^{-0,223}, \quad (3)$$

where:



$$\varepsilon_p = 0,0105 \cdot N_g^{-0,223}, \quad (3)$$

w którym:

$N_g$  – trwałość podłoża [liczba osi obliczeniowych],

$\varepsilon_p$  – odkształcenie podłoża gruntowego [mm].

Trwałość konstrukcji  $N_{\min}$  jest mniejszą wartością z  $N_{asf}$  i  $N_g$ .

## 6. ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

### 6.1. WYZNACZENIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI WEDŁUG KRYTERIÓW EMPIRYCZNYCH

W Tabl. 4 zestawiono wyniki obliczeń odkształceń w podbudowie asfaltowej i w podłożu gruntowym według poszczególnych wariantów konstrukcji oraz wyników obliczeń trwałości konstrukcji metodą empiryczną AASHTO 2004 (2) i Instytutu Asfaltowego (3). Uzyskane wyniki należy odnieść do zakresów liczby osi obliczeniowych 100 kN w okresie projektowym, jakie są przewidziane dla danej kategorii ruchu. Jest to przedział od 2.5 do 7.4 mln osi dla kategorii KR4 i powyżej 52 mln osi dla kategorii KR7. Uzyskane trwałości analizowanych konstrukcji nawierzchni spełniają te wymagania w większości analizowanych przypadków. Jedynie w przypadku konstrukcji KR7 z konwencyjnym betonem asfaltowym uzyskano wyniki niższe niż minimalna wymagana liczba osi. W przypadku mieszanki AC22P 50/70 trwałość jest o około 30% mniejsza niż wymaganie. Można więc zakładać, że zastosowanie tego rodzaju asfaltu przy najwyższej kategorii ruchu nie jest wskazane. Wyniki pozostałych dwóch mieszanek AC22P z asfaltami modyfikowanymi są o około 10% niższe niż wymagane 52 mln osi. W tym przypadku należy zauważyć, że kryterium AASHTO nie uwzględnia korzystnego wpływu polimeroasfaltów na trwałość zmęczeniową mma i konstrukcji.

### 6.2. ANALIZA CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH

Porównanie charakterystyk zmęczeniowych uzyskanych w laboratorium można wykonać na różne sposoby. Pierwszym z nich i jednocześnie najczęściej stosowanym jest wyznaczenie wartości  $\varepsilon_6$ , która to wartość z definicji jest odkształceniem, przy którym w badaniu zmęczeniowym uzyskuje się trwałość równą 1 mln cykli. Wartość tę odczytuje się z wykresu Wöhlera lub oblicza się z przekształcenia (1). Parametr  $\varepsilon_6$  jest wartością umowną zdefiniowaną w normach PN-EN 12697-24 i PN-EN 13108-1 oraz

$N_g$  – fatigue life of subgrade [msa (million standard axles)],

$\varepsilon_p$  – subgrade strain [mm].

The smaller of the two values  $N_{asf}$  and  $N_g$  is taken as the pavement fatigue life  $N_{\min}$ .

## 6. ANALYSIS OF FATIGUE LIFE

### 6.1. DETERMINING STRUCTURAL FATIGUE LIFE ACCORDING TO EMPIRICAL CRITERIA

The calculated values of strains in the asphalt base course and soil subgrade for different pavement design variants and the fatigue life of pavements obtained with the AASHTO 2004 (2) and methods of the Asphalt Institute (3) are compiled in Table 4. These results can be related to the ranges of 100 kN standard axle applications during the design life of pavement depending on the traffic class of the road. These ranges are 2.5-7.4 and over 52 million axles for traffic classes KR4 and KR7 respectively. These requirements are generally satisfied by the pavements under analysis. The only exception is KR7 pavement including an AC layer where the results were below the minimum number of standard axle load repetitions. The fatigue life obtained for AC22P 50/70 mixture is ca. 30% below the requirement. Therefore, application of this mixture for higher traffic class roads should be discouraged. The results obtained for the two other AC22P mixtures containing polymer-modified bitumens are ca. 10% below the requirement of 52 million standard axles. It is worthwhile noting at this point that the AASHTO criterion ignores the beneficial effect of polymer-modified bitumens on the fatigue life of asphalt mixtures and pavements containing them.

### 6.2. ANALYSIS OF FATIGUE BEHAVIOURS

There are different ways to compare fatigue behaviours determined in laboratory. The most widely used is the method based on determination of  $\varepsilon_6$  defined as the strain for which fatigue life of 1 million load repetitions is obtained in the fatigue test. Its value can be obtained from the Wöhler chart or calculated by rearranging equation (1). It is a conventional value defined in EN 12697-24, EN 13108-1 and in the Polish code of practice No. WT-2 2014 [23]. It can be used for determining whether a mixture satisfies the specifications or for a simplified comparison of different mixtures in terms of their fatigue life. In the case of the analysed mixtures a clearly higher fatigue life is observed for mixtures

w wymaganiach WT-2 2014 [23]. Na tej podstawie można ocenić, czy mieszanka spełnia zadane wymagania lub można w uproszczony sposób porównać mieszanki w zakresie trwałości zmęczeniowej. W przypadku analizowanych mieszank widać wyraźny wzrost trwałości zmęczeniowej dla mieszank z polimeroasfaltami w porównaniu do asfaltów drogowych, jak również wyraźną przewagę w tym zakresie mieszank z asfaltami wysokomodyfikowanymi (Rys. 2). Istotna jest również korzyść w zakresie trwałości zmęczeniowej mieszank typu ACWMS w porównaniu do mieszank zwykłego betonu asfaltowego AC22P.

containing polymer-modified bitumens as compared to the standard paving grade bitumens which are also clearly outperformed by the highly modified bitumens (Fig. 2). Note also the better fatigue life of HMAC mixtures as compared with ordinary asphalt concrete mixture AC22P.

Table 4. Results of pavement design calculations using the empirical method

Tablica 4. Wyniki obliczeń trwałości konstrukcji metodą empiryczną

Structure Konstrukcja	Basecourse of bituminous mixture Warstwa podbudowy z mieszanki mineralno-asfaltowej	$\epsilon_{asf}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\epsilon_g$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$N_{asf}$ [msa/mln osi]	$N_g$ [msa/mln osi]	$N_{min}$ [msa/mln osi]
KR4 (2.5 - 7.4 [msa/mln osi])	AC22P 35/50	77.5	263	7.1	15.1	7.1
	AC22P 50/70	82.8	271	3.3	13.2	3.3
	AC22P 25/55-60	81.7	269	4.3	13.7	4.3
	AC22P 25/55-80	92.8	284	4.6	10.7	4.6
	ACWMS16 20/30	75.6	260	34.2	15.9	15.9
	ACWMS16 10/40-65	82.3	270	25.6	13.5	13.5
	ACWMS16 25/55-60	82.0	270	20.8	13.5	13.5
	ACWMS16 25/55-80	99.5	294	23.1	9.2	9.2
KR7 ( $> 52$ [msa/mln osi])	AC22P 35/50	41.6	137	79.6	281.9	79.6
	AC22P 50/70	44.7	142	36.3	240.0	36.3
	AC22P 25/55-60	44.1	141	46.7	247.7	46.7
	AC22P 25/55-80	50.7	153	47.7	171.8	47.7
	ACWMS16 20/30	40.5	135	385.8	301.1	301.1
	ACWMS16 10/40-65	44.5	142	278.0	240.0	240.0
	ACWMS16 25/55-60	44.3	141	226.5	247.7	226.5
	ACWMS16 25/55-80	54.7	160	235.4	140.5	140.5

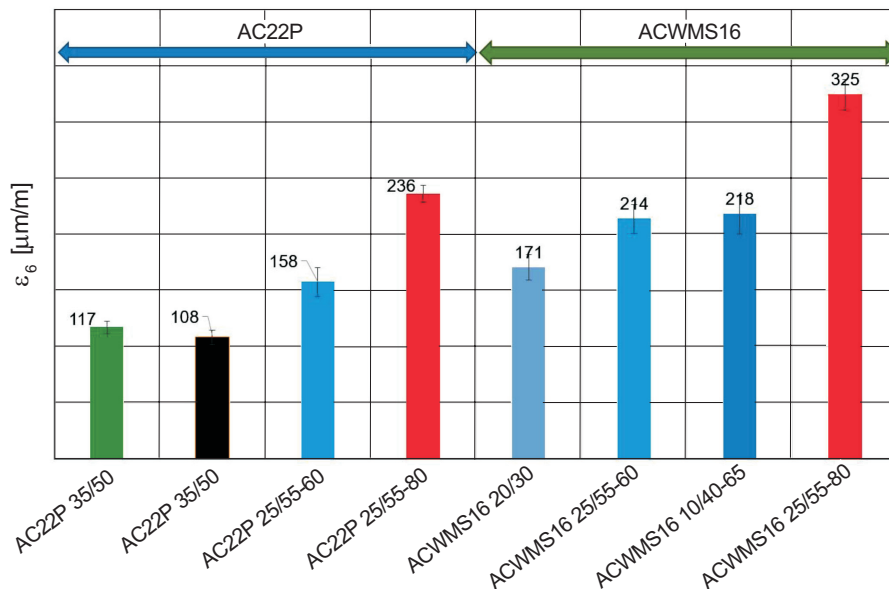


Fig. 2. Comparison of  $\epsilon_6$  values with 95% confidence interval  
Rys. 2. Porównanie wartości  $\epsilon_6$  wraz z podaniem przedziału ufności 95%

### 6.3. ANALIZY WYNIKÓW METODĄ ENERGETYCZNĄ

Według powszechnie stosowanego konwencjonalnego kryterium zmęczeniowego próbka uznawana jest za zniszczoną w momencie, kiedy moduł sztywności osiągnie 50% wartości początkowej. Alternatywnym kryterium jest kryterium zmęczeniowe według metody energetycznej, w której trwałość oznaczana jest jako  $N1$ . Podczas badania zmęczenia można zaobserwować nagłą zmianę w wykresie energii rozproszonej, co wskazuje na rozpoczęcie końcowej fazy badania, czyli gwałtownej degradacji próbki. Według definicji energetycznej trwałość  $N1$  jest to liczba cykli, po której następuje odchylenie wykresu współczynnika energii rozproszonej od linii prostej [24]. W pracy wykorzystano metodę wyznaczania  $N1$  opracowaną przez Rowe'a [25], w której trwałość zmęczeniowa  $N1$  określana jest jako liczba cykli, po której funkcja wyrażona iloczynem liczby cykli  $n$  i sztywności  $E$  osiąga maksimum. Efektem analiz są wartości parametru  $\epsilon_6$  na Rys. 3. Porównując uzyskane wartości tego parametru nie stwierdzono istotnych różnic w wynikach. Wniosek ten dotyczy zarówno mieszanek z asfaltami drogowymi, jak i polimeroasfaltami oraz asfaltami wysokomodyfikowanymi. Nie można więc potwierdzić hipotezy o istotnym wpływie kryterium zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową.

### 6.3. ANALYSES OF RESULTS BY APPLYING THE ENERGY DISSIPATION METHOD

According to the most widely used criterion fatigue failure occurs at 50% reduction in the initial stiffness value. An alternative to the above is the fatigue criterion according to the energy dissipation with fatigue life designated  $N1$ . During the fatigue test at a certain moment a sudden change in the dissipated energy curve is noticeable designating the beginning of the final phase of the test during which the specimen undergoes rapid deterioration. Thus the fatigue life  $N1$  is defined in the energy dissipation method as the number of load cycles at which the curve of the energy dissipation ratio depart from the straight line [24]. The Rowe's method [25] was used to determine the value of fatigue life  $N1$  in which it is defined as the number of cycles at which the function being the product of the number of cycles and stiffness  $E$  reaches its maximum. The results of the analyses, i.e. the value of  $\epsilon_6$  are given in Fig. 3. The values were compared and no significant differences were found. This concerns the mixtures containing standard paving grade bitumens, polymer-modified bitumens and highly modified bitumens alike. Therefore the hypothesis of the significant effect of the fatigue criterion on the fatigue life cannot be confirmed at this point.

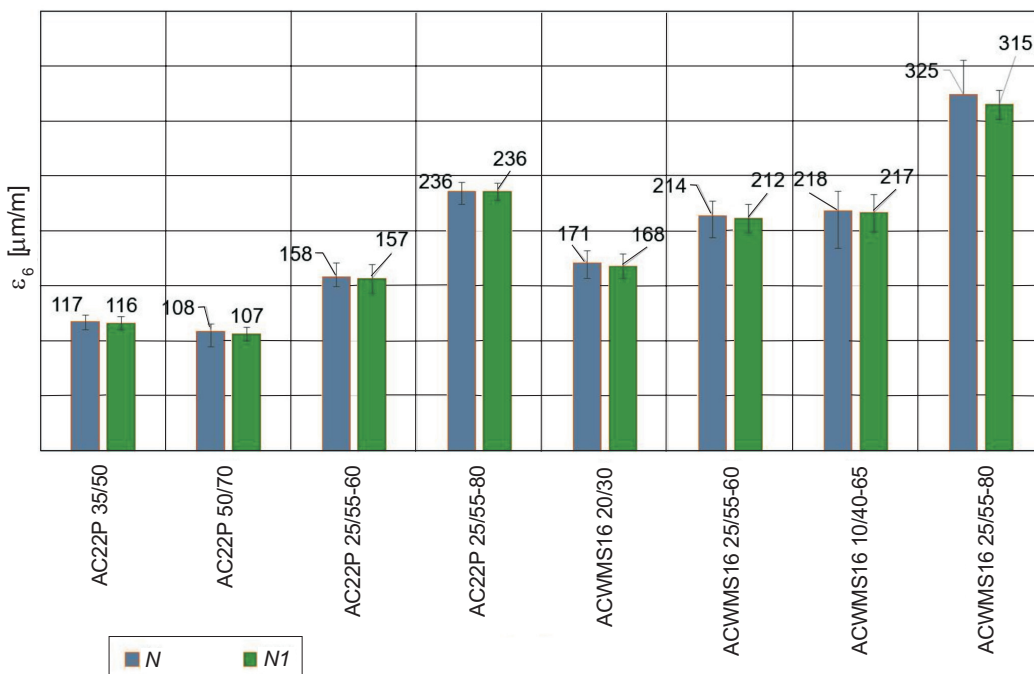


Fig. 3. Comparison of  $\epsilon_6$  values derived from conventional  $N$  and energetic  $N1$  methods  
Rys. 3. Porównanie wartości  $\epsilon_6$  otrzymanych metodą konwencjonalną  $N$  oraz energetyczną  $N1$

#### 6.4. WYZNACZANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI WEDŁUG CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH

Ponieważ wykresy zmęczenia różnią się między sobą również nachyleniem  $b$ , może się okazać, że wynik porównania charakterystyk zmęczenia będzie zależał od poziomu trwałości lub poziomu odkształcenia. Z tego powodu bardziej miarodajnym porównaniem charakterystyk zmęczenia jest obliczenie trwałości zmęczenia dla odkształceń rozciągających się w spodzie podbudowy asfaltowej wykonanej z danej mieszanki. W ten sposób uwzględniony zostanie wpływ sztywności mieszanki i wykonanej z niej warstwy. Wyniki sztywności mieszanek przedstawione w Tabl. 1 wskazują, że różnica między mieszankami o najwyższej i najniższej sztywności może być nawet dwukrotna. W rezultacie różnią się istotnie odkształcenia rozciągające w warstwach podbudowy wykonanych z różnych materiałów. W ramach analizy przeprowadzono obliczenia metodą mechanistyczną w temperaturze równoważnej 10°C, jako odpowiadającej temperaturze badania zmęczenia. Ogólnie można zauważyć, że największe odkształcenia rozciągające występują w konstrukcjach z mieszankami na bazie asfaltów wysokomodyfikowanych. Dotyczy to zarówno mieszanki AC22P, jak i ACWMS16, a jest efektem wyraźnie niższych sztywności mieszanek z asfaltem 25/55-80. Wyniki obliczeń odkształceń oraz trwałości zmęczenia z zastosowaniem charakterystyk zmęczenia przedstawiono w Tabl. 5.

Table 5. Results of tensile strain calculations in bituminous layers and fatigue life on the basis of fatigue behaviours  
Tablica 5. Wyniki obliczeń odkształceń rozciągających w warstwach asfaltowych i trwałości zmęczenia na podstawie charakterystyk zmęczenia

Mixture in a basecourse Mieszanka w warstwie podbudowy	Structure KR4 / Konstrukcja KR4		Structure KR7 / Konstrukcja KR7	
	strain odkształcenie [mm/m]	fatigue life trwałość zmęczenia [msa / mln osi obl.]	strain odkształcenie [mm/m]	fatigue life trwałość zmęczenia [msa / mln osi obl.]
AC22P 35/50	65.5	63	34.7	5 656
AC22P 50/70	68.1	19	36.2	984
AC22P 25/55-60	68.7	1 132	36.6	230 587
AC22P 25/55-80	77.5	13 644	41.7	2 723 710
ACWMS16 20/30	64.7	350	34.3	16 074
ACWMS16 10/40-65	68.8	1 412	36.6	79 869
ACWMS16 25/55-60	69.0	1 489	36.7	81 906
ACWMS16 25/55-80	83.4	10 485	45.1	691 276

Pomimo największych odkształceń rozciągających, najwyższe wyniki trwałości uzyskują rozwiązania z zastosowaniem asfaltów wysokomodyfikowanych. Mieszanki z polimero-

#### 6.4. DETERMINING STRUCTURAL FATIGUE LIFE ACCORDING TO EMPIRICAL CRITERIA

Since the fatigue curves have also different slopes  $b$  the comparisons of fatigue curves may yield different results depending on the fatigue life or strain level at which they are made. For this reason, fatigue life based on tensile strain at the bottom of asphalt base course would provide a more reliable comparison of the fatigue behaviours of different asphalt mixtures. In this way the stiffness of both the mixture and the pavement are taken into account. The mixture stiffness values given in Table 1 show that the difference between the mixtures of the highest and lowest stiffness values can be almost double. As a consequence, considerably different tensile strains are obtained for the base courses made of different materials. As part of this analysis mechanistic method calculations were conducted at 10°C taken as being equivalent to the fatigue test temperature. Generally the greatest tensile strains are observed in pavements made with the use of materials containing highly modified bitumens. This concerns both AC22P and ACWMS16 mixtures and results from considerably lower stiffness values of the mixtures containing the 25/55-80 bitumen. The strains and fatigue lives calculated using the experimentally determined fatigue behaviours are given in Table 5.

The variants containing highly modified bitumens outperform other mixtures in terms of fatigue life. The mixtures containing polymer-modified bitumens were not as

asfaltami uzyskały w tym zakresie wyniki na niższym poziomie, jednak lepsze niż dla mieszanek z asfaltami drogowymi. Należy zauważyć bardzo wysoki poziom wyników trwałości mieszanek z polimeroasfaltami. Uzyskano wartości nawet o kilka rzędów wielkości wyższe niż wymagane trwałości konstrukcji. Potwierdza to tezę, że stosowanie charakterystyk zmęczeniowych z laboratorium wymaga stosowania współczynników przeliczeniowych zwanych współczynnikami przesunięcia. Jednocześnie świadczy też o tym, że stosowanie empirycznych kryteriów zmęczeniowych dla konstrukcji z polimeroasfaltami prowadzi do niedoszacowania trwałości zmęczeniowej. Wyniki uzyskane z obliczeń dla mieszanek z asfaltami drogowymi są także wyższe niż wyniki uzyskane z kryterium AASHTO.

## 6.5. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZESUNIĘCIA

Uznając, że kryterium AASHTO jest metodą uznaną do stosowania w Polsce można uznać te wyniki jako wartości odniesienia do określenia tzw. współczynników przesunięcia do zastosowania wobec wyników badań laboratoryjnych mieszanek z asfaltami drogowymi. Obliczenie trwałości konstrukcji  $N_{asf}$  na podstawie charakterystyk zmęczeniowych można wówczas wyznaczyć z równania:

$$N_{asf} = A \cdot (c \cdot \varepsilon)^b, \quad (4)$$

w którym  $A$ ,  $b$  są współczynnikami charakterystyki zmęczeniowej, natomiast  $c$  jest współczynnikiem przesunięcia.

Wyniki obliczenia współczynnika przesunięcia  $c$  przedstawiono w Tabl. 6. Współczynnik ten zależy przede wszystkim od grubości konstrukcji wynikającej z kategorii ruchu, a w mniejszym stopniu od rodzaju asfaltu czy mieszanki. Opracowanie takich współczynników wymaga jednak szerszych analiz z uwzględnieniem większej bazy wyników oraz korzystania z badań terenowych.

## 6.6. WYZNACZANIE ODKSZTAŁCEŃ KRYTYCZNYCH I WSKAŹNIKÓW TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

W ramach analizy wprowadzono dwa nowe parametry: odkształcenie krytyczne  $\varepsilon_{kryt}$  oraz wskaźnik trwałości zmęczeniowej  $W(\varepsilon)$ . Odkształcenia krytyczne wyznacza się na podstawie równań charakterystyki zmęczeniowej dla poszczególnych mieszanek przy założeniu trwałości zmęczeniowej 7.4 mln osi dla konstrukcji KR4 i 52 mln osi dla konstrukcji KR7 (Tabl. 7). Im większa wartość  $\varepsilon_{kryt}$ , tym lepsze właściwości zmęczeniowe danej mieszanki, tzn. do uzyskania granicznej trwałości zmęczeniowej wynikającej z kategorii ruchu należy zadać większą wartość odkształcenia w badaniu zmęczenia. Można uznać, że jest to podobna koncepcja jak przy parametrze  $\varepsilon_c$ .

good in this respect yet still better than the mixtures containing ordinary paving grade bitumens. Note the very high values obtained for the mixtures containing polymer-modified bitumens. They are even by a few orders of magnitude higher than the respective fatigue life requirements. This confirms the need to apply the so-called shift factors to the fatigue behaviours determined in laboratory. This also proves that for polymer-modified materials empirical fatigue criteria result in underestimating the fatigue life of pavement. The calculated results for the mixtures containing pen-grade bitumens are also higher than the values obtained with the AASHTO criterion.

## 6.5. DETERMINING SHIFT FACTORS

Given that the AASHTO criterion is the method of choice in Poland we can consider these results as the reference values for determining the so-called shift factors to be applied for the experimental results from testing paving grade bitumen mixtures in laboratory. Then the value of pavement life  $N_{asf}$  can be calculated on the basis of the fatigue parameters using the following equation:

where  $A$ ,  $b$  are the coefficients of the fatigue equation, and  $c$  is the shift factor.

The calculated values of  $c$  are given in Table 6. It depends primarily on the thickness of pavement defined by the traffic class of the road and, to a lesser extent, on the type of bitumen or mixture design. However, broader analyses must be performed in relation to these coefficients, using a larger data base of results including *in-situ* tests.

Table 6. Shift factor, from eq. (4)

Tablica 6. Współczynnik przesunięcia, z równania (4)

Asphalt mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa	Shift factor / Współczynnik przesunięcia $c$	
	KR4	KR7
AC22P 35/50	1.28	1.70
AC22P 50/70	1.22	1.55
ACWMS16 20/30	1.37	1.72

## 6.6. DETERMINING CRITICAL STRAINS AND FATIGUE LIFE FACTORS

As part of this analysis two new parameters have been introduced: critical strain  $\varepsilon_{kryt}$  and fatigue life ratio  $W(\varepsilon)$ . The former is determined from the fatigue equations for

Table 7. Calculation results of critical strains  $\varepsilon_{kryt}$   
 Tablica 7. Wyniki obliczeń odkształceń krytycznych  $\varepsilon_{kryt}$

Asphalt mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa	$\varepsilon_{kryt}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	
	KR4 ( $N = 7.4$ msa / mln osi)	KR7 ( $N = 52.0$ msa / mln osi)
AC22P 35/50	89	67
AC22P 50/70	79	58
AC22P 25/55-60	125	99
AC22P 25/55-80	189	151
ACWMS16 20/30	126	92
ACWMS16 10/40-65	156	115
ACWMS16 25/55-60	159	117
ACWMS16 25/55-80	242	182

Wskaźnik trwałości zmęczeniowej  $W(\varepsilon)$  wiąże wyniki trwałości uzyskanej w laboratorium z pracą całej konstrukcji nawierzchni i określa się go równaniem:

$$W(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_{kryt}}{\varepsilon_{asf}}, \quad (5)$$

gdzie:

$\varepsilon_{kryt}$  – odkształcenie krytyczne dla danej konstrukcji według charakterystyk zmęczeniowych z laboratorium [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ],

$\varepsilon_{asf}$  – odkształcenie w spodzie warstw asfaltowych konstrukcji wyznaczone w analizie mechanistycznej [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ].

Wskaźnik trwałości zmęczeniowej  $W(\varepsilon)$  jest parametrem, który wskazuje, ile razy odkształcenie krytyczne  $\varepsilon_{kryt}$  jest większe (lub mniejsze), niż odkształcenie w warstwie podbudowy wyznaczone metodą mechanistyczną (Tabl. 8). Można ten parametr traktować jako teoretyczny zapas bezpieczeństwa w zakresie trwałości zmęczeniowej mieszanki w odniesieniu do trwałości danej konstrukcji.

Na podstawie uzyskanych wyników odkształceń krytycznych i wskaźnika trwałości zmęczeniowej można zauważyć różnice w zależności od zastosowanego rodzaju asfaltu i typu mieszanki mineralno-asfaltowej. Wnioski są niezależne od grubości konstrukcji i wskazują na lepsze właściwości zmęczeniowe mieszanek ACWMS w porównaniu do klasycznego betonu asfaltowego. Potwierdzają się w tym zakresie obserwacje z analizy charakterystyk zmęczeniowych. Efektywność zmęczeniowa konstrukcji z ACWMS 20/30 jest na tym samym poziomie co betonu asfaltowego AC22P z polimeroasfaltem 25/55-60. Istotny jest również wpływ w zakresie danego typu mieszanki z zastosowania asfaltów modyfikowanych, a w szczególności wysokomodyfikowanych.

the respective mixtures, assuming fatigue life of 7.4 and 52 million load repetitions for traffic classes KR4 and KR7 respectively (Table 7). For a given mixture the higher the value of  $\varepsilon_{kryt}$  the better are its fatigue parameters, i.e. a higher strain value should be used in the fatigue test to get the fatigue limit defined by the traffic class of the road. This is similar to the  $\varepsilon_6$  based technique.

The fatigue ratio  $W(\varepsilon)$  is a parameter combining the fatigue life obtained in laboratory with the pavement behaviour described by the following equation:

$$W(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_{kryt}}{\varepsilon_{asf}}, \quad (5)$$

where:

$\varepsilon_{kryt}$  – critical strain determined for a given pavement based on the fatigue parameters determined in laboratory [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ],

$\varepsilon_{asf}$  – strain at the bottom of asphalt layers determined through mechanistic analysis [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ].

The fatigue life ratio  $W(\varepsilon)$  indicates how many times the critical strain  $\varepsilon_{kryt}$  is higher (or lower) than the base course strain determined with the mechanistic method (Table 8). It can be considered a theoretical safety margin when the pavement life is estimated on the basis of the fatigue life of the mixture.

Table 8. Calculation results of fatigue life index  $W(\varepsilon)$   
 Tablica 8. Wyniki obliczeń wskaźnika trwałości zmęczeniowej  $W(\varepsilon)$

Asphalt mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa	Structure // Konstrukcja	
	KR4	KR7
AC22P 35/50	1.1	1.6
AC22P 50/70	1.0	1.3
AC22P 25/55-60	1.5	2.2
AC22P 25/55-80	2.0	3.0
ACWMS16 20/30	1.7	2.3
ACWMS16 10/40-65	1.9	2.6
ACWMS16 25/55-60	1.9	2.6
ACWMS16 25/55-80	2.4	3.3

The obtained values of critical strain and fatigue ratio display differences depending on the type of bitumen and asphalt mixture. The ACWMS mixtures are found to outperform the conventional asphalt concrete from the fatigue life point of view, irrespective of the pavement thickness. This conclusion is consistent with the conclusions drawn from analysing the performance parameters.

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki badań laboratoryjnych zmęczenia wykazały zróżnicowanie uzyskanych wyników zarówno ze względu na typ mieszanki, tj. AC22P i ACWMS16, jak i rodzaj zastosowanego asfaltu. W zakresie wpływu rodzaju mieszanki lepszymi parametrami zmęczeniowymi charakteryzowały się mieszanki betonu asfaltowego o wysokim module sztywności. Wyraźnie widoczny był również wpływ i stopień modyfikacji asfaltu. Najwyższe trwałości zmęczeniowe uzyskały mieszanki z asfaltami wysokomodyfikowanymi. W przypadku polimeroasfaltów na podstawie wyników ACWMS można stwierdzić, że mieszanki z polimeroasfaltami 25/55-60 i 10/40-65, pomimo różnic we właściwościach lepiszczy, nie wykazują różnic w zakresie trwałości zmęczeniowej  $\text{mm}$ . Beton asfaltowy ACWMS16 20/30 uzyskał wynik trwałości zmęczeniowej na poziomie  $170 \mu\text{m/m}$ , a więc dużo wyższym niż aktualne wymagania w tym zakresie. Jednocześnie jest to wynik nawet lepszy niż w przypadku mieszanki AC22P z polimeroasfaltem 25/55-60. Mieszanki AC22P z asfaltami drogowymi uzyskały wyniki najniższe, poniżej wymagania dla ACWMS ( $130 \mu\text{m/m}$ ). Zasadniczo mieszanki ACWMS wykazują istotnie lepsze właściwości zmęczeniowe niż konwencjonalne betony asfaltowe.

Konstrukcje z mieszankami ACWMS w podbudowie wykazują znacznie wyższe wartości prognozowanej trwałości niż konstrukcje z AC22P. Różnice wyników przy tych samych konstrukcjach i materiałach są nawet kilkukrotne. Jednocześnie konstrukcje z podbudową ACWMS i AC22P mają różną charakterystykę pracy w zakresie kryteriów trwałości. W przypadku konstrukcji AC22P decydujące jest kryterium zmęczenia warstw asfaltowych, a w przypadku ACWMS decydujące jest kryterium deformacji podłoża.

W zakresie wpływu zastosowanego asfaltu na kryterium zmęczenia według AASHTO 2004, w każdym z rozpatrywanych przypadków uzyskano wyższe wartości trwałości konstrukcji dla mieszanek referencyjnych z asfaltem drogowym 35/50 lub 20/30 niż w przypadku mieszanek z polimeroasfaltami. Wynika to z faktu, iż kryterium to nie uwzględnia w swoich parametrach korzystnych właściwości zmęczeniowych polimeroasfaltów, a praktycznie jedynym czynnikiem związanym pośrednio z lepiszczem jest sztywność mieszanki.

Wprowadzenie pojęcia odkształcenia krytycznego  $\varepsilon_{\text{kryt}}$  pozwala na porównanie efektywności zastosowania poszczególnych mieszanek do konstrukcji pod daną kategorię ruchu. Parametr ten wyraźnie różnicuje mieszanki zarówno pod względem ich typu jak i zastosowanych asfaltów. Widoczny

The fatigue performance of pavements made of ACWMS 20/30 mixture is at the same level as the pavement made with AC22P concrete pavement containing 25/55-60 polymer modified bitumen. Moreover, the performance of a given mixture can be changed by using polymer modified bitumens, and highly modified bitumens in particular.

## 7. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The results of fatigue tests in laboratory vary depending on both the mixture type, i.e. AC22P and ACWMS16 and the bitumen used for the mixture production. Among the asphalt concrete mixtures, better fatigue parameters were obtained for the high modulus mixture. Clearly visible is also the effect of modification of bitumen and its degree. The highest fatigue limits were obtained for the mixtures containing highly modified bitumens. Based on the results obtained from testing the HMAC mixtures we can conclude that mixtures containing 25/55-60 and 10/40-65 polymer modified bitumens do not exhibit differences in the fatigue life despite different properties of the binders they contain. The fatigue limit of  $170 \mu\text{m/m}$  that was obtained for ACWMS16 20/30 asphalt concrete is much higher than the current requirement. Moreover, it outperforms in this respect also the AC22P mixture containing 25/55-60 polymer-modified bitumen. The AC22P mixtures with ordinary paving grade bitumens had the lowest values among the obtained results, below the requirement set for HMAC mixture ( $130 \mu\text{m/m}$ ). Generally, in terms of fatigue behaviour the HMAC mixtures outperform the traditional asphalt concrete mixtures.

The predicted fatigue life of pavements incorporating HMAC base courses is much better than the fatigue life of pavements including AC22P mixture. The differences of even a few times are noted for the same pavement structures and materials. For the pavements with HMAC and AC22P base courses the adopted fatigue criteria influence the fatigue life predictions. The fatigue life predictions are governed by the fatigue limit of asphalt layers in the case of AC22P mixture and by the subgrade strain criterion in the case of HMAC mixture.

With the AASHTO 2004 fatigue life criterion the reference mixtures containing 35/50 or 20/30 ordinary paving grade bitumen outperformed the mixtures containing polymer modified bitumens in each of the analysed cases. This is because this criterion ignores good fatigue parameters of polymer modified bitumens, the mixture stiffness being about the only parameter on which the binder has a bearing.

jest korzystny efekt z zastosowania mieszanek ACWMS jak i polimeroasfaltów. Wskaźnik trwałości zmęczeniowej  $W(\varepsilon)$  dodatkowo uwzględnia wartość odkształceń w konstrukcji z określoną podbudową asfaltową, jest więc wartością jeszcze bardziej miarodajną, uwzględniającą mniejsze sztywności mieszanek z polimeroasfaltem, a w szczególności z asfaltem wysokomodyfikowanym. Analiza wartości tego wskaźnika również pokazuje korzystny efekt zastosowania polimeroasfaltów i mieszanki ACWMS. Pomimo mniejszej sztywności i większych odkształceń w konstrukcji najkorzystniejsze wyniki uzyskano w przypadku zastosowania asfaltu 25/55-80.

Analiza względnych wskaźników trwałości zmęczeniowej konstrukcji wskazuje na korzyści z zastosowania polimeroasfaltów i asfaltów wysokomodyfikowanych. Opracowano ranking mieszanek względem efektywności zastosowania w konstrukcji w zakresie trwałości zmęczeniowej (Tabl. 9). Najlepszymi mieszankami okazały się mieszanki z asfaltami wysokomodyfikowanymi, a najłagodniejszymi mieszanki AC22P z asfaltem 57/70 i 35/50. Mieszanki z polimeroasfaltami stanowią rozwiązania pośrednie. Widoczna jest również przewaga zastosowania mieszanki ACWMS. Na uwagę zasługuje pozycja w środku rankingu mieszanki ACWMS z najtwardszym asfaltem 20/30, która ma nawet wyższą efektywność niż mieszanka AC22P z polimeroasfaltem 25/55-60. Można stwierdzić, że wnioski wynikające z analizy wyników laboratoryjnych, jak i analiz konstrukcji są w tym zakresie zbieżne.

Table 9. Ranking the effectiveness of bituminous mixtures within the scope of fatigue life

Tablica 9. Ranking efektywności mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie trwałości zmęczeniowej

Asphalt mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa	According to analyses of structures Według analiz konstrukcji		According to laboratory tests Według badań laboratoryjnych
	KR4	KR7	
AC22P 35/50	7	7	7
AC22P 50/70	8	8	8
AC22P 25/55-60	6	6	6
AC22P 25/55-80	2	2	2
ACWMS16 20/30	5	5	5
ACWMS16 10/40-65	4	4	4
ACWMS16 25/55-60	3	3	3
ACWMS16 25/55-80	1	1	1

Należy również zauważyć, że konstrukcje z mieszankami opartymi na asfaltach wysokomodyfikowanych charaktery-

With the proposed parameter of critical strain  $\varepsilon_{kryt}$  it is possible to compare the efficacy of the respective mixtures depending on traffic class of pavement. This parameter clearly differentiates different types of mixtures and bitumens used to produce them. It displays the beneficial effect of using both HMAC mixtures and polymer modified bitumens. Fatigue life ratio  $W(\varepsilon)$  is even more representative as it additionally considers the value of strain induced in a pavement structure with a specific asphalt base course thus taking into account smaller stiffness of mixtures containing polymer modified bitumens which is even smaller in the case of highly modified bitumens. Moreover, analysing its values we can see the beneficial effect of both HMAC mixture and polymer modified bitumens. The most desirable results were obtained with 25/55-80 bitumen, despite its smaller stiffness and greater strains induced in the pavement.

The values of relative fatigue life ratios calculated for the pavement indicate a beneficial effect of both polymer modified and highly modified bitumens. The mixtures were ranked according to their effect on the fatigue life of pavement (Table 9). The mixtures containing highly modified bitumens occupy the highest positions and AC22P mixtures containing 57/70 and 35/50 bitumens are at the bottom of this ranking. The mixtures containing polymer modified bitumens are a half-way option. The advantage from using HMAC mixture is also discernible. Noteworthy is the middle-ranking position of HMAC mixture containing the hardest, 20/30 bitumen which outperforms even the AC22P mixture with 25/55-60 polymer-modified bitumen. In this respect, the conclusions made on the basis of laboratory results can be considered consistent with the conclusions drawn from the structural analyses.

Moreover, it is important to note that the pavements including mixtures based on highly modified bitumens exhibited relatively the highest strains at the bottom of asphalt layers which were offset by very good fatigue parameters of this bitumen and of the asphalt mixture as a consequence. This allows us to conclude that the stiffness of both the asphalt mixture and the layer for which it is used is not a governing factor for the fatigue life of pavement because the fatigue behaviour of the asphalt mixture also plays a very important role.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The paper has come out as a part of a project entitled "Road and modified bitumens in Polish weather conditions" co-funded by the National Centre for Research and



zowały się stosunkowo największymi odkształceniami rozciągającymi w spodzie warstw asfaltowych, które zostały „zrekompensowane” przez bardzo dobre właściwości zmęczeniowe tego asfaltu, a w efekcie mieszanki mineralno-asfaltowej. Na tej podstawie można stwierdzić, że sztywność mieszanki i wykonanej z niej warstwy nie jest właściwością przesadzającą o trwałości konstrukcji, ponieważ bardzo istotną rolę odgrywa charakterystyka zmęczeniowa mma.

## INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał w ramach projektu pt. „Asfalty drogowe i modyfikowane w polskich warunkach klimatycznych” współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach programu Rozwój Innowacji Drogowych.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Bańkowski W., Gajewski M., Sybilski D.*: Analysis of Fatigue Damage on Test Sections Submitted to HVS Loading. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **8**, 4, 2013, 255-262, DOI: 10.3846/bjrbe.2013.33
- [2] *Sybilski D., Bańkowski W.*: Asphalt pavement design using results of laboratory fatigue tests of asphalt mixtures. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, **3**, 2, 2002, 183-194
- [3] *Brennan M.J., Clancy F.*: A new initiative in measuring the fatigue performance of bituminous materials. *Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Nottingham, 1992, 32-47
- [4] *Baaj H., Di Benedetto H., Chaverot P.*: Fatigue of mixes: an intrinsic damage approach. 6<sup>th</sup> RILEM Symposium PTEBM, Zurich, 2003, 394-400
- [5] *Błażejowski K., Olszacki J., Peciakowski H.*: *Asfalty wysokomodyfikowane*. Orlen Asphalt, 2015
- [6] *Timm D.H., Robbins M.M., Willis J.R., Tran N., Taylor A.J.*: Field and laboratory study of high-polymer mixtures at the NCAT test track: Final Report NCAT Report 13-03, Auburn, Alabama, 2013
- [7] *Willis J.R., Taylor A., Tran N.H., Kluttz B., Timm D.H.*: Laboratory evaluation of high polymer plant-produced mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, **13**, S1, 2012, 260-280, DOI: 10.1080/14680629.2012.657077
- [8] *Kluttz R.Q., Molenaar A.A.A., van de Ver M.F.C., Poot M.R., Liu X., Scarpas A., Scholten E.J.*: Modified base courses for reduced pavement thickness and increased longevity. *Proceedings of the International Conference on Perpetual Pavement*, 2009, Columbus, Ohio, 1-16
- [9] *Bańkowski W., Horodecka R., Gajewski M., Mirski K.*: The extended assessment of warm mix asphalts durability. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 2, 2016, 157-173, DOI: 10.7409/rabdim.016.010
- [10] *Król J.B., Niczke Ł., Kowalski K.J.*: Towards understanding polymerization process in bitumen bio-fluxes. *Materials*, **10**, 9, 2017, DOI: 10.3390/ma10091058
- [11] *Pszczola M., Ryś D., Jaskuła P.*: Analysis of climatic zones in Poland with regard to asphalt performance grading. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **16**, 4, 2017, 245-264, DOI: 10.7409/rabdim.017.016
- [12] *Judycki J., Jaskuła P., Dołżycki P., Pszczola M., Jaczewski M., Ryś D., Stienss M.*: The Impact of Homogeneity of High Modulus Asphalt Concrete Layer on Low-Temperature Cracking. *The 8<sup>th</sup> RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and De-bonding in Pavements*, Springer Netherlands, vol. 13, part V, 2016, 319-326, DOI: 10.1007/978-94-024-0867-6\_45
- [13] *Błażejowski K., Dołżycki B.*: The relationships between asphalt mix rutting resistance and MSCR test results, in: *Design, analysis and asphalt material characterization for road and airfield pavements. Proceedings of International Conference on Sustainable Civil Infrastructure “Geo-Hubei 2014”*, 20-22 July 2014, Yichang, Hubei, China, 202-209, DOI: 10.1061/9780784478462
- [14] *Pronk A.C., Bańkowski W., Gajewski M.*: Processing of four point bending test results for visco-elasticity and fatigue models. *International Journal of Pavement Engineering*, published online 2017, DOI: 10.1080/10298436.2017.1398549

Development and the General Directorate for National Roads and Motorways as a part of the programme Development of Road Innovations.

- [15] *Buczyński P., Iwański M.*: Fatigue life comparison of cold recycled bases with foamed bitumen and with bitumen emulsion. The 12<sup>th</sup> International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, 26-27 May 2016, Vilnius, Lithuania. *Procedia Engineering*, vol. 172, 2017, 135-142
- [16] *Gauthier G., Le Hir Y., Planche J.P.*: Fatigue of bituminous binders and mixes: analysis and correlations using a new intrinsic approach. *Proceedings of The 3<sup>rd</sup> Euroasphalt and Eurobitume Congress*, Vienna, Vol. 2, 2004, 1842-1853
- [17] *Pronk A.C., Hopman P.C.*: Energy dissipation: the leading factor of fatigue. *Proceedings of Conference of The United States Strategic Highway Research Program: Sharing the Benefits*, Ice Publishing, London, 1990, 255-267
- [18] *Pronk A.C.*: Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point bending tests based on a “new” fatigue life definition using the “Dissipated energy Concept”, Phase II: DAB 0/8; Controlled Displacement Mode. Report W-DWW-98-001, Delft, 1998
- [19] *Sybilski D., Bańkowski W.*: Comparison of the conventional and energetic fatigue failure criterion for bituminous mixes. *Proceedings of The International ISAP Symposium “Asphalt Pavements and Environment”*, 18-20 August 2008, Zurich, Switzerland, 110-120
- [20] *Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*. GDDKiA, Politechnika Gdańska, 2014
- [21] *Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Ryś D., Jaczewski M., Alenowicz J., Dołżycki B., Stienss M.*: The new Polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavements. *Proceedings of The 11<sup>th</sup> International Road Safety Seminar GAMBIT 2016*, Gdańsk, Poland, MATEC Web of Conferences, Vol. 122, 2017, 1-8 DOI: 10.1051/mateconf/201712204002
- [22] *Judycki J., i inni.*: Analiza i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. WKŁ, 2014
- [23] *WT-2 2014 Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, część I - Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania techniczne*. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [24] *Hopman P.C., Kunst P.A.J.C., Pronk A.C.*: A renewed interpretation method for fatigue measurements - verification of Miner’s rule. *Proceedings of The 4<sup>th</sup> Eurobitume Symposium*, Madrid, 1989, 557-561
- [25] *Rowe G.M., Bouldin M.G.*: Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphalt mixtures. *Proceedings of The 2<sup>nd</sup> Euroasphalt and Eurobitume Congress*, Barcelona, 2000, 754-763