

MAGDALENA WESOŁOWSKA¹⁾DAWID RYŚ²⁾

ANALYSIS OF THE FATIGUE LIFE OF NEAT AND MODIFIED BITUMENS USING LINEAR AMPLITUDE SWEEP TEST

ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ASFALTÓW DROGOWYCH I MODYFIKOWANYCH Z WYKORZYSTANIEM TESTU LINIOWEGO ZWIĘKSZANIA AMPLITUDY

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono ocenę odporności na zmęczenie wybranych polskich lepiszczy asfaltowych: asfaltu drogowego 50/70, asfaltu modyfikowanego PMB 45/80-55 i asfaltu wysokomodyfikowanego 45/80-80. Do oceny trwałości zmęczeniowej asfaltów zastosowano test liniowego zwiększania amplitudy LAS (ang. *Linear Amplitude Sweep Test*), który jest nowym badaniem funkcjonalnym opracowanym w USA. Asfalt wysokomodyfikowany 45/80-80 wykazał do kilkunastu razy większą trwałość zmęczeniową niż inne materiały: asfalt drogowy 50/70 oraz asfalt modyfikowany PMB 45/80-55. Różnice w trwałości zmęczeniowej między asfaltem drogowym 50/70 i modyfikowanym PMB 45/80-55 były dużo mniejsze, co powoduje, że asfalty te wykazują zbliżoną odporność na zmęczenie. W pracy analizowano także wpływ różnych wartości temperatury badania asfaltu na trwałość zmęczeniową i sposób zniszczenia lepiszcza. Wykazano, że dokładniejszą ocenę jakości asfaltu można uzyskać na podstawie analizy wyników badania trwałości uwzględniającego kilka różnych wartości temperatury niż na podstawie badania lepiszcza przeprowadzonego w jednej temperaturze ekwiwalentnej.

SŁOWA KLUCZOWE: asfalt drogowy, asfalt modyfikowany, asfalt wysokomodyfikowany, lepiszcza asfaltowe, lepkość sprężysty ciągli mechanizm zniszczenia, reometr dynamicznego ścinania, test liniowego zwiększania amplitudy, test zmęczeniowy.

ABSTRACT. The paper presents an evaluation of the fatigue resistance of selected Polish bituminous binders: neat bitumen 50/70, polymer modified bitumen PMB 45/80-55 and polymer highly modified bitumen PMB 45/80-80. The linear amplitude sweep (LAS) test, which is a new bitumen performance grading test developed in the USA, and was used to assess the fatigue life of the bitumens. Highly modified bitumen 45/80-80 showed 10-20 times higher fatigue durability than neat bitumen 50/70 and modified bitumen PMB 45/80-55. The differences in fatigue durability between neat bitumen 50/70 and modified bitumen PMB 45/80-55 were much smaller, which means that the bitumens are characterized by similar fatigue reliability. Also the effect of different test temperatures on the fatigue life and mode of failure of the bitumen binders were examined. It has been shown that the quality of a bitumen can be more accurately assessed on the basis of results of the durability test carried out for several different temperatures than for one equivalent temperature.

KEYWORDS: asphalt binders, dynamic shear rheometer, fatigue test, highly modified bitumen, linear amplitude sweep test, modified bitumen, neat bitumen, viscoelastic continuum damage mechanics.

DOI: 10.7409/rabd.018.020

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; magwesol@pg.edu.pl

²⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; dawrys@pg.edu.pl (✉)

1. WSTĘP

Lepiszczta asfaltowe klasyfikowane są w Unii Europejskiej na podstawie wyników oznaczenia penetracji i temperatury mięknięcia [1, 2]. W USA i m.in. w Kanadzie wykonywane są badania funkcjonalne asfaltów, które służą do rozszerzonej oceny ich właściwości reologicznych w warunkach zróżnicowanych wartości temperatury stanowiąc podstawę do klasyfikacji asfaltów zgodnie ze stosowaną normą AASHTO M 320-17 [3]. System klasyfikacji asfaltów na podstawie badań funkcjonalnych (rodzajów funkcjonalnych) PG (ang. *Performance Grades*) został opracowany w latach 90. XX wieku jako wynik programu badawczego SHRP (ang. *Strategic Highway Research Program*), którego podsumowanie zostało opisane w raporcie SHRP A-410 [4]. Klasyfikacja funkcjonalna asfaltów PG jest elementem metody projektowania mieszank mineralno-asfaltowych Superpave (ang. *Superior Performing Asphalt Pavements*). Metody badań laboratoryjnych lepiszczki wynikają z konieczności określenia właściwości użytkowych asfaltów w zależności od temperatury pracy nawierzchni. Opracowanie specyfikacji asfaltowych polega na wyznaczeniu zakresu wartości temperatury, przy których w danej strefie klimatycznej pracuje asfalt oraz w których asfalt ten musi spełnić określone wymagania funkcjonalne. Strefy klimatyczne do klasyfikacji funkcjonalnej asfaltów PG w Polsce zostały po raz pierwszy podane w 2000 r. przez Sybilskiego i Mirskiego [5], a w roku 2017 zostały opracowane przez Pszczołę, Rysia i Jaskułę [6] przy wykorzystaniu pełnych danych klimatycznych. Ocena właściwości funkcjonalnych asfaltów PG produkowanych w polskich rafineriach była przedmiotem m.in. następujących publikacji i raportów [7-10].

Oznaczenie klasy funkcjonalnej asfaltu PG XX-YY zawiera informację o dwóch skrajnych wartościach temperatury nawierzchni: temperaturze maksymalnej XX oraz temperaturze minimalnej YY, do których dostosowane jest dane lepiszczko asfaltowe. Szczegóły, co do wymagań funkcjonalnych asfaltów wg klasyfikacji PG zestawione są w normie [3]. Z temperatury minimalnej oraz maksymalnej nawierzchni wynika trzecia wartość temperatury pośredniej, która nie jest ujęta w oznaczeniu PG XX-YY, a która decyduje o klasie funkcjonalnej asfaltu. Podstawą oceny asfaltów w temperaturze pośredniej jest zapewnienie odporności asfaltu oraz mieszanki mineralno-asfaltowej na zmęczenie. W Polsce dotychczas prowadzono wiele prac badawczych dotyczących oceny trwałości mieszank mineralno-asfaltowych na zmęczenie [11-14]. Jednak poza pracą Sybilskiego i współautorów z 2009 r. [15] nadal w kraju brakuje badań dotyczących odporności na zmęczenie samych lepiszczki asfaltowych.

1. INTRODUCTION

Bituminous binders in the EU are graded on the basis of penetration and softening point values [1, 2]. In the USA, and i.a. in Canada, performance tests of bitumens are carried out to evaluate more fully their rheological properties in varying temperature conditions. The test results are the basis for grading the bitumens in accordance with the standard AASHTO M 320-17 [3]. The grading system based on the performance grades (PG) was created in the 1990s as a result of the Strategic Highway Research Program (SHRP), summarized in report SHRP A-410 [4]. The performance grading of bitumens is a part of the method of designing asphalt mixtures for Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave). The laboratory methods of testing bituminous binders were developed to determine their performance depending on the pavement working temperature. Bitumen specifications are drawn up on the basis of the range of temperatures at which the bitumen is to work in a given climate zone, meeting the specific performance requirements. In Poland the climate zones for the performance grading of bitumens were for the first time defined by Sybilski and Mirski [5] in 2000. They were refined on the basis of full climatic data by Pszczoła, Ryś and Jaskuła [6] in 2017. The performance grading of the bitumens produced in the Polish refineries has been the subject of publications and reports [7-10].

Bitumen performance grading code PG XX-YY contains information about two extreme pavement temperatures: maximum temperature XX and minimum temperature YY, for which the given asphalt binder is suitable. Details on the PG requirements for bitumens are provided in standard [3]. An intermediate temperature derives from the minimum and maximum temperatures. Although it is not included in code PG XX-YY, it determines the asphalt performance grade. The basis for the intermediate temperature grading of bitumens is their fatigue resistance and that of the asphalt mixture. In Poland numerous studies on the fatigue resistance of asphalt mixtures have been carried out [11-14]. However, apart from work [15] by Sybilski et al. dating back to 2009, there is a shortage of research on the fatigue resistance of bituminous binders themselves.

Currently, asphalt fatigue resistance evaluation according to the Superpave system consists in evaluating the product of the dynamic shear modulus of the asphalt and phase angle sine $|G^*| \sin \delta$, obtained from the dynamic shear rheometer (DSR). However, many experts think that such evaluations of bituminous binder fatigue resistance

Obecnie według systemu Superpave ocena odporności asfaltu na zmęczenie polega na ocenie iloczynu dynamicznego modułu ścinania asfaltu i sinusa kąta przesunięcia fazowego $|G^*| \sin \delta$ uzyskanych podczas badania w reometrze dynamicznego skręcania DSR. Niemniej jednak w opinii wielu ekspertów taka ocena odporności lepszycza na zmęczenie w niewystarczającym stopniu koreluje z trwałością zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych [16]. Dlatego w ostatnich latach w USA trwają prace nad zastąpieniem jej przez nowe badanie zmęczeniowe asfaltów LAS (test liniowego zwiększania amplitudy). Celem pracy jest przedstawienie wyników badań wybranych polskich lepszyczy według tej procedury funkcjonalnej oraz ich analiza. W artykule rozpatrzono także wpływ temperatury, w której przeprowadzono badania oraz oddziaływanie modyfikacji asfaltów na ich trwałość zmęczeniową.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH LEPSZYCZY ASFALTOWYCH

Pierwsze wzmianki o badaniach zmęczeniowych lepszyczy asfaltowych prowadzonych przez Pella sięgają lat 50. XX wieku [17]. Badanie przeprowadzono w specjalnie zaprojektowanym aparacie, w którym próbka lepszycza była skręcana. Dopiero w latach 90. XX wieku pojawiły się inne próby wyznaczania odporności asfaltów na zmęczenie. Następne badania różniły się między sobą sposobem przyłożenia obciążenia: zginanie próbki w aparacie Fraassa [18] oraz analogicznie w przypadku schematu belki zginanej obciążonej w 4 punktach [19], następnie poddanej ścinaniu, ścinaniu pierścieniowemu oraz ściskaniu i rozciąganiu [20]. Pod kierunkiem prof. Sybilskiego w IBDIM został stworzony przez Grupę Celową Lepszycza TG1, projekt RRBFT, w którego zakres wchodziły m.in. międzylaboratoryjne badania zmęczeniowe lepszyczy asfaltowych w aparacie DSR oraz porównanie wyników uzyskanych wybranymi metodami badawczymi [20].

Według klasyfikacji asfaltów PG ocenę funkcjonalną lepszyczy asfaltowych ze względu na zmęczenie przeprowadza się poprzez badania w reometrze dynamicznego ścinania DSR. Polegają one na cyklicznym skręcaniu próbki asfaltowej umieszczonej między dwiema równoległymi płytkami. Podczas kolejnych cykli skręcania wewnątrz próbki działa energia zużywana do obciążenia oraz energia odzyskana podczas odciążenia. Różnica między ich wartościami nazywana jest energią rozproszoną, którą można opisać za pomocą następującego wzoru [19], [21-23]:

$$W_i = \pi |G^*| \sin \delta \gamma_0^2, \quad (1)$$

gdzie:

insufficiently correlate with the fatigue life of the bituminous mixtures [16]. This is why in recent years research aimed at replacing the Superpave evaluation method with a new asphalt fatigue test called a linear amplitude sweep (LAS) test has been conducted in the USA. The paper presents the results of LAS test carried out on selected Polish bituminous binders, and their analysis. Also the effect of test temperature and bitumen modification on the fatigue durability of the tested bitumens is examined.

2. THEORETICAL BASIS FOR FATIGUE TESTS OF ASPHALT BINDERS

The first mentions of fatigue tests conducted on asphalt binders by Pell date back to the 1950s [17]. The test would be conducted in a specially designed device in which the sample would be subjected to torsion. It was only as late as the 1990s that other ways of determining the fatigue resistance of asphalts began to be tried. The tests differed in their way of applying load, which included: bending the sample in the Fraass apparatus [18], 4-point bending the sample [19] and subjecting the sample to shearing, annular shearing, compression and tension [20]. The project RRBFT under Prof. Sybilski's direction was conceived by Binder Target Group TG 1 in the Road and Bridge Research Institute. The project covered, among other things, inter-laboratory fatigue tests of asphalt binders in the dynamic shear rheometer (DSR) and a comparison of the test results obtained using selected testing methods [20].

According to the asphalt performance grading (PG) system, the performance of bituminous binders is evaluated using the DSR. The test consists in the cyclic torsion of a bitumen sample placed between two parallel plates. The energy spent on loading and the energy recovered during unloading act in the successive cycles of torsion. The difference between the values of respective energies is called the dissipated energy and it can be expressed by the following formula [19], [21-23]:

$$W_i = \pi |G^*| \sin \delta \gamma_0^2, \quad (1)$$

where:

W_i – the energy dissipated in cycle i [J/m^3],

$|G^*|$ – the dynamic shear modulus [MPa],

δ – the phase angle between the shear stress and the strain [$^\circ$],

γ_0 – the maximum shear strain [%].

The theoretical concept on which the PG specification is based assumes that the lower the value of dissipated

- W_i – energia rozproszona w danym cyklu i [J/m^3],
 $|G^*|$ – dynamiczny moduł ścinania [MPa],
 δ – kąt przesunięcia fazowego między naprężeniem ścinającym a odkształceniem [$^\circ$],
 γ_0 – maksymalne odkształcenie ścinające [%].

Koncepcja teoretyczna zastosowana w klasyfikacji PG zakłada, że im mniejsza jest wartość energii rozproszonej W_i , tym większa jest minimalizacja zmęczenia lepiszcza, czyli tym później następuje nieodwracalne uszkodzenie lepiszcza [23]. Wynika stąd, że iloczyn $|G^*| \sin \delta$ musi również dążyć do minimum. W normie AASHTO R 29-08 [24] podano ograniczenie tego iloczynu w postaci nierówności $|G^*| \sin \delta < 5000$ kPa mającej zastosowanie w przypadku lepiszcza poddanego starzeniu krótko- i długoterminowemu metodami RTFOT + PAV. Wyznaczenie górnej granicy iloczynu na poziomie 5000 kPa wynika z faktu, że lepiszcze w pośrednich wartościach temperatury nie może być zbyt sztywne.

Metoda oceny trwałości lepiszcza na podstawie iloczynu $|G^*| \sin \delta$ wzbudza jednak od pewnego czasu w środowisku ekspertów dyskusję, co do zasadności jej stosowania, szczególnie w przypadku asfaltów modyfikowanych. Weryfikacja metody oceny trwałości lepiszcza była podstawą badań przeprowadzonych na Uniwersytecie w Wisconsin przez zespół Prof. Bahii [25]. Wynikiem tej weryfikacji jest opracowana nowa metoda oceny trwałości lepiszcza LAS, do której opracowano normę AASHTO TP 101-14. Badanie polega na cyklicznym skręcaniu próbki lepiszcza ze stałą częstotliwością 10 Hz i stopniowym wzrostem amplitudy odkształceń w zakresie od 0,1% do 30,0%. Zaletą metody jest krótki czas badania, które trwa około 30 minut łącznie z kondycjonowaniem próbki w reometrze [26].

Test LAS jest oparty na teorii lepkosprężystej mechaniki zniszczenia VECD (ang. *Viscoelastic Continuum Damage Mechanics*), którą opisano w pracy Schapery'ego [27] na temat nieliniowego powstawania uszkodzeń w ośrodkach lepkosprężystych. Zastosowanie modelu VECD umożliwia przewidywanie trwałości zmęczeniowej przy dowolnym poziomie odkształceń. Teoria VECD opiera się na analizie odstępstw od zachowań lepkosprężystych i redukcji sztywności podczas przyrostu uszkodzeń. Schapery w pracy [27] wskazuje na zależność między propagacją spękań (poziomem zmęczenia D) a pracą (energiami rozproszoną W) potrzebną do ich powstania:

$$\frac{dD}{dt} = \left(-\frac{\partial W}{\partial D} \right)^\alpha \quad (2)$$

energy W_i , the greater the minimization of bituminous binder fatigue and so the later the irreversible damage to the binder will occur [23]. Hence product $|G^*| \sin \delta$ must also approach a minimum. Standard AASHTO R 29-08 [24] specifies a bound for this product, in the form of inequality $|G^*| \sin \delta < 5000$ kPa applicable to a bituminous binder subjected to short-term and long-term ageing using the RTFOT + PAV methods. The upper bound was set at 5000 kPa due to the fact that at intermediate temperatures the bituminous binder cannot be too stiff.

However, for some time now the method of assessing binder fatigue life on the basis of product $|G^*| \sin \delta$ has been generating discussion about its validity, especially when applied to modified bitumens. The method was subjected to verification by Prof. Bahia's team at the University of Wisconsin [25]. The research resulted in a new method of evaluating asphalt binder durability, called the linear amplitude sweep (LAS) test, for which Standard AASHTO TP 101-14 was created. The test consists in cyclic torsioning an asphalt binder sample at a constant frequency of 10 Hz while gradually increasing (sweeping) the strain amplitude from 0.1% to 30.0%. The advantage of this method is the short test time amounting to about 30 minutes, which includes conditioning the sample in the rheometer [26].

The LAS test is based on the theory of viscoelastic continuum damage (VECD) mechanics, described in the Schapery's work [27] devoted to the nonlinear way in which damage arises in viscoelastic media. Using the VECD model one can predict fatigue life for any strain level. The VECD theory is based on the analysis of deviations from the viscoelastic behaviour and the reduction in stiffness with advancing failure. Schapery in [27] indicates a dependence between the propagation of cracks (the damage intensity D) and the work (the dissipated energy W) needed for the cracks to arise:

$$\frac{dD}{dt} = \left(-\frac{\partial W}{\partial D} \right)^\alpha \quad (2)$$

In works [21-22], [24], [28] the following dependence describing damage accumulation D at given test instant was derived:

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (3)$$

where:

$D(t)$ – the damage accumulation at given test instant t [-],

N – the load cycle at instant t , for which damage accumulation D is calculated [-],

W pracach [21-22], [24], [28] wyprowadzono zależność opisującą poziom zmęczenia D w danej chwili badania t :

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (3)$$

gdzie:

$D(t)$ – poziom zmęczenia w danym momencie badania t [-],

N – cykl obciążeniowy w chwili t , dla którego obliczany jest poziom zmęczenia D [-],

i – dany cykl obciążeniowy [-],

γ_0 – zadane odkształcenie w danym kroku obciążeniowym [%],

C – współczynnik integralności materiału obliczany według wzoru (5) [-],

α – parametr obliczany według wzoru (7) [-],

t – czas liczony od początku badania [s].

Współczynnik C określający integralność materiału (ang. *material integrity*), opisuje zmiany zespolonego modułu ścinania G^* podczas obciążania [23]. Na początku badania zmęczeniowego współczynnik integralności materiałowej C wynosi 1 i podczas kolejnych cykli skręcających jego wartość maleje do zera (Rys. 1a):

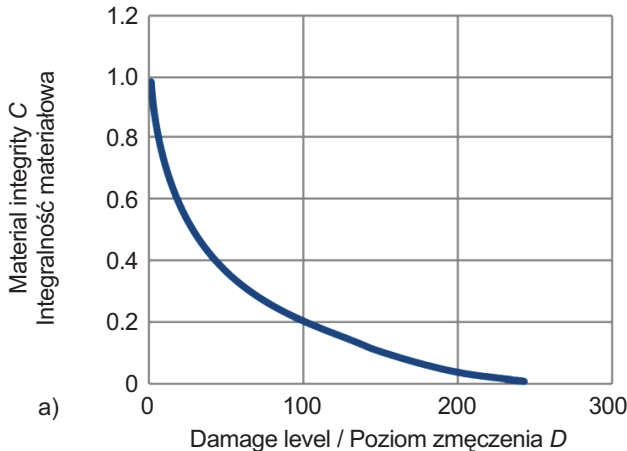
$$C = \frac{|G_i^*|}{I_D}, \quad (4)$$

gdzie:

C – współczynnik integralności materiału [-],

$|G_i^*|$ – dynamiczny moduł ścinania w momencie uzyskania maksymalnych naprężeń w próbce w danym cyklu obciążenia i [MPa],

I_D – początkowa wartość dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$ w przypadku przyłożonego odkształcenia 0,1% [MPa].



i – a given load cycle [-],

γ_0 – the strain set for the given load cycle [%],

C – a material integrity coefficient calculated from formula (5) [-],

α – a parameter calculated from formula (7) [-],

t – the time which passed from the test start [s].

Coefficient C , defined as material integrity, describes changes in complex shear modulus G^* during loading [23]. At the beginning of the fatigue test, material integrity C amounts to 1 and in the course of the next cycles its value decreases to zero (Fig. 1a):

$$C = \frac{|G_i^*|}{I_D}, \quad (4)$$

where:

C – the material integrity coefficient [-],

$|G_i^*|$ – the dynamic shear modulus at the instant when the maximum stress is reached in the sample in given load cycle i [MPa],

I_D – the initial value of dynamic shear modulus $|G^*|$ when the applied load amounts to 0.1% [MPa].

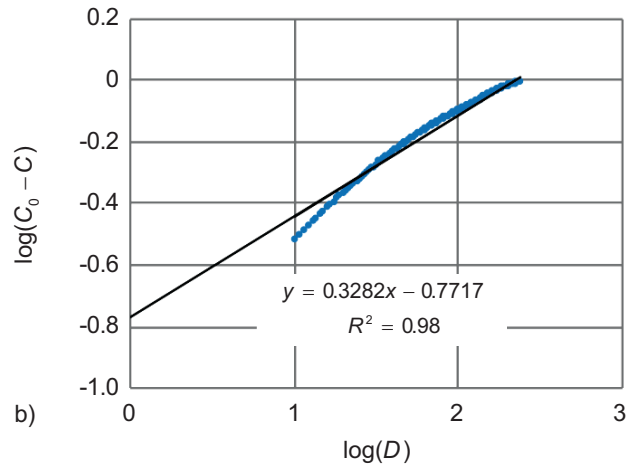


Fig. 1. a) Example plot showing dependence of material integrity C on damage level D for 50/70 penetration grade bitumen at the test temperature of 15°C, b) Example log plot for log dependence ($C_0 - C$) to $\log(D)$ for penetration grade bitumen 50/70 at the test temperature of 15°C

Rys. 1. a) Przykładowy wykres przedstawiający zależność integralności materiałowej C od poziomem zmęczenia D wykonany dla asfaltu drogowego 50/70 poddanego badaniu w temperaturze 15°C, b) Przykładowy wykres logarytmiczny zależności $\log(C_0 - C)$ do $\log(D)$ wykonany dla asfaltu drogowego 50/70 poddanego badaniu w temperaturze badania 15°C

Współczynnik integralności materiału C można równoważnie wyprowadzić na podstawie prawa energetycznego:

$$C = C_0 - C_1(D)^{C_2}, \quad (5)$$

$$\log(C_0 - C) = \log(C) + C_2 \log(D), \quad (6)$$

gdzie:

- C – współczynnik integralności materiału [-],
 $C_0 = 1$ – średnia wartość integralności materiału przy odkształceniu próbki 0,1% [-],
 C_1, C_2 – współczynniki obliczeniowe modelu dopasowanego do wyników badania [-].

Współczynnik C_1 jest wartością równą $(C_0 - C)$ w punkcie przecięcia funkcji regresji liniowej utworzonej do punktów $\log(C_0 - C)$ w stosunku do $\log(D)$ z osią odciętych (Rys. 1b), natomiast współczynnik C_2 oblicza się jako nachylenie tej funkcji regresji do osi $\log(D)$. W przykładzie podanym na Rys. 1b wartości współczynników dopasowania są następujące: $C_1 = 10^{-0,7717} = 0,169$ oraz $C_2 = 0,328$.

Wartość parametru obliczeniowego α wynosi:

$$\alpha = \frac{1}{m}, \quad (7)$$

gdzie:

- α – parametr obliczany według wzoru (7) [-],
 m – nachylenie wykresu częstotliwość-moduł ścinania [-].

Jako kryterium zmęczeniowe ustalono odkształcenia, przy których uzyskano maksymalne naprężenia w próbce $\gamma(\tau_{\max})$. Wartość poziomu zmęczenia $D(t)$ w próbce w chwili zniszczenia jest oznaczona jako D_f i opisana wzorem (8). Poziom zmęczenia jest wielkością liczbową większą od 1 i zależy od rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz temperatury badania. Im większa jest trwałość asfaltu, tym większy jest poziom zmęczenia :

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}}, \quad (8)$$

gdzie:

- D_f – poziom zmęczenia w chwili zniszczenia próbki [-],
 C, C_0, C_1, C_2 – jak w równaniach (5) i (6) [-].

Rozwiązaniem układu równań (1), (2) i (3) jest zależność wyrażająca trwałość zmęczeniową:

$$N_f = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha} (\gamma_{\max})^{-2\alpha}, \quad (9)$$

Material integrity coefficient C can be equivalently derived from the power law:

$$C = C_0 - C_1(D)^{C_2}, \quad (5)$$

$$\log(C_0 - C) = \log(C) + C_2 \log(D), \quad (6)$$

where

- C – the material integrity coefficient [-],
 $C_0 = 1$ – the mean material integrity value at the sample strain of 0.1% [-],
 C_1, C_2 – the computational coefficients of the model fitted to the test results [-].

Coefficient C_1 is equal to $(C_0 - C)$ in the point of intersection of a linear regression function created for points $\log(C_0 - C)$ relative to $\log(D)$, with the x -axis (Fig. 1b), while coefficient C_2 is calculated as the slope of this regression function towards axis $\log(D)$. In the example shown in Fig. 1b the goodness-of-fit indices are as follows: $C_1 = 10^{-0,7717} = 0.169$ and $C_2 = 0.328$.

The computational parameter α amounts to:

$$\alpha = \frac{1}{m}, \quad (7)$$

where:

- α – the parameter calculated from formula (7) [-],
 m – the slope of the frequency-shear modulus graph [-].

The strain at which maximum stress $\gamma(\tau_{\max})$ in the sample is reached was adopted as the fatigue criterion. Damage accumulation $D(t)$ in the sample at the instant of failure is denoted as D_f and described by formula (8). The damage parameter is a numerical value higher than 1 and depends on the type of bituminous binder and the test temperature. The higher the resistance of the bitumen, the higher damage parameter D_f :

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}}, \quad (8)$$

where:

- D_f – the damage accumulation at the instant of sample failure [-],

C, C_0, C_1, C_2 – as in equations (5) and (6) [-].

The solution of the system of equations (1), (2) and (3) is the following relation for fatigue life:

gdzie:

N_f – trwałość zmęczeniowa lepiszcza asfaltowego [-],
 f – częstotliwość [Hz],
 D_f – poziom zmęczenia w chwili zniszczenia próbki [-],
 k – współczynnik obliczeniowy, jak w równaniu (12) [-],
 C_1, C_2, α – jak w równaniach (5), (6) i (7) [-],
 γ_{\max} – maksymalne zadane odkształcenie w lepiszczu [%].
Równanie (9) można zapisać w uproszczonej postaci:

$$N_f = A(\gamma_{\max})^B, \quad (9)$$

A – obliczane wg równania (11) [-],
 γ_{\max} – maksymalne zadane odkształcenie w lepiszczu [%],
 B – obliczane wg równania (13) [-],
przy czym:

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha}, \quad (10)$$

$$k = 1 + (1 - C_2)\alpha, \quad (11)$$

$$B = -2\alpha, \quad (12)$$

gdzie oznaczenia poszczególnych parametrów jak wyżej.

3. PROCEDURA PRZEPROWADZANIA TESTU LINIOWEGO ZWIĘKSZANIA AMPLITUDY (LAS)

Procedura testu jest podzielona na dwa etapy: zwiększanie częstotliwości oraz zwiększanie amplitudy. Celem przeprowadzenia etapu testu nazwanego „zwiększanie częstotliwości” jest wyznaczenie parametru α (7), który jest niezbędny do dalszej analizy obliczeniowej. W próbce lepiszcza wywoływane jest stałe odkształcenie ścinające wynoszące 0,1%, natomiast częstotliwość skręcania stopniowo wzrasta w następującej kolejności: od 0,2 Hz do 1,0 Hz co 0,2 Hz, a następnie od 2,0 Hz do 10,0 Hz co 2 Hz oraz 20,0 Hz i 30,0 Hz. W każdym kroku testu jest rejestrowany zespolony moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego.

Drugi etap testu zwany „zwiększaniem amplitudy” pozwala natomiast określić poziom zmęczenia D_f wywoływany cyklicznym obciążaniem próbki. Próbkę lepiszcza jest skręcaną ze stałą częstotliwością 10 Hz. Etap obciążania składa się z dziesięcioszekundowych odstępów, każdy o zadanym odkształceniu, co daje 10 cykli obciążających przypadających

where:

N_f – the fatigue life of the bituminous binder [-],
 f – the frequency [Hz],
 D_f – the damage accumulation at the instant of sample failure [-],
 k – a computational coefficient, as in equation (12) [-],
 C_1, C_2, α – as in equations (5), (6) and (7) [-],
 γ_{\max} – the maximum strain set for the bituminous binder [%].

The equation (9) can be simplified to this form:

A – is calculated from equation (11) [-],

γ_{\max} – the maximum strain set for the bituminous binder [%],

B – is calculated from equation (13) [-],

assuming:

where the symbols representing the particular parameters are the same as above.

3. THE PROCEDURE OF CARRYING OUT LINEAR AMPLITUDE SWEEP TEST (LAS)

The LAS test procedure consists of two stages: a frequency sweep and an amplitude sweep. The aim of the frequency sweep stage is to determine parameter α (7), which is needed for further computational analysis. A constant shear strain amounting to 0.1% is generated in the sample, while the torsion frequency gradually increases in the following sequence: from 0.2 Hz to 1.0 Hz at every 0.2 Hz, from 2.0 Hz up to 10.0 Hz at every 2 Hz and then to 20.0 Hz and 30.0 Hz. The complex shear modulus and the phase angle are registered in each test step.

In the second stage (the amplitude sweep) of the test, damage parameter D_f induced by the cyclic loading of the sample is determined. The asphalt binder sample is twisted at a constant frequency of 10 Hz. The loading process consists of ten-second intervals, each with the set strain, which is tantamount to 10 load cycles per strain

na jeden poziom odkształceń, przy czym każdy kolejny powoduje większe odkształcenie skręcającej próbki. Następnie zadane odkształcenia ścinające mają wartości: 0,1%, od 1% do 30% zwiększane stopniowo o 1%. W sumie próbka poddana jest 310 cyklom obciążeniowym. W każdym cyklu obciążenia próbki, oprócz dynamicznego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego, rejestrowane są naprężenia i odkształcenia ścinające. Dotychczas nie przedstawiono w literaturze zaleceń, co do temperatury przeprowadzania badania.

4. LEPI SZCZA ASFALTOWE UŻYTE DO BADAŃ

W badaniach rozpatrywano trzy rodzaje asfaltu o zbliżonym zakresie penetracji, lecz innym stopniu modyfikacji: asfalt drogowy 50/70, asfalt modyfikowany PMB 45/80-55 o przybliżonej zawartości modyfikatora SBS około 3% (wg wskazań producenta), oraz asfalt wysokomodyfikowany PMB 45/80-80 o zawartości modyfikatora SBS 7% (wg wskazań producenta). Podstawowe właściwości asfaltów opisane zgodnie z europejską normą PN-EN [1-2] oraz właściwości funkcjonalne przedstawione według normy AASHTO M 320-17 zestawiono w Tabl. 1.

Na podstawie Tabl. 1 można stwierdzić, że wszystkie asfalty mają tę samą klasę odporności PG-22 na działanie temperatury o niskich wartościach – bez względu na modyfikację asfaltu. Modyfikacja asfaltu wpływa jednak w rozpatrywanych przypadkach na poprawę odporności na powstawanie deformacji trwałych. Wraz ze wzrostem modyfikacji asfaltu rośnie górna granica klasy asfaltu PG, maksymalnie do wartości PG 82 w przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80. W rzeczywistości maksymalna górna temperatura PG warstwy ścieralnej jaka występuje w Polsce wynosi 58°C [6]. Dlatego w Tabl. 1 zestawiono wyniki testu pełzania i nawrotu MSCR, który jest częścią uaktualnionej w 2012 r. klasyfikacji funkcjonalnej asfaltu. Asfalty modyfikowane w temp. 58°C mają najwyższą klasę odporności na deformacje wywołane ruchem ciężkim klasy E. Na podstawie podatności pełzania $J_{nr,diff}$ można stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości modyfikatora w lepiszczu zwiększa się odporność asfaltu na deformacje trwałe. W Tabl. 1 podano również temperaturę pośrednią, przy której spełniony został warunek $|G^*| \sin \delta < 5000$ kPa oraz zamieszczono wartość iloczynu $|G^*| \sin \delta$ uwzględniającego tę temperaturę. Niższa temperatura pośrednia pracy asfaltu według pracy [4] oznacza korzystniejsze właściwości lepiszcza ze względu na jego trwałość zmęczeniową wynikającą z mniejszego usztywniania się.

level, each successive cycle causing a larger deformation of the sample. The set successive shear strains are as follows: 0.1% and from 1.0% to 30%, gradually increased by 1%. In total, the sample is subjected to 310 load cycles. Besides the dynamic shear modulus and the phase angle, the shear stress and the shear strain are registered in each load cycle. So far no recommendations as to the temperature at which the test should be conducted have been presented in the literature on the subject.

4. BITUMINOUS BINDERS APPLIED IN TESTS

Three types of bitumens with a similar penetration range, but modified to a different degree, i.e. neat bitumen 50/70, modified bitumen PMB 45/80-80 with an approximate SBS modifier content of 3% (as specified by the manufacturer) and highly modified bitumen PMB 45/80-80 with an SBS modifier content of 7% (as specified by the manufacturer), were investigated. The basic properties of the bitumens, described in accordance with European standard PN-EN [1, 2], and their functional properties according to standard AASHTO M 320-17 are presented in Table 1.

It emerges from Table 1 that all the bitumens have the same low-temperature resistance rating PG-22, regardless of bitumen modification. But modification does improve the resistance of the bitumens to permanent deformations. As the degree of bitumen modification increases, so does the performance grade (PG) of the bitumen, maximally to PG 82 in the case of the highly modified bitumen PMB 45/80-80. Actually, the maximum upper PG temperature of the wearing coarse, occurring in Poland amounts to 58°C [6]. That is why the results of the multiple stress creep recovery (MSCR) test (which makes a part of the asphalt performance grading specification upgraded in 2012) are included in Table 1. At 58°C the modified bitumens show the highest resistance to the strains generated by heavy traffic of class E. On the basis of creep compliance $J_{nr,diff}$ it can be stated that as the modifier amount in the bituminous binder increases, so does the resistance of the bitumen to permanent deformations. Table 1 also shows the intermediate temperature at which condition $|G^*| \sin \delta < 5,000$ kPa was satisfied and the value of product $|G^*| \sin \delta$ which takes this temperature into account. According to [4], a lower intermediate temperature at which the bitumen is to work [4] means better properties of the bituminous binder with regard to fatigue life, owing to the fact that it stiffens less.

Table 1. Basic and functional properties of bitumens used for fatigue tests

Tablica 1. Podstawowe i funkcjonalne właściwości asfaltów użytych do badań zmęczeniowych

Characteristic / Cecha	Unit Jednostka	Type of bitumen / Rodzaj asfaltu		
		50/70	PMB 45/80-55	PMB 45/80-80
Penetration of the non-aged bitumen at 25°C Penetracja w 25°C asfaltu niestarzonego	[0.1 mm]	54	60	73
Softening point of the non-aged bitumen Temperatura mięknięcia asfaltu niestarzonego	[°C]	50.8	68.6	78.8
Bitumen penetration after ageing RTFOT Penetracja asfaltu po starzeniu RTFOT	[0.1 mm]	40	40	40
Bitumen softening point after ageing RTFOT Temperatura mięknięcia asfaltu po starzeniu RTFOT	[°C]	57.8	67.4	87.8
Performance grade PG Rodzaj funkcjonalny PG	[-]	PG 64-22	PG 76-22	PG 82-22
Resistance to heavy traffic load acc. to MSCR testing at 58°C Klasa odporności na obciążenie ruchem ciężkim wg badania MSCR w 58°C	[-]	V	E	E
Non-recoverable creep compliance $J_{nr,3,2}$ in MSCR testing at 58°C after ageing RTFOT Podatność pełzania $J_{nr,3,2}$ w badaniu MSCR w 58°C po starzeniu RTFOT	[1/kPa]	0.57	0.11	0.04
Percentage indicator of the difference in J_{nr} after the change (increase) in the stress in MSCR method at 58°C, $J_{nr,diff}$ after ageing RTFOT Procentowa zmiana podatności pełzania J_{nr} przy wzroście naprężenia w badaniu MSCR w 58°C, $J_{nr,diff}$ po starzeniu RTFOT	[%]	7	41	75
Intermediate temperature after ageing RTFOT + PAV Temperatura pośrednia asfaltu po starzeniu RTFOT + PAV	[°C]	25	22	19
$ G^* \sin \delta$ at intermediate temperature after ageing RTFOT + PAV $ G^* \sin \delta$ w temperaturze pośredniej asfaltu po starzeniu RTFOT + PAV	[kPa]	3655	3941	3791

5. WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH LEPISZCZY ASFALTOWYCH

Badanie zmęczeniowe lepiszczy metodą LAS przeprowadzono w odniesieniu do każdego z 3 rodzajów asfaltu poddanego starzeniu RTFOT + PAV przy różnych wartościach temperatury: 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C. Badanie każdego rodzaju asfaltu zostało przeprowadzone dwukrotnie w danej temperaturze. Po zakończeniu testów i usunięciu górnej płytki obciążającej obserwowano cztery rodzaje stanu próbki poddanej badaniu zmęczeniowemu: brak widocznego zniszczenia próbki, zniszczenie kohezyjne, płynięcie oraz stan pośredni pomiędzy płynięciem a zniszczeniem kohezyjnym. Stany próbek po wykonanym badaniu przedstawiono na Rys. 2, gdzie zamieszczone zdjęcia pokazują obraz próbki asfaltowej po odsunięciu górnej płytki obciążającej.

W przypadku badania asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80, niezależnie od temperatury badania, nie zaobserwowano zniszczenia wewnątrz próbki asfaltowej. Podczas badania dwóch pozostałych asfaltów: drogowego 50/70 i modyfikowanego PMB 45/80-55 typ uszkodzenia zmieniał

5. RESULTS OF FATIGUE TESTS OF BITUMINOUS BINDERS

Each of the three types of bitumens after ageing RTFOT + PAV were subjected to LAS fatigue tests at different temperatures: 10°C, 15°C, 20°C, 25°C and 30°C. Each bitumen of a particular type was tested twice at a given temperature. When the tests ended and the upper loading plate was removed the following four types of condition of the fatigue tested sample: no visible distress, cohesive failure, flow and a condition intermediate between flow and cohesive failure were observed. The types of condition of the samples after the fatigue test are presented in Fig. 2. The photos show the bitumen sample after the removal of the rheometer's upper plate.

In the case of highly modified bitumen PMB 45/80-80, no distress inside the sample was observed regardless of the test temperature. During the test of other two bitumens: neat bitumen 50/70 and modified bitumen PMB 45/80-55, the type of damage changed with test temperature. At lower temperatures, i.e. 10°C and 15°C,

się wraz z temperaturą badania. W najniższych wartościach temperatury tj. 10°C i 15°C nastąpiło zniszczenie kohezyjne (Rys. 2a), charakteryzujące się radialnymi pęknięciami inicjowanymi na krawędzi i propagującymi ku środkowi próbki. Zniszczenie kohezyjne występowało w połowie grubości próbki. Podczas badania wykonanego w przyjętych najwyższych wartościach temperatury zniszczenie nastąpiło na skutek płynięcia asfaltu na krawędziach (Rys. 2b). Płynięcie charakteryzuje się uplastycznieniem i deformacją materiału po obwodzie próbki. W zakresie średnich wartości temperatury wystąpił natomiast stan pośredni zniszczenia: pomiędzy płynięciem i zniszczeniem kohezyjnym, którego nie da się jednoznacznie sklasyfikować (Rys. 2c).

a cohesive failure occurred (Fig. 2a). It was characterized by radial cracks initiated at the edge and propagating towards the centre of the sample. The cohesive failure would occur at half the thickness of the sample. During the test conducted at the highest adopted temperatures the sample failed as a result of the flow of the bitumen at the edges (Fig. 2b). The flow is characterized by the softening and deformation of the material along the edge of the sample. Within the range of mean temperatures an intermediate state (which cannot be explicitly defined) between flow and cohesive failure occurred (Fig. 2c).

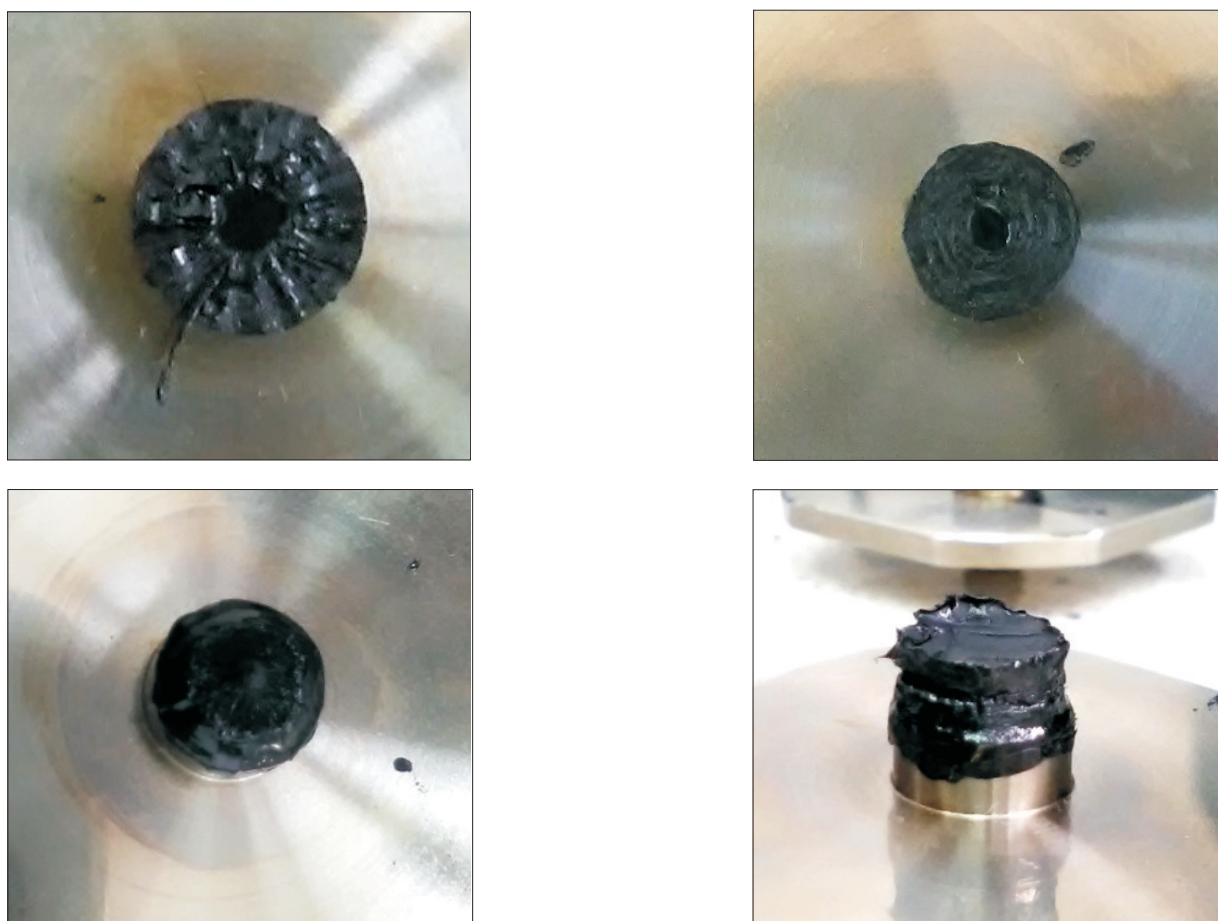


Fig. 2. The condition of bitumen samples after LAS test: a) cohesive failure inside the sample, b) flow inside the sample, c) intermediate state between cohesive damage and flow inside the sample, d) no distress – view after removal of the upper rheometer plate

Rys. 2. Stan próbek asfaltu po badaniu LAS: a) zniszczenie kohezyjne wewnątrz próbki, b) płynięcie wewnątrz próbki, c) stan pośredni między zniszczeniem kohezyjnym a płynięciem wewnątrz próbki, d) brak zniszczenia – widok po usunięciu górnej płytki reometru

W Tabl. 2 zestawiono początkowe wartości dynamicznego modułu ścinania lepszycy $|G_{initial}^*|$, kąta przesunięcia fazowego $\delta_{initial}$ oraz iloczynu $|G_{initial}^*| \sin \delta_{initial}$ uzyskane dla

Table 2 shows the initial values of dynamic shear modulus $|G_{initial}^*|$, phase angle $\delta_{initial}$ and product $|G_{initial}^*| \sin \delta_{initial}$ determined for the bituminous binders at different

różnych wartości temperatury prowadzonego badania i przy skręcaniu próbki z częstotliwością 10 Hz. Na tej podstawie przyporządkowano także rodzaj jej zniszczenia. Wynik parametru $|G_{initial}^*| \sin \delta_{initial}$ podany w Tabl. 2 różni się od wyniku $|G^*| \sin \delta$ podanego w Tabl. 1, ponieważ zgodnie z procedurą badania został on wyznaczony przy innej częstotliwości skręcania próbki (odpowiednio 10 rad/s w przypadku Tabl. 1 oraz 10 Hz w przypadku Tabl. 2).

test temperatures while oscillatory shearing the sample with a frequency of 10 Hz. This was the basis for assigning the type of failure. The value of parameter $|G_{initial}^*| \sin \delta_{initial}$ given in Table 2 differs from that of $|G^*| \sin \delta$ given in Table 1 since according to the test procedure it was determined at a different frequency of sample torsion (respectively 10 rad/s for Table 1 and 10 Hz for Table 2).

Table 2. List of the type of destruction of the binder and the dynamic modulus and phase angle at the beginning of the test depending on the temperature of the test and the type of bitumen

Tablica 2. Zestawienie rodzaju zniszczenia lepiszcza, dynamicznego modułu ścinania oraz kąta przesunięcia fazowego na początku badania w zależności od temperatury przeprowadzonego badania oraz rodzaju asfaltu

Test temperature [°C] Temperatura badania	Type of bitumen Rodzaj asfaltu	$ G_{initial}^* $ [MPa]	$\delta_{initial}$ [°]	$ G_{initial}^* \sin \delta_{initial}$ [MPa]	Type of distress Rodzaj zniszczenia
10	50/70	73	28	34	Cohesive / Kohezyjne
	PMB 45/80-55	69	28	32	Cohesive / Kohezyjne
	PMB 45/80-80	37	34	21	No distress / Brak zniszczenia
15	50/70	43	32	23	Intermediate state / Stan pośredni
	PMB 45/80-55	40	32	21	Intermediate state / Stan pośredni
	PMB 45/80-80	19	39	12	No distress / Brak zniszczenia
20	50/70	27	36	16	Intermediate state / Stan pośredni
	PMB 45/80-55	24	36	14	Flow / Płynięcie
	PMB 45/80-80	10	42	7	No distress / Brak zniszczenia
25	50/70	14	40	9	Intermediate state / Stan pośredni
	PMB 45/80-55	13	40	8	Flow / Płynięcie
	PMB 45/80-80	5	45	4	No distress / Brak zniszczenia
30	50/70	8	43	5	Flow / Płynięcie
	PMB 45/80-55	6	44	4	Flow / Płynięcie
	PMB 45/80-80	2	49	2	No distress / Brak zniszczenia

Wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się dynamiczny moduł ścinania oraz zwiększa się kąt przesunięcia fazowego, czyli asfalt stopniowo zmienia swoje właściwości w kierunku właściwości lepkich. Warto zwrócić uwagę, że w asfaltach modyfikowanych nie obserwuje się spodziewanego spadku kąta przesunięcia fazowego, który oznaczałoby poprawę właściwości sprężystych materiału, a w przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego kąt $\delta_{initial}$ zwiększa się. Dynamiczny moduł ścinania $|G_{initial}^*|$ oraz iloczyn $|G_{initial}^*| \sin \delta_{initial}$ maleje wraz ze wzrostem ilości modyfikatora i jest najmniejszy w przypadku asfaltu PMB 45/80-80, co zgodnie z założeniem teoretycznym według raportu SHRP [4] jest korzystne ze względu na mniejszą kumulację energii rozproszonej podczas obciążeń zmęczeniowych.

As the temperature rises, the dynamic shear modulus decreases while the phase angle increases, i.e. the bitumen's properties gradually change towards viscous properties. It should be noted that in the case of the modified bitumens, the expected decrease in phase angle (which would mean an improvement in the elastic properties of the material) is not observed, while in the case of the highly modified bitumen, angle $\delta_{initial}$ increases. The dynamic shear modulus $|G_{initial}^*|$ and product $|G_{initial}^*| \sin \delta_{initial}$ decrease as the amount of the modifier increases and are the lowest for bitumen PMB 45/80-80, which, according to SHRP report [4], is advantageous owing to the smaller accumulation of dissipated energy during fatigue testing.

Jako kryterium zniszczenia (stosowane do wyznaczenia parametru D_f) przyjmuje się chwilę, gdy w próbce występuje maksymalne naprężenie ścinające. Na Rys. 3 przedstawiono wykres ilustrujący zmiany naprężeń ścinających w próbce w zależności od rosnącej w trakcie badania amplitudy jej odkształceń, w przypadku asfaltu drogowego 50/70 (Rys. 3a) jego przebieg jest podobny jak dla asfaltu modyfikowanego PMB 45/80-55, oraz inny dla asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80 (Rys. 3b).

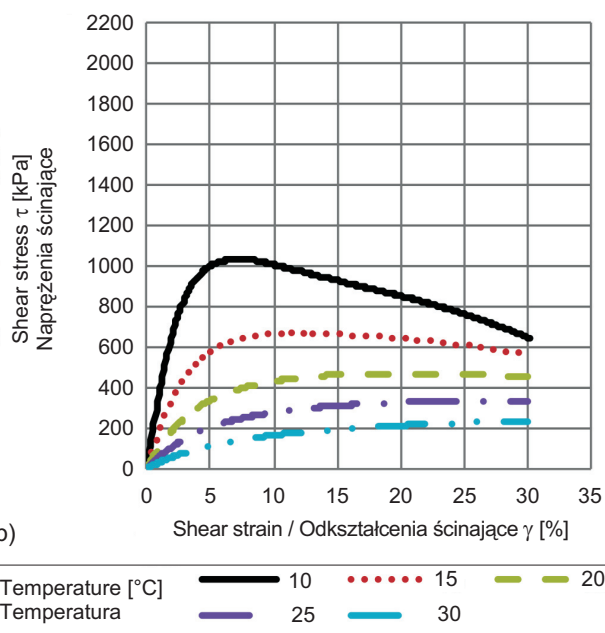
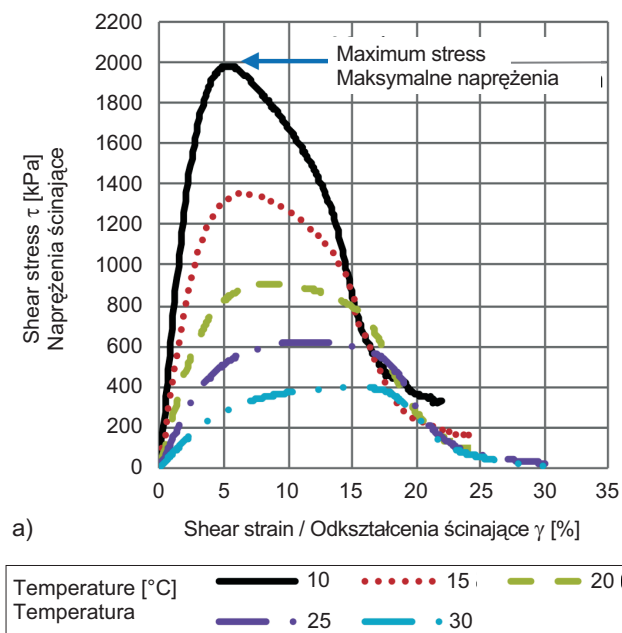


Fig. 3. Diagram of stress-strain dependence for bitumens: a) 50/70, b) PMB 45/80-80

Rys. 3. Wykres zależności naprężenie-odkształcenie w przypadku badania asfaltu: a) 50/70, b) PMB 45/80-80

Przy wszystkich rodzajach asfaltów utrzymuje się tendencja niższych naprężeń ścinających w lepszycu wraz ze wzrostem temperatury badania. Wartości odkształceń odpowiadających maksymalnym naprężeniom wzrastają wraz ze wzrostem temperatury testu. W asfaltach 50/70 (Rys. 3a) i PMB 45/80-55 zdecydowanie widoczny jest punkt, w którym lepszycze osiąga maksymalne naprężenia i następnie ich gwałtowny spadek. W przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80 (Rys. 3b) poziom maksymalnych naprężeń max jest około 2-krotnie niższy niż w przypadku pozostałych dwóch asfaltów, co jest związane z niższym modułem ścinania asfaltu PMB 45/80-80. W przypadku asfaltu PMB 45/80-80 nie następuje gwałtowny spadek naprężeń po osiągnięciu maksimum, jak w przypadku asfaltów 50/70 i PMB 45/80-55, co znaczy, że asfalt wysokomodyfikowany przenosi obciążenia przez cały czas trwania testu, podczas gdy asfalty 50/70 oraz PMB 45/80-55 nie przenoszą obciążeń przy odkształceniach powyżej 20%

The instant when the maximum shear stress occurs is adopted as the failure criterion (used to determine parameter D_f). Fig. 3 shows a diagram illustrating the changes in shear stress in the sample depending on the increasing strain amplitude for neat bitumen 50/70 (Fig. 3a). The diagram is similar to that for modified bitumen PMB 45/80-55, while it differs from that for highly modified bitumen PMB 45/80-80 (Fig. 3b).

For all the types of bitumens there is a tendency for stress to decrease with increasing test temperature. The strain corresponding to the maximum stress increases with increasing test temperature. In the case of bitumens 50/70 (Fig. 3a) and PMB 45/80-55 there is distinct point at which the maximum stress is reached, which then falls sharply. In the case of highly modified bitumen PMB 45/80-80 (Fig. 3b), the level of maximum stress max is about twice lower than that for the other two bitumens, which is due to the lower shear modulus of bitumen PMB 45/80-80. In the case of bitumen PMB 45/80-80, as opposed to bitumens 50/70 and PMB 45/80-55, no sharp fall in stress occurs after the maximum is reached, which means that the highly modified bitumen transfers loads for the whole duration of the test, whereas bitumens 50/70 and PMB 45/80-55 do not transfer loads at strains higher than 20%.

Na Rys. 4 przedstawiono wykres odkształceń ścinających występujących przy maksymalnym naprężeniu ścinającym $\gamma(\tau_{\max})$ w zależności od temperatury badania próbki asfaltu. Odkształcenie $\gamma(\tau_{\max})$ jest podstawą do wyznaczenia wartości poziomu zniszczenia D_f i wpływa na obliczaną trwałość lepiscza N_f . Przykładowo w przypadku asfaltu 50/70 i temperatury badania 10°C zniszczenie nastąpiło przy odkształceniu $\gamma_{\max} = 5\%$ (Rys. 3a). Zaobserwowano, że im wyższa temperatura badania, tym wyższe odkształcenie występujące przy zniszczeniu próbki. W przypadku asfaltów 50/70 i PMB 45/80-55 otrzymano zbliżone rezultaty odkształceń. Asfalt wysokomodyfikowany PMB 45/80-80 charakteryzuje się wyższym poziomem odkształceń przy maksymalnym naprężeniu ścinającym $\gamma(\tau_{\max})$. W przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80 badanego w temperaturze 30°C nie udało się jednoznacznie określić maksymalnego odkształcenia ścinającego, ponieważ podczas badania nie nastąpił widoczny spadek naprężeń ścinających. W tym przypadku zakres odkształceń jest zbyt mały, aby uzyskać zniszczenie materiału. W konsekwencji przebieg zależności maksymalnego naprężenia ścinającego od temperatury w przypadku asfaltu PMB 45/80-80 (Rys. 4) w przedziale od 25°C do 30°C jest zaburzony oraz dalsze obliczenia trwałości zmęczeniowej w temperaturze 30°C są niedoszacowane. Rozszerzenie zakresu odkształceń w teście LAS nie wydaje się być rozsądnym podejściem, ponieważ odkształcenia asfaltu wbudowanego w mieszankę mineralno-asfaltową w konstrukcji nawierzchni nie przekraczają poziomu 5% [30]. Innym możliwym rozwiązaniem byłoby zwiększenie liczby cykli obciążających w części „przesunięcie odkształceń”, co wiąże się z korektą procedury i obliczeń, która leży poza zakresem niniejszego artykułu. Autorzy proponują przyjąć, że w przypadku analizowanego asfaltu PMB 45/80-80 temperatura 25°C jest górną granicą, w której można stosować badanie zmęczeniowe według obecnej procedury LAS [26].

Fig. 4 shows a diagram of the shear strain occurring at maximum shear stress $\gamma(\tau_{\max})$ depending on the test temperature. Strain $\gamma(\tau_{\max})$ is used to calculate failure level D_f and has a bearing on calculated bituminous binder life N_f . For example, in the case of bitumen 50/70 and the test temperature of 10°C , the sample failed under strain $\gamma_{\max} = 5\%$ (Fig. 3a). It was found that the higher the test temperature, the greater the strain at the instant of which the sample fails. In case of bitumens 50/70 and PMB 45/80-55, similar strain results were obtained. Highly modified asphalt PMB 45/80-80 is characterized by a higher strain level at maximum shear stress $\gamma(\tau_{\max})$. In case of highly modified bitumen PMB 45/80-80 tested at the temperature of 30°C , the maximum shear strain cannot be exactly determined since no visible decrease in shear stress occurred during the test. The range of strain is too narrow to induce a material failure. As a result, the maximum shear stress-temperature plot for bitumen PMB 45/80-80 is disturbed in the interval of $25\text{-}30^\circ\text{C}$ and the further calculation of fatigue life at the temperature of 30°C yields underestimated values. The extension of the strain range of the LAS test does not seem to be a sensible approach since the strains in the bitumen incorporated in the asphalt mixture in the pavement structure do not exceed the level of 5% [30]. Another possible solution would be to increase the number of load cycles in the “strain shift” part, which entails correcting the procedure and the calculations, but this goes beyond the scope of the present paper. The authors propose to assume that in the case of the considered asphalt PMB 45/80-80 the temperature of 25°C is the upper limit for the use of the fatigue test in accordance with the current LAS procedure [26].

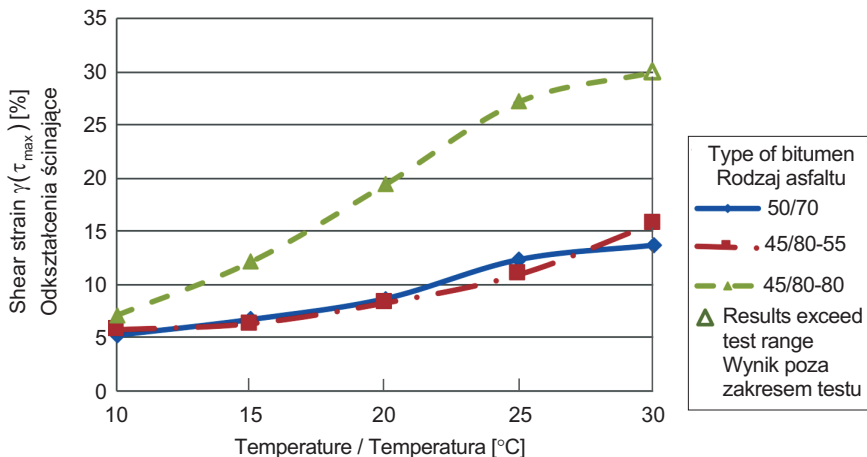
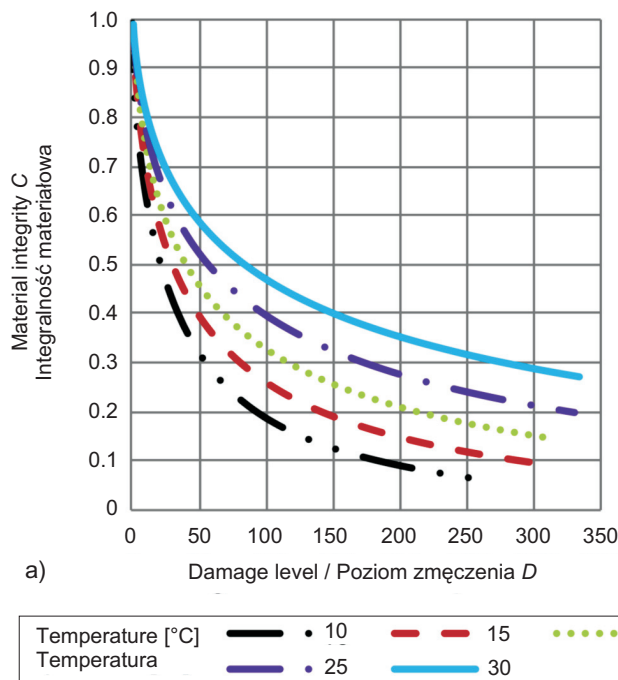


Fig. 4. Changes in shear strains corresponding to the maximum stress depending on the test temperature

Rys. 4. Zmiany odkształceń ścinających odpowiadających maksymalnym naprężeniom w zależności od temperatury badania

Poniżej na rysunku przedstawiono wykresy ilustrujące zmiany parametru integralności materiałowej C w zależności od poziomu zmęczenia D w przypadku występowania różnych wartości temperatury, w której przeprowadzono badania asfaltu (Rys. 5a) oraz w przypadku różnych lepiszczy badanych w tej samej temperaturze tj. 15°C (Rys. 5b).



Below on the next figure shows graphs illustrating the changes in material integrity C depending on damage accumulation D for the different temperatures at which the bitumens were tested (Fig. 5a) and for the different bituminous binders tested at the same exemplary temperature of 15°C (Fig. 5b).

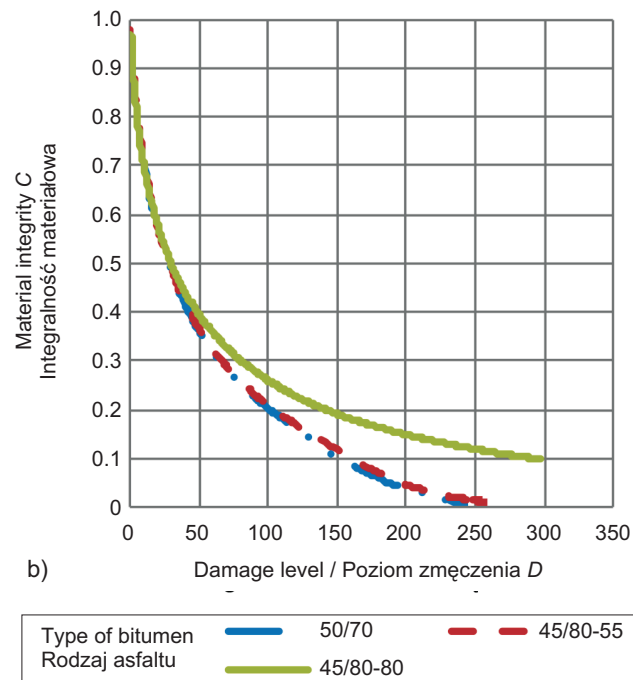


Fig. 5. Changes of material integrity C during test: a) for bitumen PMB 45/80-80 at different test temperatures, b) for individual bitumens at one temperature of 15°C

Rys. 5. Zmiany integralności materiałowej C podczas badania: a) asfaltu PMB 45/80-80 przy zróżnicowanych wartościach temperatury, b) poszczególnych asfaltów w jednej temperaturze 15°C

W przypadku wszystkich analizowanych lepiszczy asfaltowych zauważono, że przy wyższej temperaturze ich badania parametr integralności materiałowej ma łagodniejszy spadek, co znaczy, że wolniej następuje redukcja dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$. Zgodnie z równaniem (4) wartość integralności materiałowej $C = 0,5$ oznacza redukcję modułu $|G^*|$ w danym cyklu o 50% w stosunku do początkowego modułu $|G^*_{initial}|$. W przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80 (Rys. 5a) badanego w temperaturze 30°C redukcja modułu $|G^*|$ o 50% nastąpiła przy poziomie zmęczenia około $D = 82$, natomiast przy badaniu w temperaturze 10°C poziom zmęczenia był równy jedynie $D = 30$. Im wyższa wartość poziomu zmęczenia D przy stałym parametrze C , tym próbka może przenieść więcej cykli obciążających do stanu zniszczenia.

W asfalcie wysokomodyfikowanym PMB 45/80-80 (Rys. 5b) w przeciwieństwie do dwóch pozostałych lepiszczy 50/70 i PMB 45/80-55 nawet w końcowej fazie badania nie

For all the tested bituminous binders it was found that at a higher test temperature the material integrity would decline more gently, which means that the reduction in dynamic shear modulus $|G^*|$ was slower. According to equation (4), material integrity $C = 0$ means a reduction in modulus $|G^*|$ in a given cycle by 50% relative to initial modulus $|G^*_{initial}|$. In the case of highly modified bitumen PMB 45/80-80 (Fig. 5a) tested at the temperature of 30°C, a 50% reduction in modulus $|G^*|$ occurred at damage accumulation $D = 82$, whereas for the test conducted at the temperature of 10°C damage accumulation D amounted to merely 30. The higher the damage parameter at a constant parameter C , the more load cycles the sample can withstand until failure.

Unlike in the case of the other two bituminous binders: 50/70 and PMB 45/80-55, no total reduction in material integrity C to zero occurred in highly modified bitumen PMB 45/80-80 (Fig. 5b), even in the final phase of the

nastąpiła całkowita redukcja integralności materiałowej C do zera. Dzieje się tak, ponieważ asfalt ten nie uległ zniszczeniu w trakcie badania. Również krzywe opisujące zmianę parametru C w trakcie procesu obciążania mają łagodniejszy przebieg, co oznacza wolniejszą redukcję modułu $|G^*|$ podczas trwania testu zmęczeniowego.

Funkcja trwałości zmęczeniowej (10) charakteryzowana jest poprzez parametry A i B , których wartości obliczono na podstawie wyników badania LAS w przypadku poszczególnych asfaltów i zróżnicowanych wartości temperatury ich badania. Średnie wyniki obliczeń parametrów A i B funkcji trwałości zmęczeniowej wraz z zaznaczonym odchyleniem standardowym zestawiono na Rys. 6.

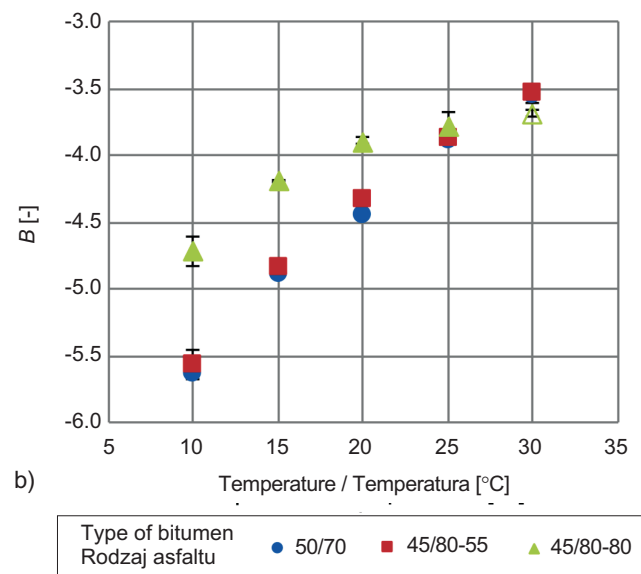
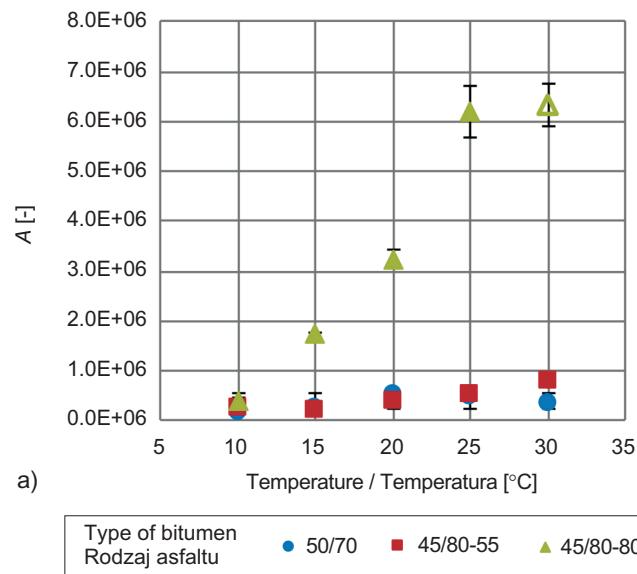


Fig. 6. Parameters of the binder fatigue life function calculated on the basis of LAS test results depending on the test temperature: a) parameter A , b) parameter B

Rys. 6. Parametry funkcji trwałości zmęczeniowej lepizsca obliczone na podstawie wyników badania LAS w zależności od temperatury badania: a) parametr A , b) parametr B

We wszystkich rozpatrywanych przypadkach zaobserwowano wzrost parametrów A i B wraz ze wzrostem temperatury badania – poza testem przeprowadzonym w najwyższej temperaturze 30°C. Wartości parametrów A i B są zbliżone w przypadku asfaltów 50/70 i PMB 45/80-55 i znacznie różnią się w przypadku asfaltu PMB 45/80-80. Parametr A istotnie zależy od integralności materiału C oraz od początkowej wartości dynamicznego modułu ścinania $|G_{initial}^*|$ przy przyłożonym odkształceniu I_D równym 0,1%. Wartość parametru A odpowiada początkowej trwałości zmęczeniowej przy odkształceniu 1%. Oznacza to, że im większa jest wartość parametru A , tym wyższa jest trwałość zmęczeniowa lepizsca. Parametr B zależy natomiast od nachylenia m

test. This was so because the bitumen did not undergo failure in the course of the test. Also the curves describing the change of parameter C during loading are gentler, which indicates that the reduction in modulus $|G^*|$ during the fatigue test was slower.

Fatigue life function (10) is characterized by parameters A and B , the values of which were calculated on the basis of the LAS test results for the particular bitumens and the different test temperatures. The average results of the calculation of fatigue life function parameters A and B together with the standard deviation are presented in Fig. 6.

In all the considered cases, except for the test carried out at the temperature of 30°C, parameters A and B were found to increase with test temperature. The values of parameters A and B are similar for bitumens 50/70 and PMB 45/80-55, being considerably different for bitumen PMB 45/80-80. Parameter A significantly depends on material integrity C and on the initial value of dynamic shear modulus $|G_{initial}^*|$ under applied strain I_D equal to 0.1%. The value of parameter A corresponds to the initial fatigue resistance at the strain of 1%. This means that the higher the value of parameter A , the higher the fatigue resistance of the bituminous binder. Parameter B depends on slope m of the dynamic shear modulus-frequency plot obtained

wykresu dynamiczny moduł ścinania-częstotliwość pochodzącego z testu „zwiększania częstotliwości”. Wraz ze wzrostem nachylenia wykresu m wzrasta też parametr B , a ze wzrostem parametru B rośnie także trwałość zmęczeniowa lepiszcza. Obliczenia trwałości zmęczeniowej wykonano wykorzystując równanie (10). Wyniki tych obliczeń przedstawiono na Rys. 7 w formie wykresów: w pierwszym przypadku w zależności od temperatury badania przy poziomie odkształcenia równym 1% (Rys. 7a) oraz w drugim przypadku w zależności od poziomu odkształcenia przy jednej temperaturze badania 15°C (Rys. 7b).

from the frequency sweep test. As the plot's slope m increases, so does the fatigue life of the bituminous binder. The fatigue life was calculated from equation (10). Fig. 7 shows the calculation results as graphs depending on the test temperature for the strain level of 1% (Fig. 7a) and depending on the strain level for the test temperature of 15°C (Fig. 7b).

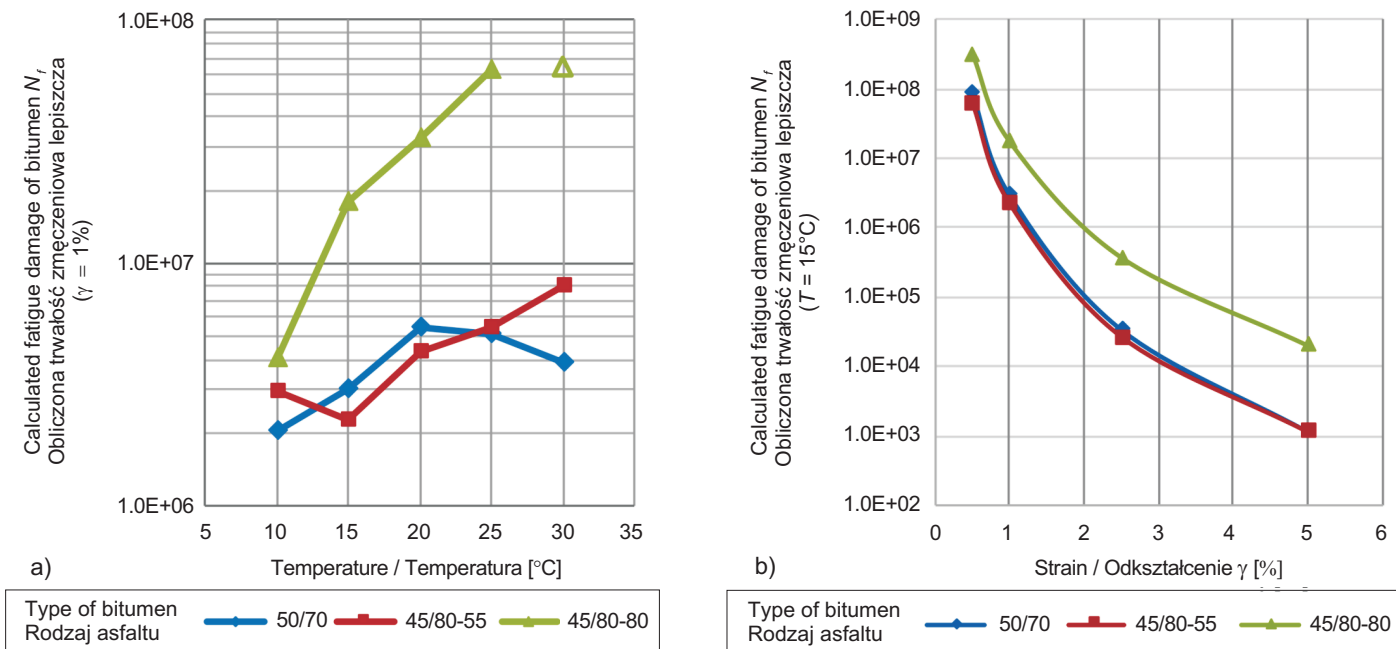


Fig. 7. The comparison of fatigue life for particular kinds of bitumens: a) with one level of strain 1% and different temperatures, b) at one temperature $T = 15^\circ\text{C}$ and various strains

Rys. 7. Zestawienie trwałości zmęczeniowych dla poszczególnych rodzajów asfaltów: a) przy jednym poziomie odkształceń 1% i różnych temperaturach, b) przy jednej temperaturze $T = 15^\circ\text{C}$ i różnych odkształceniach

Z analizy Rys. 7a wynika, że najniższa trwałość zmęczeniowa występuje w przedziale wartości temperatury między 10°C a 15°C, czyli dla wartości bliskich temperaturze ekwiwalentnej, przyjmowanej do projektowania nawierzchni w Polsce. W zakresie rozpatrywanych wartości temperatury między 10°C a 30°C, w przypadku asfaltów modyfikowanych trwałość rośnie wraz ze wzrostem temperatury, natomiast w przypadku asfaltu drogowego 50/70 osiąga maksimum w temperaturze 20°C, po czym spada. Przebieg zmian wskazuje na korzystne właściwości modyfikacji asfaltów i poprawę trwałości zmęczeniowej przy wyższych wartościach temperatury, przy czym korzystny wpływ modyfikacji jest mniej widoczny w temperaturze 10°C. W przypadku asfaltu PMB 45/80-80 trwałość zmęczeniowa obliczona dla

According to Fig. 7a, the lowest fatigue damage occurs in the temperature interval of 10-15°C, i.e. for temperatures close to the equivalent temperature assumed in the design of road pavements in Poland. In the case of the modified bitumens, in this temperature range fatigue damage increases with temperature, while for neat bitumen 50/70 it reaches its maximum at the temperature of 20°C, and then declines. The pattern of the changes indicates that the modification has a favourable influence on the bitumens, improving their fatigue resistance at higher temperatures, but the modification effect is less visible at the temperature of 10°C. In the case of bitumen PMB 45/80-80, the fatigue resistance calculated for the temperature of 30°C is significantly underestimated due to the fact that the

temperatury 30°C jest znacząco niedoszacowana, ponieważ asfalt nie uległ zniszczeniu w trakcie testu, rozumianego jako osiągnięcie punktu ekstremalnych naprężeń ścinających τ (Rys 3). Rys. 7a wskazuje, że analizowanie trwałości w przypadku zastosowania różnych wartości temperatury pracy asfaltu w odróżnieniu od analiz wykonanych w jednej temperaturze ekwiwalentnej będzie prowadzić do dokładniejszego przewidywania trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Należy dodać, że szkoda zmęczeniowa w nawierzchni narasta w przypadku występowania po sobie różnych wartości temperatury i jeżeli asfalt będzie wykazywać większą odporność na zmęczenie w szerokim przedziale temperatury to trwałość takiej nawierzchni wzrośnie. Przebieg zmian trwałości asfaltu w zależności od temperatury mógłby być zatem wykorzystany do wyznaczenia miary oceny wrażliwości termicznej asfaltu.

Trwałość zmęczeniowa lepiszczy istotnie spada wraz ze wzrostem poziomu odkształcenia (Rys. 7b) – o ponad milion cykli obciążeniowych. Maksymalne odkształcenia zachodzące w lepiszczu asfaltowym pracującym w mieszance mineralno-asfaltowej są znacznie większe niż odkształcenia dokonane w punktach krytycznych w warstwach asfaltowych konstrukcji nawierzchni. W pracy [30] wykazano, że poziom odkształceń w lepiszczu asfaltowym jest do 50 razy większy niż poziom odkształceń działających w mieszance, ale ze względu na złożoność zjawiska rozkładu naprężeń wewnątrz mieszanki szacunek ten należy traktować z rezerwą. Ze względu na wyniki obliczeń trwałości (Rys. 7b) oraz poziom odkształceń w punktach krytycznych nawierzchni obciążonej osią standardową rozsądnym poziomem odkształceń do obliczenia trwałości zmęczeniowej lepiszcza jest przedział między 0,5% a 1%. Proponowane wartości wynikają z wielkości odkształceń wyznaczonych na spodzie warstw bitumicznych typowej konstrukcji nawierzchni drogowej. W przypadku porównywania wyników badań trwałości lepiszcza z wynikami badań laboratoryjnych trwałości zmęczeniowej mieszanek rozsądnym poziomem odkształcenia w lepiszczu jest przedział między 2,5% a 5%, który opiera się na informacji, że odkształcenie lepiszcza jest do 50 razy większy niż mieszanki mma.

W przypadku analizowanych asfaltów we wszystkich wartościach temperatury ich badania i przy każdym uzyskanym poziomie odkształceń kilkukrotnie wyższą trwałością zmęczeniową od pozostałych charakteryzował się asfalt wysokomodyfikowany PMB 45/80-80. Warto zaznaczyć, że w przedziale temperatury między 15°C a 20°C asfalt modyfikowany PMB 45/80-55 miał niższą trwałość zmęczeniową od asfaltu drogowego 50/70, lecz przy badaniach wykonanych w temperaturze ponad 25°C wyższą trwałością wykazywał się asfalt modyfikowany PMB 45/80-55.

bitumen did not undergo failure in the course of the test (when extreme shear stress τ was reached) (Fig. 3). Fig. 7a shows that unlike the analyses carried out for one equivalent temperature, the analysis of fatigue resistance for different asphalt working temperatures will yield more precise predictions of pavement fatigue resistance. It should be noted that when two different temperatures follow in succession, fatigue damage in the pavement increases and if the bitumen shows greater fatigue resistance in a wide range of temperatures, the fatigue resistance of such a pavement will increase. Therefore the variation of bitumen resistance versus temperature could be used to determine a measure for evaluating bitumen thermal sensitivity.

The fatigue damage of the bituminous binders significantly decreases – by over a million load cycles – as the strain level increases (Fig. 7b). The maximum strains occurring in the bituminous binder working in the asphalt mixture are much greater than the strains in the critical points in the asphalt layers of the pavement structure. It was shown in [30] that the strain level in the bituminous binder working in the bituminous mixture is 50 times greater than the strain level in the asphalt mixture, but because of the complexity of stress distribution inside the asphalt mixture this estimate should be treated with reserve. Considering the results of the fatigue damage calculations (Fig. 7b) and the strain level in the critical points of the pavement loaded with the standard axle, it seems sensible to adopt an interval of 0.5-1% for the calculation of the fatigue damage of bituminous binders. The proposed values are based on the magnitude of the strains determined on the bottom of the bituminous layers of a typical pavement structure. For the comparison of bituminous binder fatigue resistance test results with those of laboratory tests of the fatigue resistance of asphalt mixtures a sensible level of strain in the bituminous binder is in the range of 2.5-5%, which is based on the fact that the strain of the bituminous binder is 50 times greater than that of the asphalt mixture.

For all the analysed bitumens at all the adopted test temperatures and strain levels highly modified bitumen PMB 45/80-80 was found to be characterized by several times higher fatigue resistance. It should be noted that in the temperature range of 15-20°C the fatigue resistance of modified bitumen PMB 45/80-55 was lower than that of neat bitumen 50/70, but in the case of the tests carried out at a temperature higher than 25°C modified bitumen PMB 45/80-55 showed higher durability.

6. WNIOSKI

1. Obecna klasyfikacja lepiszczy asfaltowych według norm europejskich oraz według amerykańskiego systemu badawczego „Superpave” nie dostarczają informacji o odporności lepiszcza na zmęczenie. Test liniowego zwiększania amplitudy LAS (ang. *Linear Amplitude Sweep*) jest nowym badaniem funkcjonalnym opracowanym w USA. Badanie LAS z powodzeniem zostało zaadoptowane do oceny odporności na zmęczenie wybranych polskich lepiszczy asfaltowych: asfaltu drogowego 50/70, asfaltu modyfikowanego PMB 45/80-55 i asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80.
2. Asfalt wysokomodyfikowany PMB 45/80-80 wykazuje kilka lub kilkanaście razy większą trwałość zmęczeniową niż asfalt drogowy 50/70 oraz asfalt modyfikowany PMB 45/80-55. Różnice w trwałości zmęczeniowej między asfaltem drogowym 50/70 i modyfikowanym PMB 45/80-55 są dużo mniejsze, przez co asfalty te wykazują zbliżoną odporność na zmęczenie.
3. Temperatura badania istotnie wpływa na trwałość lepiszcza. Przebieg zmian trwałości lepiszcza w zależności od temperatury wskazuje korzystne właściwości modyfikacji asfaltów na poprawę trwałości zmęczeniowej w wyższych wartościach temperatury. W niższych jej wartościach – bliskich temperaturze ekwiwalentnej, w przedziale między 10°C a 15°C, trwałość zmęczeniowa lepiszczy jest najniższa zaś wpływ modyfikacji na poprawę trwałości mniejszy.
4. Z oceny wizualnej próbek po zakończeniu badania wynika, że wraz ze wzrostem temperatury zmienia się rodzaj zniszczenia asfaltów 50/70 i PMB 45/80-55. W niższych wartościach temperatury nastąpiło ścięcie kohezyjne, natomiast w wyższych wystąpiło zjawisko płynięcia. W przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80 nie zaobserwowano wizualnych śladów zmęczenia i zniszczenia próbki po zakończeniu badania.
5. Badanie funkcjonalne LAS, przeprowadzone według opisanej procedury, w przypadku najwyższej zastosowanej temperatury badania 30°C nie doprowadziło do osiągnięcia ekstremalnych naprężeń ścinających τ i do zniszczenia próbek asfaltu wysokomodyfikowanego PMB 45/80-80. Oznacza to, że obecna procedura testu LAS ma granice stosowności, wobec czego wdrożenie w Polsce badania funkcjonalnego LAS asfaltów wymagałoby wykonania dalszych badań przeprowadzonych na szerszej próbie asfaltów.

6. CONCLUSIONS

1. The current classifications of bituminous binders according to the respective European standards and the American Superpave system do not provide information about binder fatigue resistance. The linear amplitude sweep (LAS) test is a new performance grading test developed in the USA. The LAS test was successfully adapted for the purpose of evaluating the fatigue resistance of the selected Polish bituminous binders: neat bitumen 50/70, modified bitumen PMB 45/80-55, and highly modified bitumen PMB 45/80-80.
2. Highly modified bitumen PMB 45/80-80 shows a few or 10-20 times higher fatigue resistance than neat bitumen 50/70 and modified bitumen PMB 45/80-55. The differences in fatigue resistance between neat bitumen 50/70 and modified bitumen PMB 45/80-55 are much smaller, whereby these bitumens present similar fatigue resistance.
3. Test temperature has a significant effect on the durability of the bituminous binders. The changes in bitumen binder durability versus temperature indicate that modification improves fatigue resistance at higher temperatures. At lower temperatures (close to the equivalent temperature) in the range of 10-15°C the fatigue resistance of the bituminous binders is the lowest and the durability improving effect is weaker.
4. The visual evaluation of the samples after the test indicates that as the temperature increases, the type of failure of bitumen 50/70 and bitumen PMB 45/80-55 changes. At lower temperatures cohesive failure occurred, while at higher temperatures the failure had the form of flow. In the case of highly modified bitumen PMB 45/80-80 no visual signs of fatigue or failure were observed when the test ended.
5. At the highest temperature of 30°C the LAS test carried out in accordance with the procedure described in this paper did not result in a failure of the samples of highly modified bitumen PMB 45/80-80 under extreme shear stress τ . This means that the current LAS test procedure has limited applicability. Therefore the implementation of the LAS bitumen performance grading test in Poland would require further tests on a wider range of bitumens.
6. On the basis of the test results presented in this paper the authors suggest that the strain level adopted in calculations of the fatigue damage of bituminous binders should be in the interval of 0.5-5%. Moreover, the fatigue

6. Na podstawie opisanych w pracy wyników badań autorzy sugerują, aby poziom odkształcenia stosowany do obliczenia trwałości zmęczeniowej lepiszczu był przyjmowany w przedziale między 0,5% a 5%. Ponadto ocena trwałości zmęczeniowej lepiszczu powinna być przeprowadzana z uwzględnieniem różnych wartości temperatury badania.

resistance of bituminous binders should be evaluated taking into account different test temperatures.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] PN- EN 12592:2010 Asfalty i lepiszczasfaltowe - wymagania dla asfaltów drogowych
- [2] PN- EN 14023:2011 Asfalty i lepiszczasfaltowe - zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami
- [3] AASHTO M 320-17 Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder
- [4] Superior Performing Asphalt Pavements: The product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP A-410 Report, Waszyngton, USA, 1994
- [5] *Sybilski D., Mirski K.*: Dobór asfaltu do nawierzchni w polskich warunkach klimatycznych z uwzględnieniem procedur SHRP/Superpave. VI Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce, 9-10 maja 2000, 213-223
- [6] *Pszczółka 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
- [7] *Radziszewski P., Piłat J., Król J., Kowalski K., Sarnowski M.*: Weryfikacja wymagań i metod oceny właściwości lepko-sprężystych krajowych asfaltów i asfaltów modyfikowanych, Raport końcowy. Politechnika Warszawska, GDDKiA, Warszawa, 2011
- [8] *Sarnowski M.*: Rheological properties of road bitumen binders modified with SBS polymer and polyphosphoric acid. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 47-65, DOI: 10.7409/rabdim.015.004
- [9] *Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B., Sarnowski M., Piłat J.*: Quality assessment of bituminous binders based on the viscoelastic properties: Polish experience. *Journal of Civil Engineering and Management*, **20**, 1, 2014, 111-120
- [10] *Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M.*: Poradnik asfaltowy. Orlen Asphalt, Płock, 2017
- [11] *Judycki J.*: Fatigue of asphalt mixes. University of Oulu, Publications of Road and Transport Laboratory, Oulu, Finland, 1991
- [12] *Mackiewicz P.*: Fatigue tests of bituminous mixtures with inclusion of initial cracks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**, 1, 2012, 140-147
- [13] *Bańkowski W.*: Evaluation of fatigue life of asphalt concrete mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Applied Sciences-Basel*, **8**, 3, 2018, 469, DOI: 10.3390/app8030469
- [14] *Buczyński P., Iwański M.*: Fatigue life comparison of recycled cold mixes with foamed bitumen and with bitumen emulsion. *Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016, Procedia Engineering*, **172**, 2016, 135-142, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.035
- [15] *Sybilski D., Gajewski M., Bańkowski W., Soen H., Chailleux E., Gauthier G.*: Binder fatigue properties and the results of the RILEM round robin test. *Proceedings of the 7th International RILEM Symposium ATCBM09 on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Rhodes, Greece, 27-29 May 2009, **1-2**, 2009, 1221-1231
- [16] *Bahia H.U., Zhai H., Zeng M., Hu Y., Turner P.*: Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **70**, 2002, 442-470
- [17] *Pell P.S.*: Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes. *Proceedings of the International Conference on Structural Design and Asphalt Pavements*, Ann Arbor, MI, USA, **203**, 1962, 43-58
- [18] *Potschka V., Schmidt H.*: Fatigue life of polymer modified bitumen. *Proceedings of the 5th Eurobitume Congress*, Stockholm, Sweden 1993, Vol. 1A, 1993, 103-105
- [19] *Ahmed T.M.*: Asphalt fatigue failure analysis and modelling: experimental studies and theoretical formulation. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Liverpool, August 2016
- [20] *Sybilski D., Wróbel A., Bańkowski W.*: Opracowanie i weryfikacja badania zmęczenia lepiszczu asfaltowych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Zakład Technologii Nawierzchni, Warszawa, 2007, 1-62, https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435//documents/sprawozdanie-ws-07-2007.pdf, 23.02.2018

- [21] *Safaei F., Castorena C.*: Temperature effects of linear amplitude sweep testing and analysis. *Journal of the Transportation Research Board*, 2574, 2016, 92-100
- [22] *Hintz C., Velasquez R., Li Z., Bahia H.*: Effect of oxidative aging on binder fatigue performance. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **80**, 2011, 527-548
- [23] *Delgadillo R., Bahia H.*: Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **74**, 2004, 97-137
- [24] AASHTO R 29-08 2012 Grading or Verifying the Performance Grade (PG) of an Asphalt Binder
- [25] *Hintz C., Velasquez R., Johnson C., Bahia H.*: Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Journal of the Transportation Research Board*, 2207, 2011, 99-106
- [26] AASHTO TP 101-14 Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep
- [27] *Schapery R.A.*: Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. *International Journal of Fracture*, **25**, 3, 1984, 153-223
- [28] *Kim Y., Lee H.J., Little D.N., Kim Y.R.*: A simple testing method to evaluate fatigue fracture and damage performance of asphalt mixtures. *Journal Association of Asphalt Paving Technologist*, **75**, 2005, 755-788
- [29] *Masad E., Somadevan N., Bahia H.U., Kose S.*: Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, **127**, 6, 2001, 477-485