

ANDRZEJ PLEWA¹⁾

ASPHALT MIXTURES WITH BINDERS FLUIDIZED BY ADDITION OF VEGETABLE ORIGIN OIL FOR APPLICATIONS AS FLEXIBLE ANTI-CRACK LAYERS

MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE Z LEPI SZCZAMI UPŁYNNIONYMI DODATKIEM OLEJU ROŚLINNEGO DO ZASTOSOWAŃ JAKO ELASTYCZNE WARSTWY PRZECIWSPEKANIOWE

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań i analiz właściwości technicznych mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem lepiszczy modyfikowanych kopolimerem SBS z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego. Analizowane mieszanki mineralno-asfaltowe poddano badaniom odporności na działanie wody ITSR, modułów sztywności IT-CY i 4PB-PR oraz odporności na zmęczenie poprzez wykorzystanie testu 4PB-PR. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające elastomeroasfalty z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego mają znacznie większą trwałość zmęczeniową i odporność na działanie wody w stosunku do mieszanek mineralno-asfaltowych wyprodukowanych z zastosowaniem lepiszczy produkowanych przemysłowo. Tego typu rozwiązania materiałowe mogą być z powodzeniem wykorzystane do zastosowania jako warstwy przeciwspekaniowe, zapobiegające propagacji spękań odbitych lub zmęczeniowych w przypadku górnych warstw nawierzchni drogowej lub ich wzmocnień. Ponadto dodatek upłynniacza pochodzenia roślinnego pozwala na obniżenie temperatury zarówno podczas produkcji jak i w czasie wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych w konstrukcję nawierzchni drogowych, co daje to także wymierne korzyści ekonomiczne.

SŁOWA KLUCZOWE: lepiszcza z dodatkiem upłynniaczy roślinnych, mieszanki mineralno-asfaltowe, moduł sztywności, odporność na zmęczenie.

ABSTRACT. The paper presents the results of research and analyses of the technical characteristics of asphalt mixtures with bituminous binders modified using SBS copolymers with the addition of bio-fluxing agents. The analysed asphalt mixtures have been subjected to water resistance ITSR tests, stiffness modulus IT-CY, and 4PB-PR tests as well as fatigue life test through 4PB-PR test. Basing on the obtained results of tests it has been stated that asphalt mixtures using elastomeric binder with the addition of bio-fluxing agents are characterized by a much greater fatigue life and water resistance in comparison to asphalt mixtures using industrially manufactured binders. Such material solutions can be effectively used as anti-crack layers preventing the propagation of reflective or fatigue cracking to the top layers of road surfaces or their strengthening. Another significant aspect of the conducted research and analyses is the fact that the addition of bio-fluxing agents allows to lower temperatures not only during production of asphalt mixtures but also during incorporation them into road surfaces, what on the other hand is very profitable.

KEYWORDS: binders containing bio-fluxing agents, asphalt mixtures, stiffness modulus, resistance to fatigue.

DOI: 10.7409/rabdim.019.012

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Budownictwa i Inżynierii Drogowej, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok; a.plewa@pb.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Nieustanny wzrost natężenia ruchu drogowego oraz obciążen nawierzchni drogowych pojazdami ciężarowymi są głównymi czynnikami wpływającymi na rozwój techniczny i postęp technologii w budownictwie drogowym. Nowoczesne rozwiązania związane z projektowaniem i produkcją mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) powinny zapewniać bezpieczeństwo i komfort jazdy użytkownikom dróg. Wysoka trwałość nawierzchni drogowych, ich równość czy szorstkość są równoznaczne z wykorzystywaniem dokładniejszych metod projektowania oraz zastosowań nowatorskich technologii produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych.

Bardzo istotny wpływ na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej mają zastosowane w niej lepiszcza bitumiczne. Mimo, że zawartość asfaltu w MMA mieści się w granicach 4÷7% to właściwości eksploatacyjne mieszanki wynikają w głównej mierze z cech technicznych zastosowanego do jej produkcji lepiszcza. Badania i analizy wykonane na podstawie programu SHRP [1-3] pokazują, że o jakości asfaltu decyduje w 40% odporność MMA na koleinowanie, w 60% na spękania zmęczeniowe i aż w 90% odporność MMA na spękania niskotemperaturowe.

Stosowane do produkcji MMA lepiszcza powinny charakteryzować się odpowiednim zakresem lepkościowości. Dobrej jakości asfalty powinny mieć dużą sztywność w wysokich wartościach temperatury występujących latem oraz odpowiednią elastyczność podczas oddziaływania niskich wartości temperatury zimą. Aby zapewnić lepiszczom wymagane polepszenie właściwości technicznych stosuje się modyfikacje asfaltów różnego rodzaju dodatkami. Opracowano wiele metod, w których do modyfikacji asfaltów wykorzystuje się między innymi odpady gumowe, związki soli metalicznych lub siarki. Najlepsze jednak rezultaty osiągnięto stosując do tego celu dodatki polimerów np. kopolimeru SBS [3-5].

Modyfikacja asfaltów polimerami jest techniką znaną od wielu lat. Uzyskane w ten sposób asfalty stosowane są z powodzeniem w różnych warunkach klimatycznych oraz pod bardzo dużymi obciążeniami. Asfalty te mają jednak również wady. Zwiększenie elastyczności (poprzez zastosowanie dodatku elastomeru) wiąże się z koniecznością zastosowania wyższych wartości temperatury podczas produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych. Nie tylko zwiększa to koszty, ale także powoduje zanieczyszczenie środowiska. W wysokich wartościach temperatury lotne części asfaltu przedostają się do atmosfery w większych ilościach. Również energia potrzebna do podgrzania asfaltu i kruszywa wytwarzana jest kosztem eksploatacji środowiska naturalnego [6-8].

1. INTRODUCTION

The main factors stimulating the developments in the road engineering and construction technologies are the ever increasing traffic volumes with increasing loading by Heavy Goods Vehicle (HGV) traffic. The contemporary asphalt mixtures are expected to ensure safety and comfort of travel owing to appropriate engineering and production techniques. High durability, smoothness or skid resistance of asphalt road surfaces intrinsically depend on more accurate engineering accompanied with innovative production and placement techniques.

The properties of asphalt mixtures depend very largely on the type of bituminous binder used in their production. Despite the small content of bitumen added to asphalt mixtures, typically in the region of 4-7%, the bitumen binder properties have a predominant effect on the asphalt mixture performance characteristics. The tests and analyses performed with SHRP [1-3] program show that the respective asphalt mixture properties define the quality of asphalt as follows: rut resistance in 40%, fatigue cracking resistance in 60% and low-temperature crack resistance in as much as 90%.

Asphalt binders used for production of asphalt mixtures should feature viscoelastic behaviour in the desired range. Good quality bitumens are expected to remain stiff at high ambient temperatures during summer and elastic at low temperatures during winter. To this end, bitumens are modified with various additives designed to improve their performance properties. There are a number of different technologies applied to modify bitumens which include addition of recycled rubber, metallic salts or sulphur. However, the best results were obtained with addition of polymers, such as SBS [3-5].

Modification of bitumens by adding polymers is a technique that has been known for years. Bitumens obtained in this way have been used successfully in different climates and under very heavy traffic loading. They are, however, not free from disadvantages. The increased elasticity of asphalt (obtained by addition of elastomer) requires higher temperatures during production and placement of asphalt mixtures. This results in a higher cost and environmental pollution. The latter is caused by a greater amount of volatile parts of asphalt that become evaporated to the atmosphere in the process. Also the energy needed to heat up the asphalt and aggregate involves exploitation of natural environment [6-8]. One of the measures applied in order to lower the production and placement temperatures is the addition of fluxing agents. Their function is to reduce the

Aby obniżyć temperaturę zarówno produkcji jak i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych stosuje się między innymi upłynniacze do lepszycy asfaltowych. Dodatek upłynniaczy powoduje więc obniżenie temperatur stosowanych w technologii: wytwarzania (poniżej 150°C), transportu, rozkładania i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych (w granicach 80°C÷110°C).

Przeprowadzone doświadczenia [9-13] potwierdziły, że możliwa jest produkcja asfaltów upłynnionych dodatkami pochodzenia roślinnego oraz wskazane jest ich stosowanie do produkcji MMA. Nowa generacja lepszycy stanowi mieszaninę asfaltu ponaftowego i oleju roślinnego lub jego pochodnych. O przydatności surowców roślinnych do upłynniania asfaltów decyduje możliwość przeprowadzenia procesu ich sykatywacji, w efekcie którego następuje sieciowanie się i polimeryzacja estrów kwasów tłuszczowych połączona z odparowaniem lekkich związków węglowodorowych [9, 14-16]. Wzrost konsystencji kwasów tłuszczowych i ich estrów w tym procesie zachodzi w wyniku utleniającej polimeryzacji. Głównym kryterium przydatności olejów roślinnych do otrzymywania ekologicznych upłynniaczy asfaltów jest łatwość ich utleniania. Podatność na utlenianie zależy od ilości i rozmieszczenia wiązań nienasyconych w łańcuchu węglowodorowym kwasów tłuszczowych. Oleje bogate w kwasy tłuszczowe o trzech i dwóch wiązaniach podwójnych, jak oleje lniany i tungowy, określa się mianem „olejów schnących”, natomiast oleje słonecznikowy i sojowy zaliczane są do „olejów półschnących”, a olej rzepakowy do „olejów nieschnących”. Olej rzepakowy charakteryzuje się mniejszą podatnością na utleniającą polimeryzację w porównaniu z olejami schnącymi. Wymaga on stosowania procesu utleniania w wyższej temperaturze celem uzyskania produktu, który nadawałby się do zastosowania jako upłynniacz asfaltów. W Stanach Zjednoczonych i w Europie Zachodniej do upłynniania asfaltów najczęściej stosowane są oleje rzepakowy i lniany oraz ich estry metylowe [9, 14-16].

Przedstawione w artykule badania i analizy potwierdzają, że mieszanki mineralno-asfaltowe z zastosowaniem elastomeroasfaltów z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego wykazują trwałość zmęczeniową prawie trzy- do czterokrotnie wyższą w stosunku do mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem typowych asfaltów drogowych. Można zatem postawić tezę, że mieszanki mineralno-asfaltowe, których zastosowano elastomeroasfalty z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego są bardzo dobrym rozwiązaniem do wykorzystania jako warstwy przeciwspekaniowe na zniszczone spękaniem nawierzchnie drogowe. Przedstawione w opracowaniu rezultaty badań świadczą, że mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem elastomeroasfaltu upłynnionego

temperatury wymaganej podczas produkcji (do poniżej 150°C), transport, rozkładania i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych (do 80-110°C).

Przeprowadzone doświadczenia [9-13] potwierdziły, że możliwa jest produkcja asfaltów upłynnionych dodatkami pochodzenia roślinnego oraz wskazane jest ich stosowanie do produkcji MMA. Nowa generacja lepszycy stanowi mieszaninę asfaltu ponaftowego i oleju roślinnego lub jego pochodnych. O przydatności surowców roślinnych do upłynniania asfaltów decyduje możliwość przeprowadzenia procesu ich sykatywacji, w efekcie którego następuje sieciowanie się i polimeryzacja estrów kwasów tłuszczowych połączona z odparowaniem lekkich związków węglowodorowych [9, 14-16]. Wzrost konsystencji kwasów tłuszczowych i ich estrów w tym procesie zachodzi w wyniku utleniającej polimeryzacji. Głównym kryterium przydatności olejów roślinnych do otrzymywania ekologicznych upłynniaczy asfaltów jest łatwość ich utleniania. Podatność na utlenianie zależy od ilości i rozmieszczenia wiązań nienasyconych w łańcuchu węglowodorowym kwasów tłuszczowych. Oleje bogate w kwasy tłuszczowe o trzech i dwóch wiązaniach podwójnych, jak oleje lniany i tungowy, określa się mianem „olejów schnących”, natomiast oleje słonecznikowy i sojowy zaliczane są do „olejów półschnących”, a olej rzepakowy do „olejów nieschnących”. Olej rzepakowy charakteryzuje się mniejszą podatnością na utleniającą polimeryzację w porównaniu z olejami schnącymi. Wymaga on stosowania procesu utleniania w wyższej temperaturze celem uzyskania produktu, który nadawałby się do zastosowania jako upłynniacz asfaltów. W Stanach Zjednoczonych i w Europie Zachodniej do upłynniania asfaltów najczęściej stosowane są oleje rzepakowy i lniany oraz ich estry metylowe [9, 14-16].

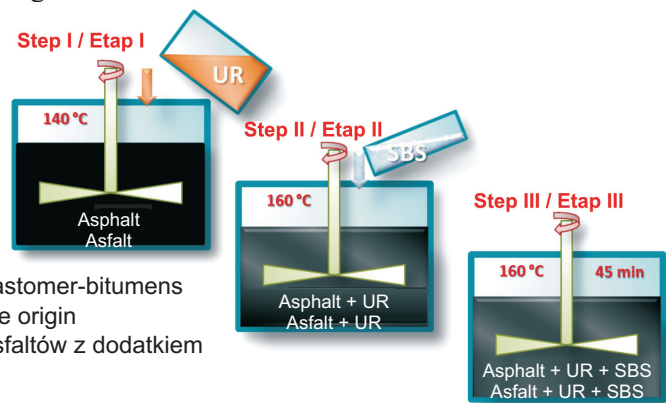
The results of research and analyses presented in this article confirm that the fatigue life of asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agents is almost 3-4 times higher than the fatigue life of typical pen grade bitumens. Hence we can put forward a claim that asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with a bio-fluxing agents are a material of choice for production of asphalt interlayers placed as part of maintenance of severely cracked pavements. The test results presented in this article demonstrate that such mixtures can carry loads causing shear strains in the region of 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ and even more. Conversely, conventional asphalt mixtures cause problems in testing already at the strains of 200 $\mu\text{m}/\text{m}$. In addition, the value of ITSR was in the region of 100% in the water sensitivity test with one freeze-thaw cycle.

olejem roślinnym są w stanie przenieść obciążenia przy odkształceniach postaciowych nawet na poziomie 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ i wyższych. Konwencjonalne mieszanki mineralno-asfaltowe trudno zbadać już przy poziomie odkształceń 200 $\mu\text{m}/\text{m}$. Dodatkowo wskaźnik ITSR odporności na działanie wody z cyklem zamrażania uzyskano w granicach około 100%.

2. BADANIA LEPIECZY ASFALTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH ELASTOMEROASFALTY Z DODATKIEM UPŁYNNIACZY POCHODZENIA ROŚLINNEGO

Do badań laboratoryjnych jako asfalt bazowy wykorzystano następujące asfalty drogowe: 35/50, 50/70, 70/100, 100/150 i 160/220. Asfalty modyfikowano dodając odpowiednio 3%, 5% i 7% kopolimeru SBS, który upłynniało przez zastosowanie 5%, 10%, 15% i 20% oleju pochodzenia roślinnego (UR). Proces modyfikacji lepiszczy asfaltowych przedstawiono schematycznie na Rys. 1.

Fig. 1. The process of modification of elastomer-bitumens with the addition of fluidizers of vegetable origin
Rys. 1. Proces modyfikacji elastomeroasfaltów z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego



Proces modyfikacji lepiszczy asfaltowych składa się z trzech etapów. W etapie pierwszym do asfaltu o temperaturze 140°C dodawany jest upłynniacz roślinny. W etapie drugim, po czasie w którym mieszanina asfaltu i upłynniacza osiągnie temperaturę 175°C, dodawany jest elastomer – kopolimer SBS (radialny 1192). W etapie trzecim następuje proces wygrzewania lepiszcza w temperaturze 160°C przez 45 minut.

W celu oceny właściwości lepkosprężystych analizowanych lepiszczy asfaltowych wykonano następujące oznaczenia laboratoryjne:

- penetracji w temperaturze 5°C, 15°C oraz 25°C,
- temperatury mięknięcia metodą PiK,
- temperatury łamliwości wg Fraassa,
- lepkości dynamicznej w temperaturach 90°C, 110°C, 135°C i 150°C,
- nawrotu sprężystego w temperaturze 25°C,
- energii odkształcenia w temperaturze 5°C.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych i ich analiz [10] dokonano wyboru optymalnego składu lepiszcza asfaltowego pod względem zastosowanego rodzaju asfaltu bazowego, zawartości kopolimeru SBS i ilości dodatku upłynniacza roślinnego. Ustalono, że najlepszymi parametrami technicznymi charakteryzuje się lepiszcze 50/70+5% SBS+10% UR.

2. TESTS OF ASPHALT BINDERS CONTAINING ELASTOMERIC POLYMER-MODIFIED BITUMENS FLUXED WITH BIO-FLUXING AGENTS

The following pen grade bitumens were used as base bitumens in the laboratory tests: 35/50, 50/70, 70/100, 100/150 and 160/220. These bitumens were modified with 3%, 5% and 7% of SBS copolymer, fluxed with a plant oil (bio-fluxing agent, designated UR). The process of modification of asphalt binders is presented schematically in Fig. 1.

The process comprises three steps. In the first step bio-fluxing agent is added to the test asphalt heated up to 140°C. Elastomer, namely SBS copolymer (radial, 1192) is added in the second step when the mixture of asphalt with bio-fluxing agent has reached the temperature of 175°C. Heat soaking of binder at 160°C for 45 minutes is the third, final step of the process.

The following laboratory determinations were conducted in order to assess the viscoelastic properties of the analysed asphalt binders:

- Penetration at 5°C, 15°C, and 25°C,
- R&B softening point,
- Fraass breaking point,
- Rotational viscosity at 90°C, 110°C, 135°C and 150°C,
- Elastic recovery at 25°C,
- Deformation energy at 5°C.

The rheological tests of asphalt binders and analyses of their rheological properties [10] were used to determine the optimum composition of asphalt binder, including the type of base binder and the amounts of SBS and bio-fluxing agent added. It was determined that the best parameters are obtained by asphalt binder with the following composition: 50/70 bitumen+5% SBS+10% UR.

Aby wykazać poprawę właściwości technicznych elastomeroasfaltu, spowodowaną dodatkami płynnego oleju roślinnego, wykonano badania: penetracji, temperatury mięknięcia PiK, temperatury łamliwości wg Fraassa i lepkości dynamicznej, a następnie opracowano „Kartę jakości asfaltów” (wykres BTDC) z udziałem następujących lepiszczy: 50/70, 50/70+5% SBS i 50/70+5% SBS+10% UR (Rys. 2).

The following determinations were done in order to confirm improvement of the performance properties of the bitumen caused by addition of plant oil: penetration, R&B softening point, Fraass breaking point and rotational viscosity and next bitumen test data chart (BTDC) was plotted for asphalt binders with the following compositions: 50/70, 50/70+5% SBS and 50/70+5% SBS+10% UR (Fig. 2).

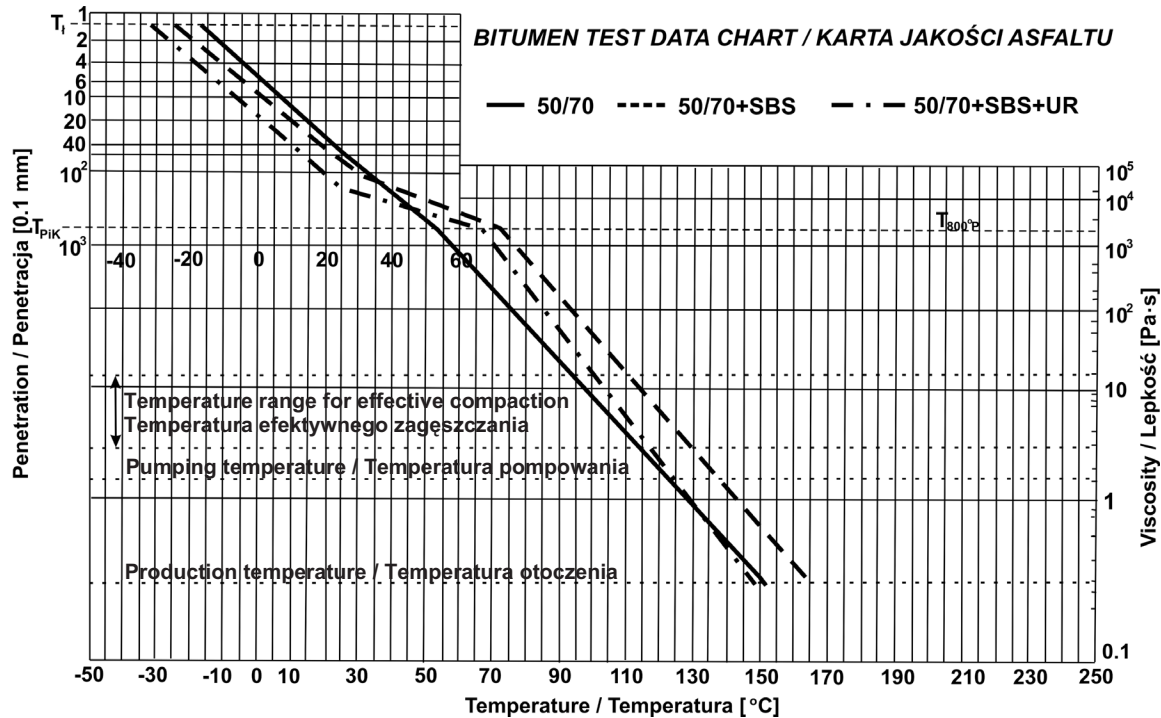


Fig. 2. Bitumen test data chart: 50/70, 50/70 + 5% SBS, and 50/70 + 5% SBS + 10% UR
Rys. 2. Karta jakości asfaltów 50/70, 50/70 + 5% SBS i 50/70 + 5% SBS + 10% UR

Na podstawie wyników badań przedstawionych na wykresie BTDC (Rys. 2) należy stwierdzić, że elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza roślinnego (UR) charakteryzuje się najniższą temperaturą wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej (147°C). Jest to temperatura o niemal 20°C niższa od temperatury, w jakiej należałoby produkować MMA z elastomeroasfaltem 50/70+5%SBS. Dostępne na polskim rynku elastomeroasfalty wymagają zastosowania temperatury wytwarzania mieszanek w granicach 165°C. Takie obniżenie temperatury wytwarzania MMA daje wymierne korzyści ekonomiczne. Elastomeroasfalt z upłynniaczem roślinnym charakteryzuje się także najniższą (korzystną) temperaturą łamliwości (-33°C) w stosunku do pozostałych lepiszczy: elastomeroasfalt (-23°C), asfalt 50/70 (-17°C). Można więc przewidywać, że mieszanki mineralno-asfaltowe z dodanym elastomeroasfaltem z upłynniaczem roślinnym będą charakteryzowały się najwyższą odpornością na spękania niskotemperaturowe zachodzące w nawierzchni drogowej. Wartości

According to BTDC (Fig. 2) the lowest production temperature was obtained for the elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with a bio-fluxing agent (UR). It is by almost 20°C lower than the temperature required for production of the asphalt mixture containing 50/70+5% SBS elastomeric polymer-modified bitumen. Note that elastomeric polymer-modified bitumens available in Poland require production temperatures in the region of 165°C. Such considerable lowering of the production temperature yields real economic benefits. Moreover, the bitumen fluxed with bio-fluxing agent has also the lowest (desired) breaking point (-33°C) compared to the other tested binders: elastomeric polymer-modified bitumen (-23°C), and 50/70 bitumen (-17°C). Therefore, asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with a bio-fluxing agent can be expected to have the best low-temperature cracking resistance. The following R&B softening points were obtained for the tested

temperatury mięknięcia PiK, jakie oznaczono w przypadku analizowanych lepiszczy asfaltowych to odpowiednio: 67°C dla 50/70+5% SBS+10% UR, 74°C dla 50/70+5% SBS, 48°C dla 50/70.

3. BADANIA MMA Z ZASTOSOWANIEM ELASTOMEROASFALTÓW Z DODATKIEM UPŁYNNIACZY POCHODZENIA ROŚLINNEGO

W pracy przedstawiono rezultaty badań nad mieszankami mineralno-asfaltowymi typu beton asfaltowy AC 16P, stosowanymi w przypadku dróg o kategorii ruchu KR5÷KR7. Analizowane mieszanki mineralno-asfaltowe AC 16P zaprojektowano zgodnie z WT-2 2014 [17]. Mieszanki AC 16P zróżnicowano ze względu na zastosowany do ich produkcji rodzaj lepiszcza na:

- asfalt drogowy 50/70,
- produkowany przemysłowo elastomeroasfalt PMB 25/55-60,
- wytworzony w laboratorium elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza roślinnego 50/70+5% SBS+10% UR.

W Tabl. 1 podano skład betonu asfaltowego AC 16P, natomiast na Rys. 3 zobrazowano krzywą uziarnienia mieszanki mineralnej betonu asfaltowego AC 16P. W Tabl. 2 podano temperatury wytwarzania analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

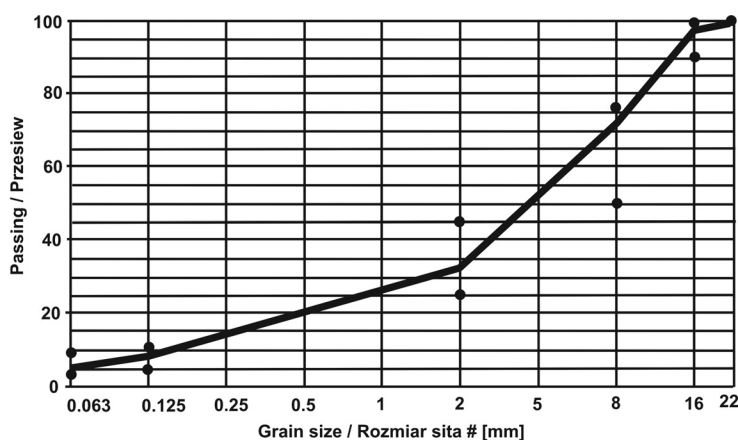


Fig. 3. Grain-size distribution curve of asphalt concrete mixture AC 16P

Rys. 3. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej betonu asfaltowego AC 16P

Mieszanki mineralno-asfaltowe poddano procesowi starzenia zgodnie z WT-2 2014 [17]. W celu oceny właściwości technicznych analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano następujące oznaczenia laboratoryjne:

asphalt binders: 67°C for 50/70+5% SBS+10% UR, 74°C for 50/70+5% SBS and 48°C for 50/70 bitumen.

3. TESTS OF BITUMINOUS MIXTURES CONTAINING ELASTOMER-BITUMENS WITH THE ADDITION OF FLUIDIZERS OF VEGETABLE ORIGIN

This study presents the results of testing asphalt mixtures specified for roads of traffic service level KR5-KR7, such as asphalt concrete mixture AC 16P. The analysed asphalt concrete mixtures AC 16P were designed according to WT-2 2014 guide [17]. Three asphalt concrete mixtures AC 16P were tested, each containing different asphalt binders:

- bitumen 50/70,
- commercially produced elastomeric polymer-modified bitumen PMB 25/55-60,
- laboratory produced elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with bio-fluxing agent with the following composition: 50/70+5% SBS+10% UR.

The composition of AC 16P is given in Table 1 and the grading curve of the aggregate mix is presented in Fig. 3. The production temperature of asphalt concrete mixture AC 16P is given in Table 2.

Table 1. Composition of asphalt mixture AC 16P
Tablica 1. Skład betonu asfaltowego AC 16P

Mixture component Składnik mieszanki	Content / Zawartość [%]	
	Aggregate mix Mieszanka mineralna	Bituminous mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa
Limestone filler Mączka wapienna	6.0	5.7
Crushed sand 0/22 Piasek łamany 0/22	21.9	20.8
Fine aggregate 2/5 Grys 2/5	39.2	37.2
Coarse aggregate 8/16 Grys 8/16	32.9	31.3
Asphalt / Asfalt	–	5.0

The tested asphalt mixtures were subjected to accelerated aging test procedure described in WT-2 2014 guide [17]. The following determinations were conducted in order to assess the performance properties of the analysed asphalt mixtures:

Table 2. Production temperatures of AC 16P asphalt concrete mixtures containing different binders
 Tablica 2. Zestawienie temperatury podczas wytwarzania betonu asfaltowego AC 16P z zastosowaniem różnych lepiszczy

Type of binder added to AC 16P Rodzaj lepiszcza dodanego do AC 16P	Mixing temperatures [°C] Temperatura mieszania	Range of effective compaction temperature [°C] Zakres temperatury efektywnego zagęszczania [°C]
50/70	150	95 - 115
PMB 25/55-60	165	110 - 130
50/70+5% SBS+10% UR	140	90 - 120

- Oznaczenie odporności MMA na działanie wody ITSR (oznaczenia wg Załącznika 1 WT-2 2014 [17]); metoda badania: wytrzymałości na rozciąganie pośrednie pod obciążeniem statycznym (ITS), temp. 25°C (PN-EN 12697-23).
- Badania modułu sztywności IT-CY w temperaturach 5°C, 15°C, 25°C (PN-EN 12697-26 - załącznik C). Parametry badania: próbki o śr. 100 mm, obciążenie impulsowe, czas przyrostu obciążenia 120±4 m/s, czas trwania jednego cyklu 3 s, odkształcenie poziome 5 µm, test w dwóch prostopadłych płaszczyznach, wynik badania to średnia z 5 impulsów obciążenia.
- Badania modułu sztywności na próbkach pryzmatycznych (4PB-PR) w temperaturze 10°C (PN-EN 12697-26 – załącznik B). Parametry badania: kształt fali obciążeniowej haversine $[1/2x(1-\cos x)] \cdot \cos x$, poziom odkształcenia 50 µm/m, częstotliwość 10 Hz, moduł sztywności S_{50} wyznaczano w 100 cyklu badania.
- Badania trwałości zmęczeniowej na próbkach pryzmatycznych (4PB-PR) w temperaturze 10°C (PN-EN 12697-24). Parametry badania: poziomy odkształcenia 130, 170, 200, (300, 400 – UR) µm/m, częstotliwość 10 Hz. Początkowy moduł sztywności S_0 określono w 100 cyklu badania. Za kryterium zmęczenia przyjęto stan wyteżenia próbki, gdy jej moduł sztywności osiągnie wartość 50% (S_0 – szkoda zmęczeniowa $D = 100\%$).
- Water sensitivity – expressed by ITSR (determined according to Appendix 1 to WT-2 2014 [17]), test method: static indirect tensile strength (ITS) test at 25°C according to EN 12697-23).
- Stiffness modulus with tension test on cylindrical specimens (IT-CY) at 5°C, 15°C, 25°C (EN 12697-26 – Appendix C). Test parameters: 100 mm dia. cylindrical specimens, load applied in pulses, load increase time 120±msec, 3 sec. cycle duration, 5 µm horizontal strain, load applied in two perpendicular planes, result calculated as a mean of five load applications.
- Stiffness modulus on prismatic specimens (4PB-PR) at 10°C (EN 12697-26 – Appendix B). Test parameters: haversine loading waveform $[1/2x(1-\cos x)] \cdot \cos x$, 50 µm/m strain level, 10 Hz frequency, S_{50} stiffness modulus determined in the 100th test cycle.
- Fatigue life on prismatic specimens (4PB-PR) at 10°C (EN 12697-24). Test parameters: strain levels of 130, 170, 200, (300, 400 – UR) µm/m, 10 Hz frequency. The initial stiffness modulus S_0 was determined in the 100th test cycle. The adopted fatigue criterion was the level of strength utilisation at which the stiffness modulus reaches 50% (S_0 – fatigue damage of $D = 100\%$).

4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ MIESZANEK AC 16P

4.1. ODPORNOŚĆ MIESZANEK MMA NA DZIAŁANIE WODY WYRAŻONA WSKAŹNIKIEM ITSR

Na Rys. 4 przedstawiono wyniki badań odporności analizowanych mieszanek AC 16P na działanie wody przy uwzględnieniu cyklu ich zamrażania (wskaźnik ITSR). Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że mieszanki zawierające elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza roślinnego (AC 16P SBS+UR) charakteryzują się najwyższą odpornością na działanie wody pod warunkiem uwzględnienia

4. ANALYSIS OF TEST RESULTS OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES AC 16P

4.1. WATER RESISTANCE OF MMA MIXTURES EXPRESSED BY THE ITSR INDEX

Fig. 4 presents the results of water sensitivity of AC 16P expressed by ITSR obtained in the test including a freeze-thaw cycle. The test results have demonstrated that asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with a bio-fluxing agent (AC 16P SBS+UR) feature the greatest resistance to the action of water in the test including a freeze-thaw cycle (ITSR of 101% with 70% being the minimum required by the WT-2 guide). Hence, addition of a bio-fluxing agent can be

ich cyklu zamrażania (uzyskano wskaźnik ITSR 101%, przy czym wymagana wartość min. to 70% wg WT-2)[17]. Można zatem przewidywać, że lepszycze z dodatkiem upłynniacza zastosowane do produkcji MMA nadaje mieszance bardzo dobrą odporność na czynniki atmosferyczne takie jak działanie niskich temperatur czy na wpływ wody.

4.2. MODUŁ SZTYWNOŚCI MIESZANEK AC 16P W BADANIU IT-CY ORAZ 4PB-PR

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki zmian wartości modułów sztywności w zależności od temperatury otrzymane w przypadku analizowanych mieszank mineralno-asfaltowych podczas badania IT-CY. Na podstawie przeprowadzonego badania IT-CY mieszank AC 16P różniącymi się pod względem rodzaju zastosowanego lepiszcza, i uzyskanych w nim wartości modułów sztywności w zależności od zastosowanej temperatury można stwierdzić, że mieszanki zawierające elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza roślinnego (AC 16P SBS+UR) charakteryzują się najlepszą odpornością na zmiany temperatury (mały kąt nachylenia linii trendu w stosunku do osi rzędnych). Należy jednak zaznaczyć, że najniższymi wartościami modułów sztywności charakteryzują się spośród badanych mieszanki AC 16P z upłynnionym elastomeroasfalem (SBS+UR). Parametr ten istotny jest podczas mechanicznego projektowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowych. Najniższe wartości modułów sztywności osiągnięte dla mieszanki AC 16P z upłynnionym elastomeroasfalem potwierdzają także przedstawione na Rys. 6 uśrednione wyniki badań sztywności S_{50} uzyskane w teście 4PB-PR. w temperaturze 10°C.

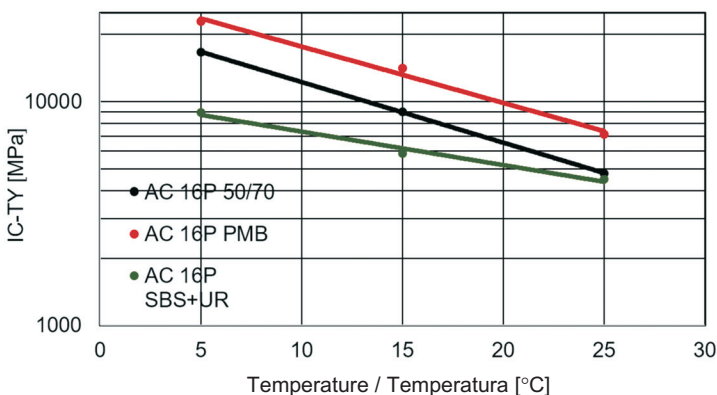


Fig. 5. Results of the value changes of stiffness modulus as a temperature function in IT-CY tests of AC 16P asphalt concrete with different binders

Rys. 5. Zmiany wartości modułów sztywności w zależności od temperatury w badaniach IT-CY mieszank AC 16P różniącymi się pod względem rodzaju zastosowanego lepiszcza

can be expected to have a very good effect on the resistance of asphalt mixture to environmental factors, such as low temperatures and action of water.

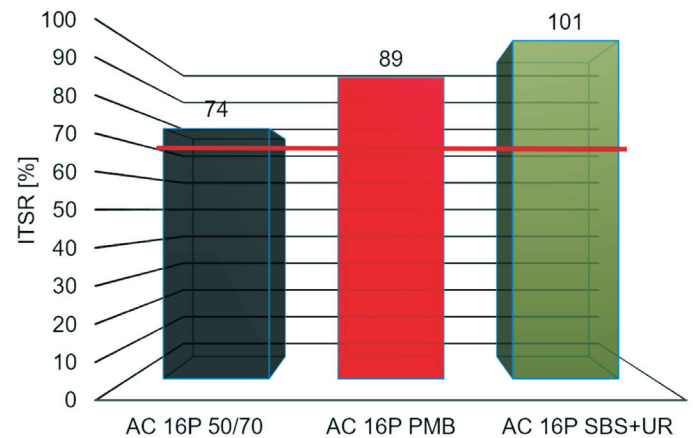


Fig. 4. Water resistance tests, expressed by ITSR ratio, of AC 16P asphalt concrete with different binders: asphalt 50/70, polymer modified binder (PMB) and polymer modified binder with addition of fluidizers of vegetable origin (SBS+UR)

Rys. 4. Odporność na działanie wody, wyrażona wskaźnikiem ITSR, mieszank AC 16P różniącymi się pod względem zastosowanego lepiszcza asfaltowego: 50/70, elastomeroasfaltu (PMB) i elastomeroasfaltu upłynnionego (SBS+UR)

4.2. STIFFNESS MODULUS OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES AC 16P IN IT-CY AND 4PB-PR TESTS

Fig. 5 presents variation of stiffness modulus values depending on the temperature obtained for the analysed asphalt mixtures in the IT-CY test. The IT-CY tests performed on asphalt concrete mixtures AC 16P containing different binders and the obtained values of stiffness modulus depending on the test temperature allow us to conclude that asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with a bio-fluxing agent (AC 16P SBS+UR) feature the best resistance to temperature changes (small inclination angle of the trend line in relation to the y -axis). This parameter is relevant to fatigue life calculations in mechanistic design of asphalt road pavements. The lowest values of stiffness modulus of AC 16P mixture with fluidized elastomer-bitumen also confirm presented on Fig. 6 averaged results of stiffness testing S_{50} obtained in test 4PB-PR at the temperature of 10°C.

4.3. ODPORNOŚCI NA ZMĘCZENIE MIESZANEK AC 16P OZNACZONYCH W BADANIACH 4PB-PR

Na Rys. 7 przedstawiono wyniki odporności na zmęczenie uzyskane w przypadku wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych oznaczonych w badaniu 4PB-PR w temperaturze 10°C. Na podstawie otrzymanych rezultatów badań dowiedziono, że mieszanki mineralno-asfaltowe z zastosowaniem elastomeroasfaltu upłynnionego olejem roślinnym charakteryzują się wyższą wytrzymałością zmęczeniową w stosunku do pozostałych badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Stwierdzono, że użyte lepiszcze elastomeroasfaltowe z upłynniaczem pochodzenia roślinnego nadaje mieszance mineralno-asfaltowej bardzo wysoką odporność zmęczeniową. Nie udało się natomiast oznaczyć trwałości zmęczeniowej przy poziomach odkształceń powyżej 200 $\mu\text{m/m}$ w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych AC16P z produkowanymi przemysłowo asfaltami 50/70 i PMB 25/55-60, gdyż próbki betonu asfaltowego po kilku (lub kilkunastu) sekundach badania ulegały zniszczeniu.

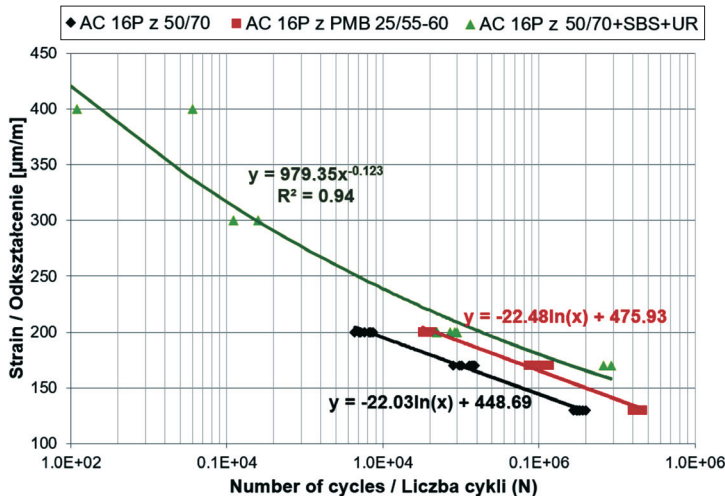


Fig. 7. Fatigue life tests of asphalt concrete mixtures AC 16P determined through 4PB-PR tests at a temperature of 10°C
Rys. 7. Trwałość zmęczeniowa mieszanek AC 16P oznaczona w badaniach 4PB-PR w temperaturze 10°C

Zastosowanie w mieszankach mineralno-asfaltowych elastomeroasfaltów z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego prowadzi do zwiększenia ich trwałości zmęczeniowej. W stosunku do mieszanek mineralno-asfaltowych opartych na bazie konwencjonalnych asfaltów, trwałość zmęczeniowa MMA z użytym jako lepiszcze upłynnionym elastomeroasfaltem jest wyższa (w zależności od poziomu odkształcenia) o około 50%-80% w odniesieniu do MMA z zawartym PMB 25/55-60 i 3-4 krotnie wyższa od trwałości zmęczeniowej

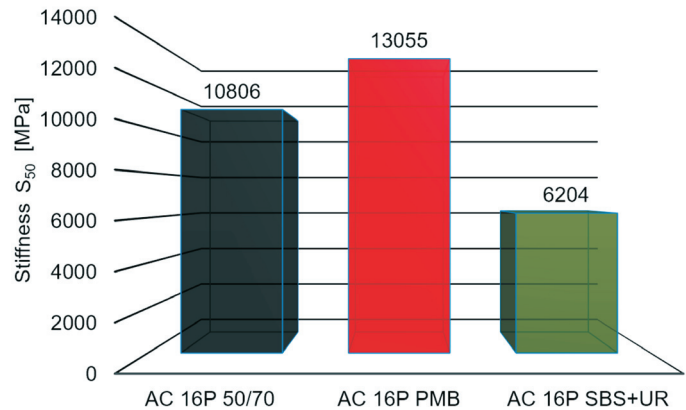


Fig. 6. Midpoint values of stiffness S_{50} achieved through 4PB-PR tests at a temperature of 10°C

Rys. 6. Średnie wartości sztywności mieszanek S_{50} uzyskane w badaniu 4PB-PR w temperaturze 10°C

4.3. FATIGUE LIFE OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES AC 16P DETERMINED THROUGH 4PB-PR TESTS

Fig. 7 presents fatigue life values obtained for the selected asphalt mixtures, determined in the 4PB-PR test at 10°C. The test results show that asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with bio-fluxing agent outperform the other tested asphalt mixtures in terms of fatigue life. Thus, it is concluded that elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agent give the mixture a very good fatigue performance. However, it was not possible to determine the fatigue life of AC 16P mixtures containing commercial bitumens 50/70 and PMB 25/55-60 at the strains above 200 $\mu\text{m/m}$, this because the specimens failed after a few (or dozen plus) seconds of testing.

Use of elastomer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agents increases the fatigue life of the produced asphalt mixtures. In terms of fatigue life asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agent outperform asphalt mixtures containing other binders by 50%-80% (depending on the level of strain) – in the case of PMB 25/55-60 and by 3-4 times – in the case of 50/70 pure pen grade bitumen.

The very good fatigue life of asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agents allows us to recommend the analysed asphalt concrete mixture AC 16P as a material of choice for:

- reflective crack relief interlayer laid directly on damaged asphalt surfaces as part of repaving works,

mieszanek, w których zastosowano jako środek wiążący niemodyfikowany asfalt drogowy 50/70.

Potwierdzona w badaniach bardzo wysoka odporność zmęczeniowa mieszanki mineralno-asfaltowej z zastosowaniem jako lepiszcze elastomeroasfaltu z dodatkiem upłynniacza pochodzenia roślinnego pozwala na postawienie tezy, że analizowana mieszanka AC 16P może być bardzo dobrym rozwiązaniem do zastosowania jako:

- warstwa przeciwspekaniowa układana bezpośrednio na zniszczone warstwy asfaltowe w przypadku remontowanych nawierzchni drogowych,
- warstwa przeciwspekaniowa układana bezpośrednio na podbudowach zbudowanych z mieszanek kruszyw związanych cementem w przypadku nawierzchni półsztywnych,
- warstwa poślizgowa pod górne warstwy z betonu cementowego w przypadku nawierzchni sztywnych lub jako warstwa wyrównawcza układana bezpośrednio na spękane nawierzchnie drogowe.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz właściwości technicznych mieszanek mineralno-asfaltowych, których jako lepiszcze wykorzystano asfalt modyfikowany kopolimerem SBS z dodatkiem upłynniacza pochodzenia roślinnego ustalono następujące wnioski:

- 1) Zastosowanie w mieszankach mineralno-asfaltowych elastomeroasfaltów z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego prowadzi do zwiększenia ich trwałości zmęczeniowej. W odniesieniu do mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem konwencjonalnych asfaltów trwałość zmęczeniowa MMA z upłynnionym elastomeroasfaltem jest wyższa o około 50%-80% (w zależności od poziomu odkształcenia) w odniesieniu do MMA z PMB 25/55-60 i 3÷4 krotnie wyższa w odniesieniu do MMA z zastosowaniem asfaltu drogowego 50/70.
- 2) Uzyskana w badaniach wysoka odporność zmęczeniowa mieszanki mineralno-asfaltowej z zastosowaniem jako lepiszcza elastomeroasfaltu z dodatkiem upłynniacza pochodzenia roślinnego pozwala wnioskować, że analizowana mieszanka AC 16P jest bardzo dobrym rozwiązaniem do zastosowania jako:
 - warstwa przeciwspekaniowa układana bezpośrednio na zniszczone warstwy asfaltowe remontowanych nawierzchni drogowych,
 - warstwa przeciwspekaniowa układana bezpośrednio na podbudowach z mieszanek kruszyw związanych cementem w przypadku nawierzchni półsztywnych,
 - warstwa poślizgowa pod górne warstwy z betonu cementowego w przypadku nawierzchni

- reflective crack relief interlayer laid on cement bound road base of semi-rigid pavement structures,
- separating layer laid under PCC surface layers of rigid pavements or a regulating course laid directly on cracked pavement surfaces.

5. CONCLUSIONS

The tests and analyses of the performance properties of asphalt mixtures containing SBS modified bitumen fluxed with bio-fluxing agent allow us to conclude that:

- 1) Use of elastomer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agents increases the fatigue life of the produced asphalt mixtures. In terms of fatigue life asphalt mixtures containing fluxed elastomeric polymer-modified bitumen outperform mixtures containing other binders by ca. 50%-80% (depending on the level of strain) – in the case of PMB 25/55-60 bitumen and by 3-4 times in the case of pure pen grade bitumen 50/70.
- 2) The very good fatigue life of asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agent allows us to recommend the analysed asphalt concrete mixture AC 16P as a material of choice for:
 - reflective crack relief interlayer laid directly on damaged asphalt surfaces as part of repaving works,
 - reflective crack relief interlayer laid on cement bound road base of semi-rigid pavement structures,
 - separating layer laid under PCC surface layers of rigid pavements or a regulating course laid directly on cracked pavement surfaces.
- 3) The IT-CY tests to determine stiffness modules of asphalt mixtures at different test temperatures showed that asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with bio-fluxing agent outperform mixtures containing commercial binders in terms of sensitivity to the action of water.
- 4) The tests of water sensitivity of asphalt mixtures including freeze-thaw cycle expressed by ITSR confirmed the best performance of asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumen fluxed with bio-fluxing agent. Hence, it can be stated that fluxed binders substantially improve the resistance of the asphalt mixture to environmental factors, including action of water from precipitation and low temperatures.
- 5) However, asphalt mixtures containing elastomeric polymer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing additive featured lower stiffness over the entire temperature

sztynnych lub jako warstwa wyrównawcza układana bezpośrednio na spękane nawierzchnie drogowe.

- 3) Badania IT-CY modułów sztywności mieszanek w różnych wartościach temperatury wykazały, że mieszanka mineralno-asfaltowa zawierająca jako środek wiążący elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza pochodzenia roślinnego charakteryzuje się najniższą wrażliwością na zmiany temperatury w stosunku do mieszanek mineralno-asfaltowych, w których zastosowano lepiszcza produkowane w skali przemysłowej.
- 4) Badania odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody przy uwzględnieniu cyklu zamrażania (wskaźnik ITR) potwierdziły, że spośród analizowanych mieszanki zawierające elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza roślinnego charakteryzowały się najwyższą odpornością na jej działanie. Można zatem stwierdzić, że lepiszcze z dodatkiem upłynniacza nadaje mieszance wysoką odporność na czynniki atmosferyczne takie jak opady i działanie niskich wartości temperatury.
- 5) MMA zawierająca elastomeroasfalt z dodatkiem upłynniacza pochodzenia roślinnego miała jednak w całym zakresie rozpatrywanych wartości temperatury zawsze mniejszą sztywność w porównaniu z mieszankami wykonanymi z zastosowaniem jako lepiszcza elastomeroasfaltu i asfaltu 50/70. Wyniki takie uzyskano zarówno w oznaczeniach metodą rozciągania pośredniego IT-CY jak i w oznaczeniu metodą 4PB-PR.
- 6) Zastosowanie w mieszankach mineralno-asfaltowych elastomeroasfaltów z dodatkiem upłynniaczy pochodzenia roślinnego umożliwia wytwarzanie mieszanek mineralno-asfaltowych w temperaturze technologicznej nie przekraczającej 150°C. Pozwala to na znaczne obniżenie kosztów produkcji MMA oraz zmniejsza emisję substancji szkodliwych do środowiska. Ponadto upłynniacze pochodzenia roślinnego są produktami pochodzącymi z tzw. „odnawialnych źródeł”.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego nr S/WBIŚ/1/2015 realizowanego na Politechnice Białostockiej i sfinansowanego ze środków na naukę MNiSW.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] *Sybilski D., Miarki K.*: Dobór nawierzchni do asfaltu w polskich warunkach klimatycznych z uwzględnieniem procedur SHRP/Superpave. VI Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2000, tom I, 213

range than mixtures containing non-fluxed elastomeric polymer-modified bitumens and pure bitumen 50/70. Such results were obtained in both IT-CY and 4PB-PR tests.

- 6) Use of elastomer-modified bitumens fluxed with bio-fluxing agents enables lowering the production temperature of asphalt mixtures to 150°C. This brings considerable cost benefits during production and reduces pollution of environment with harmful emissions. Finally, it is worthwhile noting that bio-fluxing agents are products obtained from so-called renewable sources.

ACKNOWLEDGEMENT

The tests have been carried out as a part of research works No. S/WBIŚ/1/2015 carried out in the Białystok Technical University, and financed from science means of the Ministry of Science and Higher Education.

- [2] *Sybilski D.*: Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce. *Studia i materiały*, zeszyt 50, IBDiM, Warszawa 2000
- [3] *Radziszewki P., Pilat J., Król J., Kowalski K., Sarnowski M.*: Weryfikacja wymagań i metod oceny właściwości lepkosprężystych krajowych asfaltów i asfaltów modyfikowanych. GDDKiA, Warszawa 2011
- [4] *Pszczola M., D. 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
- [5] *Plewa A., Belyaev P.S., Andrianov K.A., Zubkov A F., Frolov V.A.*: The Effect of Modifying Additives on the Consistency and Properties of Bitumen Binders. *Advanced Materials and Technologies (Russia)*, No. 4, 2016, 35-40
- [6] *Słowik M., Bartkowiak M.*: Review of analytical-empirical methods for determining stiffness moduli of asphalt mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 5-22, DOI: 10.7409/rabdim.018.001
- [7] *Gajewski M., Horodecka R.*: Rheological properties of road bitumens modified by natural asphalt. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 93-109, DOI: 10.7409/rabdim.018.006
- [8] *Wu S., Zhang W., Shen S., Li X., Muhunthan B., Mohammad L.N.*: Field-aged asphalt binder performance evaluation for Evotherm warm mix asphalt: Comparisons with hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, **156**, 2017, 574-583

- [9] *Niczke Ł., Czechowski F., Gawel I.*: Oxidized rapeseed oil methyl ester as a bitumen flux: Structural changes in the ester during catalytic oxidation. *Progress in Organic Coatings*, **59**, 4, 2007, 304-311
- [10] *DeLong W.M.*: Asphalt release agent. The Chemmark Corporation, Patent (USA) US5494502 A, (Germany) DE69528278 D1, 27 February 1996
- [11] *Gawel I., Pilat J., Radziszewski P., Niczke Ł., Król J., Sarnowski M.*: Bitumen fluxes of vegetable origin. *Poli-mery*, **LV**, 1, 2010, 55-60
- [12] *Bailey H.K., Zoorob S.E.*: The use of vegetable oil in asphalt mixtures, in the laboratory and field. The 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul, [https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=676%2520\(2012\),](https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=676%2520(2012),) (09.09.2017)
- [13] *Plewa A.*: Wpływ ilości dodatku kopolimeru SBS i upłynniacza pochodzenia roślinnego na właściwości techniczne elastomeroasfaltów. *Drogownictwo*, **11**, 2017, 375-378
- [14] *Król J.B., Niczke Ł., Kowalski K.J.*: Towards understanding polymerization process in bitumen bio-fluxes. *Materials*, **10**, 9, 2017, DOI: 10.3390/ma10091058
- [15] *Dhasmana H., Ozer H., Al-Qadi I.L., Zhang Y., Schideman L., Sharma B.K., Chen W., Minarick M.J., Zhang P.*: Rheological and chemical characterization of biobinders from different biomass resources. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2505**, 1, 2015, 121-129
- [16] *Kowalski K.J., Król J.B., Bańkowski W., Radziszewski P., Sarnowski M.*: Thermal and fatigue evaluation of asphalt mixtures containing RAP treated with a bio-agent. *Applied Sciences*, **7**, 3, 2017, 216, Special issue: Advanced Asphalt Materials and Paving Technologies, DOI: 10.3390/app7030216
- [17] Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, WT-2 2014, część I: Mieszanki mineralno-asfaltowe, Wymagania techniczne. GDDKiA, Załącznik do Zarządzenia nr 54 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 18.11.2014 r.