



WOJCIECH BAŃKOWSKI<sup>1)</sup>

RENATA HORODECKA<sup>2)</sup>

MARCIN GAJEWSKI<sup>3)</sup>

KRZYSZTOF MIRSKI<sup>4)</sup>

## THE EXTENDED ASSESSMENT OF WARM MIX ASPHALTS DURABILITY

## ROZSZERZONA OCENA TRWAŁOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH NA CIEPŁO

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiano wyniki badań przeprowadzonych na mieszankach mineralno-asfaltowych wykonanych z zastosowaniem asfaltów WMA oraz standardowych asfaltów drogowych i modyfikowanych. Na mieszankach AC 16 i SMA 8 przeprowadzono badania zagęszczalności (w prasie żyrotorowej i zagęszczarce walcowej PBS), wodoodporności, odporności na zmęczenie, odporności na pękanie niskotemperaturowe (metodą TSRST), badania modułu zespolonego w szerokim zakresie częstotliwości oraz odporności na propagację pęknięcia w aparacie SCB. Uwzględniono również wpływ starzenia technologicznego i eksploatacyjnego. Wszystkie badania zostały przeprowadzone na próbkach referencyjnych oraz próbkach z asfaltami WMA, które zagęszczano w temperaturze niższej odpowiednio o 20°C i 40°C od standardowej temperatury zagęszczania dla danej mieszanki. Wykazano, że jest możliwe obniżenie temperatury zagęszczania o 20°C bez obniżenia parametrów mieszanki, a w przypadku obniżenia temperatury o 40°C również większość wymagań została spełniona. Przeprowadzone badania potwierdziły w szerokim zakresie dobre właściwości funkcjonalne mieszank na ciepło.

**SŁOWA KLUCZOWE:** badania funkcjonalne, mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło, obniżanie temperatur technologicznych, trwałość, WMA.

**ABSTRACT.** The present paper outlines the results of tests performed on bituminous mixtures made by applying WMA, typical and modified bitumens. The mixtures AC 16 and SMA 8 were tested in respect to the compactibility (in a gyratory press and PBS cylinder compactor), water resistance, fatigue resistance, resistance to low-temperature cracking (through the TSRST method), complex modulus in a broad scope of frequencies, and crack propagation in the SCB apparatus. The impact of the technological and long-term ageing was taken into account. All tests were performed on the reference specimens and the specimens with WMA bitumens compacted at the temperature lower than the standard compaction temperature for a given mixture by 20°C and 40°C respectively. It has been proved that reducing the compaction temperature by 20°C is possible without deteriorating the mixture parameters. Moreover, in case of reducing that temperature by 40°C the majority of requirements have been met as well. The tests have confirmed in broad scope good functional characteristics of warm mix asphalts.

**KEYWORDS:** durability, functional tests, technological temperature lowering, warm mix asphalts, WMA.

DOI: 10.7409/rabdim.016.010

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

<sup>2)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; rhorodecka@ibdim.edu.pl

<sup>3)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgajewski@ibdim.edu.pl

<sup>4)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; kmirski@ibdim.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło (ang. *Warm Mix Asphalt*, WMA) to technologia znana na świecie i w Polsce [1-4], w ostatnich latach jest coraz częściej stosowana. Stanowi technologię pośrednią pomiędzy mieszankami na gorąco, w których obniżenie lepkości asfaltu (upłynnienie) jest uzyskiwane przez wysoką temperaturę (w zależności od rodzaju asfaltu wynosi ona od 150°C do 195°C, a w przypadku mieszanki typu asfalt lany może dochodzić nawet 230°C [1]) a mieszankami na zimno, w przypadku których efekt ten uzyskiwany jest przez wytworzenie emulsji asfaltowej. Podstawowym wymogiem wobec mieszanek WMA jest zachowanie właściwości i zalet mieszanek produkowanych w technologii na gorąco. W związku z tym pierwszą korzyścią z ich stosowania jest obniżenie temperatury produkcji o co najmniej 30°C. Dzięki temu uzyskuje się oszczędności w zużyciu energii [2]. Korzystne są również efekty środowiskowe z uwagi na zmniejszoną emisję gazów cieplarnianych i oparów na poziomie około 20% [5]. Niższa temperatura i mniej intensywne emisje oparów wpływają na lepszy komfort pracy robotników drogowych i zmniejszają chwilową uciążliwość dla ludzi przebywających w pobliżu robót drogowych [6]. Drugą korzyść to lepsza urabialność i zagęszczalność przy wbudowaniu mieszanki. Mieszanka mineralno-asfaltowa na ciepło będzie łatwiej się rozkładać i zagęszczać niż mieszanka na gorąco w tej samej temperaturze, szczególnie gdy jest ona niższa niż optymalna temperatura zagęszczania. Mieszanki na ciepło mogą być więc stosowane w mniej korzystnych warunkach atmosferycznych, gdy następuje szybsze ich ochładzanie. Dzięki temu możliwe jest wydłużenie sezonu prowadzenia robót nawierzchniowych oraz zwiększenie odległości transportu mieszanki mineralno-asfaltowej z wytwórni do miejsca jej wbudowania. Mieszanki na ciepło mogą być również stosowane w warunkach, gdy wymagany czas wykonania robót jest bardzo ograniczony, np. na lotniskach. Niższe temperatury technologiczne oznaczają krótszy czas potrzebny do ostygnięcia nawierzchni przed oddaniem do ruchu. Za przykład może posłużyć przebudowa nawierzchni na lotnisku we Frankfurcie w roku 2005, podczas której na wymianę poszczególnych odcinków nawierzchni pasa startowego wystarczyło zaledwie 7,5 godziny [7]. Stosowanie technologii „na ciepło” jest również wykorzystywane przy produkcji MMA z dodatkiem destruktu [8, 9].

Na rynku polskim dostępne są różne technologie i dodatki do mieszanek na ciepło [10], prowadzone były również na ten temat prace badawcze [11, 12]. Ostatnią nowością na polskim rynku są asfalty drogowe, które umożliwiają produkcję

## 1. INTRODUCTION

Warm mix asphalts (WMA) constitute a technology well-known all over the world including Poland [1-4], and recently more and more frequently applied. It makes a connection between hot mixes in which lowering bitumen viscosity (fluxing) is obtained through high temperature (depending on a type of bitumen it is in a range from 150°C up to 195°C, and in case of mastic asphalt mixture it can amount even to 230°C [1]), and coarse cold asphalts, in which that effect is produced through generating bitumen emulsion. The precondition for WMA mixtures is preserving properties and qualities of mixtures made according to the hot mix technology. Consequently, the first benefit of their application is lowering a manufacturing temperature by at least 30°C. Owing to that the energy consumption can be reduced [2]. Environmental effects are also beneficial because of the lowered emission of greenhouse gasses and vapours on a level at circa 20% [5]. The lower temperature and less intensive emission of vapours has a positive influence on working conditions of road workers and reduce the momentary nuisance for people staying in the vicinity of road works [6]. The better workability and compactibility at placing mixtures constitute other benefits. Warm mix asphalt will be easier to place and compact than hot mix asphalt at the same temperature, especially when it is lower than the optimal compacting temperature. Consequently, warm mix asphalts can be applied in less advantageous weather conditions when they cool down faster. Owing to that the extension of road work season and transport distances of bituminous mixtures from mixing plants to placement sites is possible. Warm mix asphalts can be also used in conditions when the operation time is very limited, e.g. on airfields. Lower technological temperature denotes shorter time of cooling down the pavements before putting them into operation. The reconstruction of airfield pavements in Frankfurt in 2005, when only 7.5 hrs. was enough to replace individual airstrip stretches, can be used as an example [7]. The application of a “warm technology” is also used in the production of bituminous mixtures with an additive of post-destruction materials [8, 9].

Various technologies and additives to warm mix asphalts [10] are available on the Polish market. Moreover, research [11, 12] on that subject has been conducted as well. The latest novelty on the Polish market are road bitumens enabling the production and placement of bitumen mixtures in the “warm technology” [13, 14] with no necessity of applying the additives.

i wbudowanie mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii na ciepło [13, 14] bez konieczności stosowania dodatków. Są to asfalty rodzaju: 20/30, 35/50 i 50/70, a więc klasyfikowane jako podstawowe asfalty drogowe „zwykle” według normy PN-EN 12591. Wymagany efekt osiągany jest dzięki wprowadzeniu do asfaltu specjalnych substancji chemicznych, które poprawiają efektywność mieszania i urabialność przez zmniejszenie napięcia powierzchniowego na granicy asfalt-kruszywo. Asfalty WMA charakteryzują się lepszą przyczepnością do kruszywa w stosunku do asfaltów zwykłych, co jest szczególnie widoczne w przypadku skał kwaśnych, takich jak granit. Wyniki badań wodoodporności powiązanych z adhezją wskazują, że w przypadku niektórych skał można nawet zrezygnować ze stosowania dodatkowych środków adhezyjnych. Temperatury technologiczne z asfaltami WMA mogą zostać obniżone o 30°C. Dodatkowo przeprowadzone badania wykazały, że możliwe jest efektywne zastosowanie tych asfaltów w produkcji mieszanek z użyciem destruktu (granulatu) pochodzącego z recyklingu nawierzchni asfaltowej nawet w ilości do 50%. Jest to wynikiem dobrej urabialności oraz obniżenia temperatur technologicznych.

## 2. CEL I PROGRAM BADAŃ

Przedmiotem badań są asfalty przeznaczone do mieszanek mineralno-asfaltowych na ciepło, oznaczone dalej symbolem WMA. Do badań wytypowano asfalt 35/50 WMA i 45/80-55 WMA produkcji LOTOS Asphalt oraz odpowiadające im asfalty 35/50 i 45/80-55 tego samego producenta. Badania przeprowadzone zostały na mieszankach mineralno-asfaltowych typu SMA 8 i AC 16 P, a ich celem było określenie wpływu stosowania obniżonych temperatur technologicznych (produkcji i wbudowania) na trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych, tj. odporność na pękanie i trwałość zmęczeniową. W zakresie badań MMA uwzględniono badania właściwości funkcjonalnych po starzeniu technologicznym (krótkoterminowym) i eksploatacyjnym (długoterminowym). Przeprowadzono również badania zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych, które służyły do weryfikacji temperatur technologicznych. Próbki do badań zagęszczane były w zróżnicowanej temperaturze: mieszanki z asfaltami konwencjonalnymi w typowej temperaturze zagęszczenia, natomiast mieszanki z asfaltami WMA w temperaturze obniżonej o 20°C i 40°C. W Tabl. 1 przedstawiono warianty mieszanek z uwzględnieniem stanu starzenia, temperatury zagęszczenia oraz rodzaju asfaltu. Wartości od 100 do 145 oznaczają temperaturę zagęszczania, litery O, S i L stany starzenia (wyjaśnienie symboli

They are road bitumens of types: 20/30, 35/50 and 50/70. Therefore, they are classified as basic “usual” road bitumens according to the PN-EN 12591 standard. The required effect is assessed owing to the introduction of special chemical compounds improving the mixing effectiveness and workability through reducing the surface tension on bitumen-aggregate boundary. WMA bitumens are distinguished by better adhesion to aggregate in relation to ordinary bitumens what is especially noticeable in case of acid rocks, such as granite. The test results of water resistance related to adhesion indicate that in case of some rocks the application of additional adhesive agents is not necessary. Technological temperature with the WMA bitumens can be reduced by 30°C. Additionally, the performed tests proved that the effective application of those bitumens at production of mixtures with the use of post-destruction materials coming from recycling of bitumen pavements is possible even in volumes up to 50%. It is the consequence of good workability and reduction of technological temperature.

## 2. THE AIM AND PROGRAMME OF RESEARCH

The subject of testing are bitumens dedicated to warm mix asphalts, subsequently marked with a WMA symbol. 35/50 WMA and 45/80-55 WMA mix asphalts and corresponding to them 35/50 and 45/80-55 mix asphalts made by LOTOS Asphalt were chosen for testing. Tests were carried out on bituminous mixtures of SMA 8 and AC 16 types with the aim of determining the influence of lowered technological temperature application (production and placement) on durability of bituminous mixtures, i.e. the crack resistance and fatigue durability. Testing the functional properties after technological (short-term) and operational (long-term) ageing were taken into account within the scope of bituminous mixtures. Tests of compactibility of bitumen mixtures used for the verification of technological temperature were performed. Test specimens were compacted at diversified temperature: mixtures with conventional bitumens at a typical compacting temperature, while mixtures with WMA bitumens at temperature lowered by 20°C and 40°C. Table 1 presents mixture variants taking into account ageing states, compaction temperature and bitumen types. Values from 100 to 145 denote compaction temperature, letters O, S, and L refer to ageing states (the symbols explanations in the table), while the letter W stands for the application of WMA bitumen.

w tablicy), natomiast litera W oznacza zastosowanie asfaltu WMA.

Table 1. The adopted marking of bituminous specimens  
Tablica 1. Przyjęte oznakowanie próbek MMA

Ageing state / Stan starzenia	Marking of bituminous specimens / Oznakowanie próbek z MMA	
	AC 16 P 35/50	SMA 8 45/80-55
In the original state (O) / W stanie oryginalnym (O)	AC16/O/140	S8/O/145
	AC16/O/120W	S8/O/125W
	AC16/O/100W	S8/O/105W
After STOA (S) (short-term - technological ageing) Po STOA (S) (starzenie krótkoterminowe - technologiczne)	AC16/S/140	S8/S/145
	AC16/S/120W	S8/S/125W
	AC16/S/100W	S8/S/105W
After LTOA (L) (long-term - operational ageing) Po LTOA (L) (starzenie długoterminowe - eksploatacyjne)	AC16/L/140	S8/L/145
	AC16/L/120W	S8/L/125W
	AC16/L/100W	S8/L/105W

### 3. BADANE MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE

Badania przeprowadzono na mieszankach mineralno-asfaltowych zaprojektowanych zgodnie z wymaganiami WT-2 2014 [15] dla ruchu KR5-7, tj. SMA 8 45/80-55 oraz AC 16 P 35/50. Wyniki podstawowych właściwości w odniesieniu do wymagań przedstawiono w Tabl. 2. W składzie mieszanki SMA zastosowano kruszywa ze skały gabra, natomiast w betonie asfaltowym użyto kruszywo wapienne.

### 3. BITUMINOUS MIXTURES SUBJECTED TO TESTING

Tests were carried out on bituminous mixtures designed in accordance with the WT-2 2014 [15] requirements for the heavy traffic category KR5-7, i.e. SMA 8 45/80-55 and AC 16 P 35/50. Results of the basic characteristics with the reference to requirements are presented in Table 2. Aggregates of gabra rock were applied in the composition of SMA mixtures, whereas calcareous aggregate was used for asphaltic concrete.

Table 2. Compositions of aggregate mixes (MM) and bituminous mixtures (MMA)  
Tablica 2. Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

Characteristics Właściwości	SMA 8 45/80-55	Requirements acc. to WT-2:2014 SMA8 Wymagania wg WT-2:2014 SMA8 KR 5-7	AC 16 P 35/50	Requirements acc. to WT-2:2014 SMA8 Wymagania wg WT-2:2014 SMA8 KR 5-7
Density of bituminous mixture Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm <sup>3</sup> ]	2.601	–	2.501	–
Volume density of bituminous mixture Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm <sup>3</sup> ]	2.530	–	2.359	–
Content of voids in mineral aggregate VMA Zawartość wolnych przestrzeni [% v/v]	2.7	$V_{\min}^{2.0}$ $V_{\max}^{3.5}$	5.7	$V_{\min}^{4.0}$ $V_{\max}^{7.0}$
Bitumen contents Zawartość asfaltu [% m/m]	7.3	7.2	4.7	4.2
Water resistance, storing at 40°C with one freezing cycle, testing at 25°C Odporność na działanie wody, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 25°C	105.4	90	88.3	70

## 4. OCENA ZAGĘSZCZALNOŚCI

Zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych została sprawdzona w warunkach laboratoryjnych podczas kilku etapów. W pierwszym etapie wykonano serie badań w ubijaku Marshalla jako podstawowej metody podczas projektowania składu i oceny właściwości fizycznych. Wyniki te przedstawiono na Rys. 1. Na ich podstawie można stwierdzić, że zarówno w przypadku mieszanki SMA, jak i betonu asfaltowego zastosowanie asfaltów typu WMA umożliwia uzyskanie lepszego zagęszczenia (mniejszej zawartości wolnych przestrzeni) niż w przypadku asfaltów porównawczych zagęszczonych w tej samej temperaturze. Oznacza to, że obniżanie temperatury pogarsza zagęszczalność. W przypadku mieszanki SMA obniżenie temperatury o 20°C doprowadziło do wyników mieszających się w granicy wymagań (linia przerywana), natomiast obniżenie o 40°C spowodowało przekroczenie maksymalnej dopuszczalnej zawartości wolnych przestrzeni. Natomiast zawartość wolnych przestrzeni w mieszance AC 16 w każdym wariantcie spełniła wymagania według WT-2 2014.

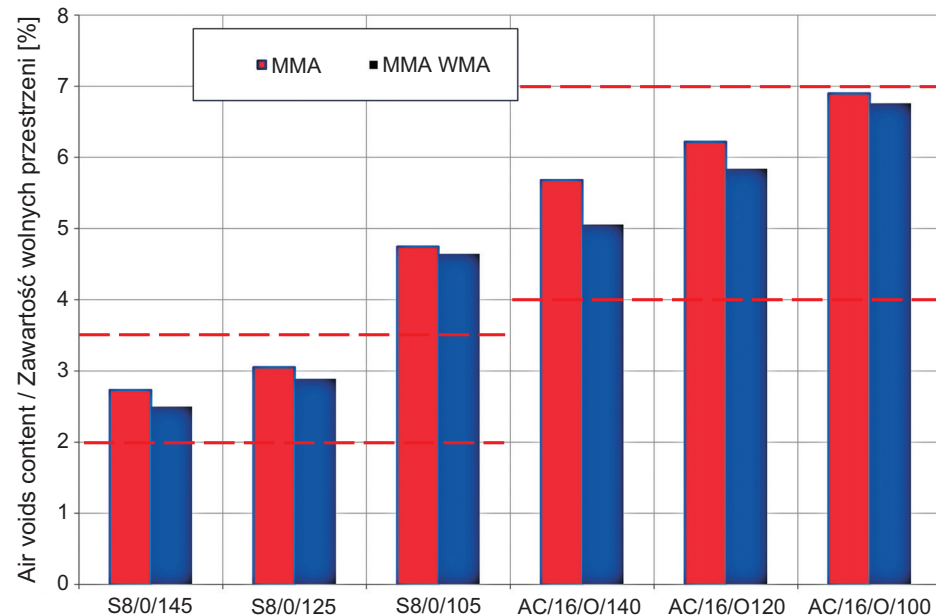


Fig. 1. Contents of air voids in specimens of MMA typical bitumens and WMA bitumens prepared in the Marshall's compactor with reference to requirements of WT-2 2014 (dashed line)

Rys. 1. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach mieszanek z typowymi asfaltami (MMA) i asfaltami WMA zagęszczanych w ubijaku Marshalla w odniesieniu do wymagań WT-2, 2014 (linia przerywana)

Kolejnym etapem było sprawdzenie zagęszczenia w prasie zyratorowej zgodnie z normą PN-EN 12697-31. Przyjęto następujące parametry zagęszczania: kąt wychylenia równy 1,25°, nacisk pionowy 600 kPa, prędkość 30 obrotów na minutę. Zagęszczanie rozpoczyna się po 30 minutach kondycjonowania formy z mieszanką w temperaturze zagęszczania. Mieszanki referencyjne SMA 45/80-55 i AC 16 W 35/50 zagęszczane były odpowiednio w temperaturze

## 4. THE ASSESSMENT OF COMPACTIBILITY

Compactibility of bituminous mixtures was checked in laboratory conditions in a couple of stages. A series of tests in the Marshall's compactor was performed as a basic method for designing their composition and assessing physical characteristics. The results are presented in Fig. 1. It can be stated that both in case of the SMA mixture and asphaltic concrete the application of bitumens of a WMA type enables better compaction (lower contents of air voids) than in case of comparative bitumens compacted at the same temperature. It means that lowering the temperature worsen the compatibility. In case of the SMA mixture a decrease of temperature by 20°C led to results situated on the requirement border (the dashed line), while lowering the temperature by 40°C caused exceeding the maximal acceptable contents of air voids. The content of air voids in the AC 16 mixture met the requirements according to WT-2 2014 in every variant.

The subsequent stage was checking the compaction in a gyratory press according to the PN-EN 12697-31 standard. The following compaction parameters were applied: deflection angle equal to 1.25°, vertical pressure 600 kPa, rotational speed 30 rev./min. Compacting started after 30 minutes of conditioning a mould with the mixture at the compaction temperature. The reference mixtures SMA 45/80-55 and AC 16 W 35/50 were

145°C i 140°C, natomiast mieszanki na ciepło w temperaturach obniżonych zgodnie z założeniami. Zagęszczalność oceniana była zarówno na mieszankach w stanie bez starzenia, jak i po starzeniu technologicznym na podstawie liczby obrotów do uzyskania zawartości wolnych przestrzeni określonych według recepty dla mieszank na gorąco. Wyniki przedstawiono na Rys. 2. Ogólnie można zauważyć wpływ asfaltów WMA na zagęszczalność mieszank, przy czym bardziej zróżnicowane są wyniki uzyskane dla mieszanki SMA. Mieszanki na ciepło zagęszczane w temperaturze obniżonej o 20°C wymagały mniejszej energii zagęszczenia niż mieszanki na gorąco. Zagęszczenie mieszank WMA w najniższej temperaturze było również możliwe, jednak wymagało większej liczby obrotów prasy na poziomie wartości uzyskanych przez mieszanki na gorąco. Interesującym wydaje się fakt, że w przypadku mieszank SMA starzenie technologiczne wpływało na pogorszenie zagęszczalności mieszank, podczas gdy zagęszczalność betonu asfaltowego ulegała poprawie.

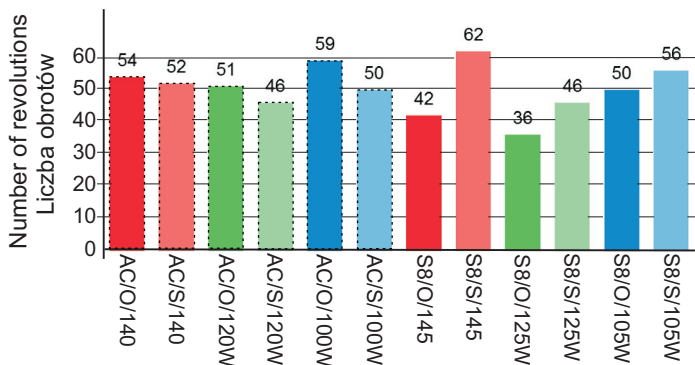


Fig. 2. Compactibility of SMA 8 and AC 16 mixtures in the gyrator press

Rys. 2. Zagęszczalność mieszank SMA 8 i AC 16 w prasie żyratorowej

W dalszej części wykonano zagęszczanie płyt w zagęszczarce walcowej BPS zgodnie z normą PN-EN 12697-33. Na Rys 3 przedstawiono uzyskany wskaźnik zagęszczenia płyt wykonanych z mieszank na gorąco i WMA bez starzenia, po starzeniu technologicznym. Mieszanka AC 16 w każdym wariancie temperaturowym została prawidłowo zagęszczona. W przypadku mieszanki SMA wyniki były bardziej zróżnicowane. Mieszanki WMA w stanie bez starzenia zagęściły się nawet lepiej niż mieszanki na gorąco. Starzenie technologiczne obniżyło zagęszczalność mieszank, przy czym tylko mieszanka na ciepło zagęszczana w temperaturze 105°C uzyskała wynik 97,6%, czyli poniżej wymaganego poziomu 98%.

compacted at temperature of 145°C and 140°C respectively, while warm mix asphalt at reduced temperature according to the previous assumptions. The compactibility was assessed both for mixtures in the state without ageing and after the technological ageing, basing on a number of revolutions for obtaining the content of air voids determined according to a recipe for warm mix asphalts. Fig. 2 presents the results. Generally, the influence of WMA bitumens on the compactibility of mixtures can be noticed, while results acquired for the SMA mixture are more diversified. Warm mix asphalts compacted at a temperature reduced by 20°C required a lower compaction energy than hot mix asphalts. Compacting the WMA mixtures at the lowest temperature was also possible. However, it involved a bigger number of press revolutions on the level of values received by hot mix asphalts. It is interesting that the technological ageing had an impact on a deterioration in the mixture compactibility in case of SMA mixtures, while the same quality of asphaltic concrete was improved.

Further, the compacting of slabs in a plate compactor according to the PN-EN 12697-33 standard followed. Fig. 3 presents the achieved compaction factor of slabs made from hot mix asphalts and WMA without ageing and after technological ageing. The AC 16 mixture was correctly compacted in every temperature variant. In case of the SMA mixture results were more diversified. The WMA mixtures in the state without ageing were compacted even better than hot mix asphalts. The technological ageing reduced the compactibility of mixtures, whereas hot mix asphalt compacted at a temperature of 105°C obtained the result of 97.6%, i.e. below the required level of 98%.

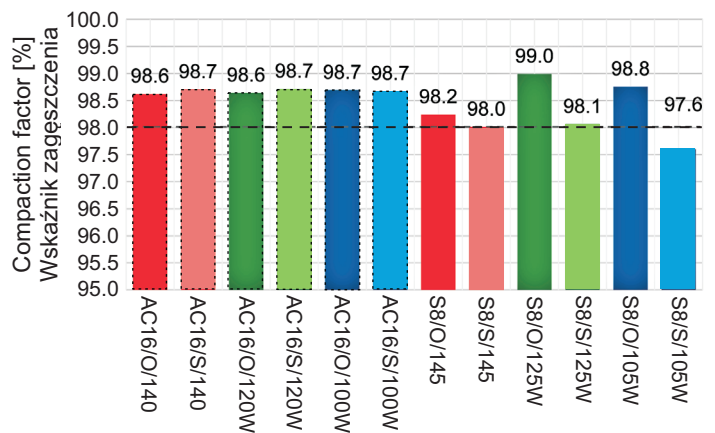


Fig. 3. Compaction factors of slabs compacted in individual variants  
Rys. 3. Wskaźnik zagęszczenia płyt wykonanych w poszczególnych wariantach

## 5. OCENA WODOODPORNOŚCI

Badanie odporności mieszanki na działanie wody wykonano według normy PN-EN 12697-12. Badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie przeprowadzono na próbkach o średnicy 100 mm według normy PN-EN 12697-23. W trakcie wykonywania badań wykorzystano instrukcję badawczą podaną w załączniku nr 1 do WT-2 2014. Wynikiem badania jest wskaźnik zmiany wytrzymałości *ITSR*, który przedstawiono w Tabl. 3 i 4.

Table 3. Results of the water resistance of the AC 16 W mixtures

Tablica 3. Wyniki odporności na działanie wody mieszanek AC 16 W

Mixture Mieszanka	Indirect tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie [kPa]		<i>ITSR</i> [%]
	<i>ITS<sub>w</sub></i>	<i>ITS<sub>s</sub></i>	
AC16/O/140	948	1074	88.3
AC16/O/120W	801	896	89.4
AC16/O/100W	639	786	81.3
AC16/S/140	1043	1136	91.9
AC16/S/120W	863	1054	81.9
AC16/S/100W	722	879	82.1
AC16/L/140	1065	1206	88.3
AC16/L/120W	1062	1108	95.9
AC16/L/100W	930	995	93.5

Sprawdzanie wodoodporności jest jednym z podstawowych badań, które służą do kontroli trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych. Wobec mieszanek do warstwy ścieralnej stawiane jest wymaganie  $ITSR \geq 90\%$ , a do warstwy podbudowy  $\geq 70\%$ . Na tej podstawie można stwierdzić, że wszystkie analizowane warianty mieszanek SMA i AC spełniły wymagania. Oznacza to, że zastosowanie asfaltów WMA i niższych temperatur zagęszczenia umożliwiło zaprojektowanie pełnowartościowych mieszanek. Warto również zauważyć, że wpływ starzenia krótkoterminowego (STOA) i długoterminowego (LTOA) na wartość *ITSR* jest niewielki i zasadniczo nie przekracza 10%. O ile w przypadku mieszanek SMA procesy starzeniowe powodują niewielki spadek wartości *ITSR*, to w przypadku betonu asfaltowego zmiany te są mniejsze, a po starzeniu długoterminowym LTOA zaobserwowano nawet wzrost wartości *ITSR* w mieszanekach z asfaltem WMA. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie pośrednie przedstawione w Tabl. 3 i 4 wskazują generalnie na niższe wartości w przypadku mieszanek zagęszczanych w niższych temperaturach

## 5. THE ASSESSMENT OF WATER RESISTANCE

Testing the water resistance of a mixture was performed according to the PN-EN 12697-12 standard. Investigating the indirect tensile strength was conducted on specimens with a diameter of 100 mm according to the PN-EN 12697-23 standard. The research instruction provided in the annex no.1 to WT-2 2014 was applied in the course of testing. The test result is the factor of strength change *ITSR* (Indirect Tensile Strength Ratio), presented in Table 3 and Table 4.

Table 4. Results of water resistance of the SMA 8 mixture

Tablica 4. Wyniki odporności na działanie wody mieszanki SMA 8

Mixture Mieszanka	Indirect tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie [kPa]		<i>ITSR</i> [%]
	<i>ITS<sub>w</sub></i>	<i>ITS<sub>s</sub></i>	
S8/O/145	974	925	105.4
S8/O/125W	815	758	107.5
S8/O/105W	639	625	102.2
S8/S/145	898	928	96.8
S8/S/125W	713	751	94.9
S8/S/105W	581	639	90.9
S8/L/145	960	987	97.3
S8/L/125W	824	822	100.2
S8/L/105W	711	735	96.6

A research into the water resistance is one of the basic experiments serving the control of durability of bituminous mixtures. The requirement  $ITSR \geq 90\%$  for wearing course mixtures and  $ITSR \geq 70\%$  for base-course layers should be satisfied. On this basis it could be decided whether all analyzed variants of SMA and AC mixtures met the required conditions. That means that the application of SMA bitumens and lower compaction temperature variants enables designing high-quality mixtures. It is also worth noticing that the influence of short-term ageing (STOA) and long-term one (LTOA) on the value of *ITSR* is slight, and generally it does not exceed 10%. In case of SMA mixtures the ageing processes cause an insignificant decrease in the value of *ITSR* and in case of asphaltic concrete those changes are lower. Moreover, after LTOA long-term ageing even an increase in values of *ITSR* in WMA bitumen mixtures can be observed. Test

z zastosowaniem asfaltów WMA. Przyczyną jest najprawdopodobniej większa zawartość wolnych przestrzeni w próbkach zagęszczanych w niższej temperaturze. Próbki do badania ITSR są zagęszczane przy znacznie mniejszej energii (liczbie uderzeń) niż próbki do oznaczenia właściwości fizycznych. W przypadku niższych temperatur zagęszczania energia ta może być zbyt mała. Natomiast w warunkach rzeczywistego zagęszczania, tak jak to wskazują badania zagęszczalności, można oczekiwać dobrego zagęszczenia warstw z mieszankami WMA. Efekt zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie może być mniej widoczny.

## 6. OCENA ODPORNOŚCI NA ZMĘCZENIE

Celem badania zmęczenia jest określenie trwałości zmęczeniowej mieszanki mineralno-asfaltowej przez wyznaczenie parametrów charakterystyki zmęczeniowej według równania (1):

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

gdzie:

$N$  – trwałość zmęczeniowa,

$\varepsilon$  – odkształcenie w badaniu zmęczenia,

$A, b$  – parametry regresji,

oraz określenie wartości  $\varepsilon_6$ . Badania zostały przeprowadzone według normy PN-EN 12697-24, w trybie kontrolowanych odkształceń, w temperaturze 10°C i częstotliwości wymuszenia 10 Hz. Wyniki badań zmęczenia przedstawiono w Tabl. 5, gdzie zamieszczono parametry regresji  $A, b$  i  $R^2$  oraz obliczoną wartość parametru  $\varepsilon_6$ , tj. odkształcenia w badaniu zmęczenia, przy którym uzyskuje się trwałość zmęczeniową równą 1 mln cykli obciążenia. Na Rys. 4 przedstawiono porównanie parametru  $\varepsilon_6$  dla wszystkich wariantów. Zasadniczo niezależnie od stanu starzenia czy temperatury zagęszczenia uzyskano wyniki typowe dla betonu asfaltowego do warstwy podbudowy z asfaltem 35/50. Pomimo tego, iż wartości różnią się między sobą w niewielkim stopniu, a praktycznie prawie w zakresie błęd pomiarowego, można zaobserwować pewne zależności. Generalnie proces starzenia negatywnie wpływa na odporność zmęczeniową wyrażoną przez parametr  $\varepsilon_6$ . W każdym stanie starzenia najlepszy wynik uzyskała mieszanka z asfaltem WMA zagęszczana w temperaturze 120°C. Natomiast mieszanka zagęszczana w temperaturze 100°C charakteryzowała się trwałością zmęczeniową nieznacznie mniejszą,

results of the indirect tensile strength can be found in Table 3 and Table 4. Generally, they indicate lower values in case of mixtures compacted at lower temperature with the use of WMA bitumens. It is probably caused by higher content of air voids in specimens compacted at lower temperature. Specimens for ITSR testing are compacted with a considerably lower energy (a number of impacts) than the specimens for determining physical characteristics. In case of lower compaction temperature that energy can be too low. However, in conditions of a real compaction, as the compactibility tests show, a good compaction of layers with WMA mixtures can be expected. The effect of reducing tensile strength results can be less noticeable.

## 6. THE ASSESSMENT OF FATIGUE RESISTANCE

Fatigue testing aims at defining the fatigue durability of a bituminous mixture through determining the characteristic parameters of the fatigue durability according to the equation (1):

where:

$N$  – fatigue durability,

$\varepsilon$  – strain in fatigue testing,

$A, b$  – regression parameters,

and determining the value of  $\varepsilon_6$ . Tests were carried out through the course of controlled strains according to the PN-EN 12697-24, at a temperature of 10°C and an input frequency of 10 Hz. Fatigue test results with regression parameters  $A, b$  and  $R^2$ , as well as the calculated value of the  $\varepsilon_6$  parameter, i.e. the strains in fatigue test with the fatigue durability equal to 1 million loading cycles, are presented in Table 5. Fig. 4 shows the comparison of the  $\varepsilon_6$  parameter for all variants. Basically, regardless of the ageing state or compaction temperature, the achieved results were typical for asphaltic concrete for the base-course layer with 35/50 bitumen. In spite of the fact that the values slightly differ from each other, practically almost within the scope of measuring error, certain regularities can be observed. Generally, the ageing process exerts a negative impact on the fatigue durability expressed by the  $\varepsilon_6$  parameter. The mixture with WMA bitumen compacted at a temperature of 120°C acquired the best result in every ageing state. However, the mixture compacted at a temperature of 100°C was distinguished by the slightly lower fatigue durability, and in addition



przy czym wyniki są wyrównane i zbliżone do wyników mieszanki zagęszczanej w temperaturze 140°C.

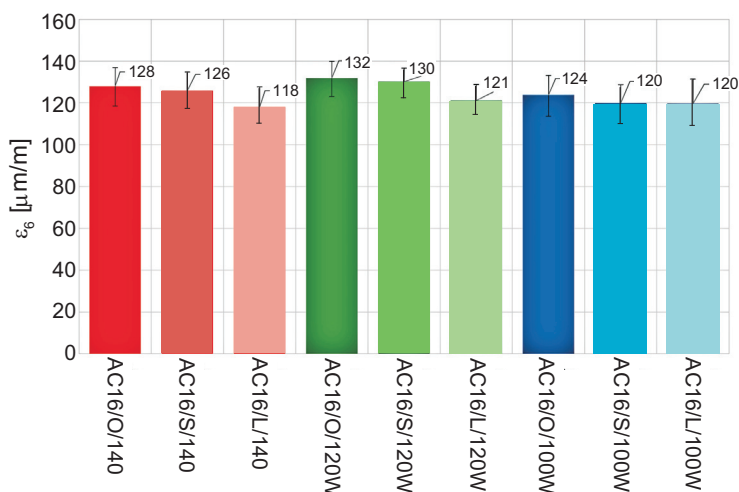


Fig. 4. The comparison of the  $\epsilon_6$  parameter for individual ageing states (the confidence interval 95%)

Rys. 4. Porównanie parametru  $\epsilon_6$  w poszczególnych stanach starzenia (przedział ufności 95%)

Stwierdzono, że zastosowanie asfaltu WMA i niższych temperatur zagęszczenia nie wpływa negatywnie na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego, przy czym korzystniejsze wyniki uzyskano dla mieszank zagęszczanych w temperaturze obniżonej o 20°C niż o 40°C. Pomimo statystycznie niewielkich różnic w każdym przypadku mieszanka WMA zagęszczana w temperaturze 120°C uzyskała lepsze wyniki zmęczeniowe niż mieszanka na gorąco.

## 7. OCENA ODPORNOŚCI NA PĘKANIE NISKOTEMPERATUROWE

Badania przeprowadzane zostały metodą TSRST zgodnie z normą PN-EN 12697-46 na stanowisku pomiarowym MTS w IBDiM. Jest to metoda znana i stosowana na świecie, a od niedawna uwzględniona również w Wymaganiach Technicznych WT-2 2014 [12]. Badanie polega na schładzaniu próbek prostokątnych z prędkością 10°C/h, przy ograniczonym odkształceniu wzdłużnym powodującym wzrost naprężeń termicznych w próbce, aż do momentu pęknięcia próbki na skutek przekroczenia jej wytrzymałości na rozciąganie. Wynikami badania są wartości naprężenia zarejestrowane w momencie pęknięcia oraz temperatury pęknięcia, które przedstawiono na Rys. 5-6. Wyniki badań mieszanki SMA 8 należy ocenić jako typowe dla tego rodzaju mieszanki z polimeroasfaltem. Jednocześnie są to wartości, które zapewniają wysoką odporność na pękanie niskotemperaturowe w polskich warunkach klima-

the results were balanced and similar to the results of mixture compacted at a temperature of 140°C.

It has been found that the application of WMA bitumen and lower compaction temperature did not had a negative effect on the fatigue durability of asphaltic concrete, while better results were obtained for the mixtures compacted at a temperature lowered by 20°C than by 40°C. Despite statistically irrelevant differences, in each case the WMA mixture compacted at a temperature of 120°C had better fatigue results than hot mix asphalt.

Table 5. Results of fatigue tests  
Tablica 5. Wyniki badań zmęczenia

Mixture Mieszanka	Parameter of fatigue law line Parametr krzywej zmęczeniowej			Fatigue resistance Odporność na zmęczenie $\epsilon_6$ [μm/m]
	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	
AC16/O/140	2.69 · 1018	-5.90	0.94	128
AC16/S/140	8.60 · 1018	-6.16	0.93	126
AC16/L/140	8.49 · 1017	-5.76	0.93	118
AC16/O/120W	1.27 · 1020	-6.65	0.93	132
AC16/S/120W	9.01 · 1018	-6.13	0.92	130
AC16/L/120W	6.59 · 1019	-6.61	0.96	123
AC16/O/100W	4.13 · 1019	-6.51	0.95	124
AC16/S/100W	1.95 · 1017	-5.43	0.96	120
AC16/L/100W	1.76 · 1017	-5.41	0.89	120

## 7. THE ASSESSMENT OF RESISTANCE TO LOW-TEMPERATURE CRACKING

The research was performed with the use of the TSRST method according to the PN-EN 12697-46 standard on the measuring position in the Road and Bridge Research Institute in Warsaw. It is a well-known method applied all over the world, and recently taken into consideration in WT-2 2014 Technical Requirements [12]. The test consists in cooling down rectangular specimens at the rate of 10°C/h with a limited longitudinal strain causing an increase of thermal stresses in the specimen till the moment of its cracking due to exceeding its tensile strength. Test results constitute the stress values registered in the crack moment and crack temperature variants presented on Fig. 5-6. The test results

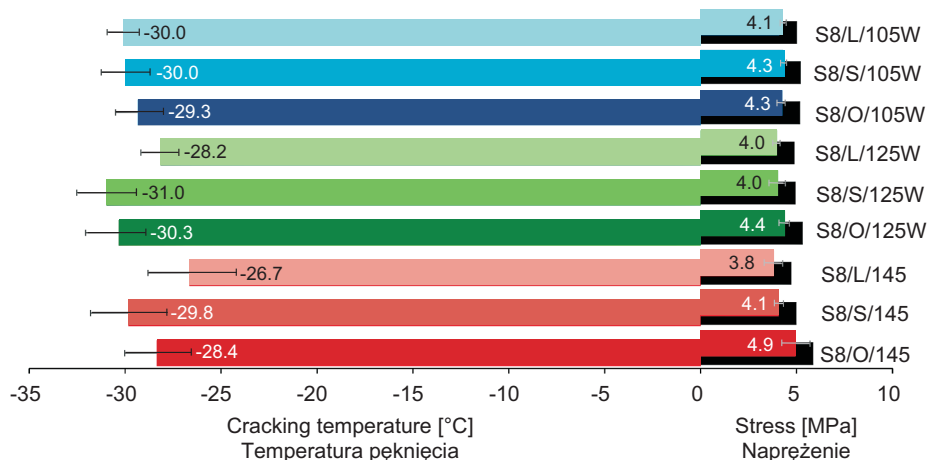


Fig. 5. Results of resistance to low-temperature cracking of the SMA 8 mixture

Rys. 5. Wyniki odporności na pękanie niskotemperaturowe SMA 8

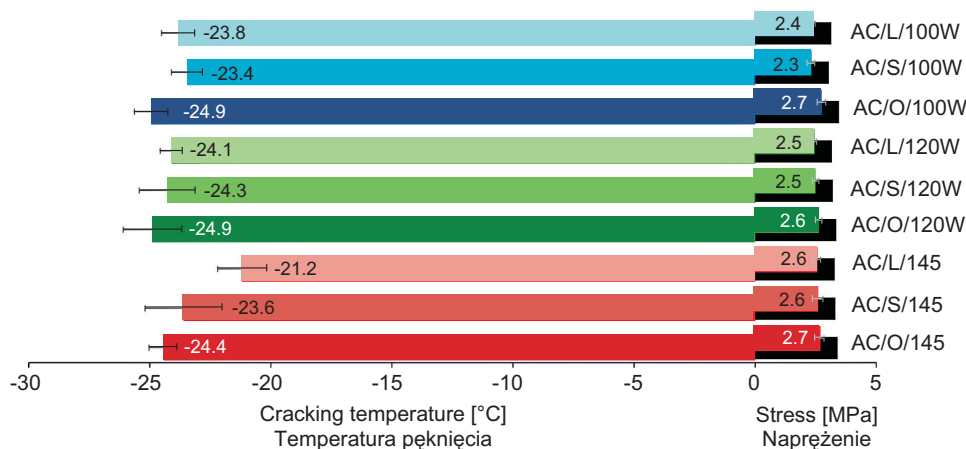


Fig. 6. Results of resistance to low-temperature cracking of the AC 16 mixture

Rys. 6. Wyniki odporności na pękanie niskotemperaturowe AC 16

tycznych. Porównując wyniki w poszczególnych stanach starzenia można zauważyć, że mieszanka zagęszczana w 145°C charakteryzuje się niższą odpornością na pękanie (wyższa temperatura pęknięcia) niż mieszanki z asfaltami WMA. Różnice nie są znaczące, jednak tendencja jest zachowana. Taką samą zależność można zauważyć w przypadku betonu asfaltowego AC 16 W. Lepszą odporność mieszanek z asfaltami WMA można tłumaczyć, podobnie jak w przypadku trwałości zmęczeniowej, większym udziałem lepkiej części modułu zespolonego. Wartości naprężeń przy pęknięciu w większości przypadków są większe, gdy chodzi o mieszanki porównawcze z konwencjonalnymi asfaltami. Wyjątek stanowią wyniki mieszanki SMA po starzeniu długoterminowym LTOA, czemu jednak towarzyszą niższe temperatury pęknięcia.

## 8. OCENA MODUŁU ZESPOLONEGO

Badanie modułu zespolonego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12697-26 metodą belki czteropunktowo

of the SMA 8 mixture ought to be assessed as typical ones for that type of mixture with polymer-modified bitumen. At the same time, they make values providing the high resistance to low-temperature cracking in the Polish climatic conditions. It can be observed when comparing the test results of individual ageing states that the mixture compacted a temperature of 145°C is characterized by a lower crack resistance (the higher temperature of cracking) than the mixtures with WMA bitumens. The differences are not significant, but the tendency is retained. The same dependency can be noticed in case of AC 16 W asphaltic concrete. Better resistance of mixtures with WMA bitumens can be explained, similarly to the case of fatigue resistance, with a higher share of the viscous part of the complex modulus. The values of cracking stresses are greater in case of mixtures compared to conventional bitumens. Test results of the SMA mixture after LTOA long-term ageing make an exception. However, the results are accompanied by lower crack temperature.

zginanej. Przyjęto następujące warunki badania: temperatura 10°C, częstotliwości: 0,5; 1, 2, 5, 8, 10 Hz i amplituda maksymalnego odkształcenia w belce 50  $\mu\text{mm/mm}$ . Wynikiem badania są: moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego. Wartości modułu sztywności jako parametru uwzględnianego w projektowaniu konstrukcji są na poziomie typowym dla betonu asfaltowego do warstwy podbudowy. W przypadku mieszanki z asfaltem 35/50 następuje wzrost sztywności o około 11% w wyniku starzenia. Jeśli chodzi o mieszanki z asfaltami WMA, wzrost ten jest mniejszy po starzeniu krótkoterminowym STOA, tj. na poziomie do 3%, a po starzeniu długoterminowym LTOA około 7%.

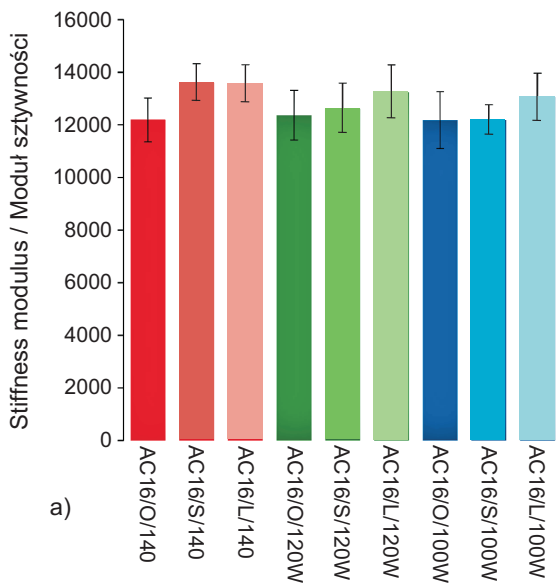


Fig. 7. The stiffness modulus and phase angle of the AC 16 mixture at the temperature 10°C and frequency 10 Hz

Rys. 7. Moduł sztywności (a) i kąt przesunięcia fazowego (b) mieszanek AC 16 w temperaturze 10°C i częstotliwości 10 Hz

Na Rys. 7 przedstawiono porównanie modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego przy częstotliwości 10 Hz, w temperaturze 10°C, jako typowych parametrów uwzględnianych w projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych w Polsce. Wyniki badań mieszanek zagęszczanych w poszczególnych wariantach temperatury zagęszczania wskazują w każdym przypadku na wpływ procesu starzenia na właściwości lepkosprężyste uzyskane w badaniu modułu zespolonego. Starzenie powoduje wzrost sztywności mieszanek i zmniejszenie wartości kąta przesunięcia fazowego. Zmianę sztywności mieszanki można interpretować jako miarę odporności na starzenie. Analizując wyniki sztywności można stwierdzić, że mieszanki z asfaltami WMA były

## 8. THE ASSESSMENT OF COMPLEX MODULUS

Testing the complex modulus was carried out in accordance with the PN-EN 12697-26 standard using the method of four-point bent beam. The following test conditions were adopted: a temperature of 10°C, frequencies: 0.5, 1, 2, 5, 8, 10 Hz and an amplitude of the maximal beam strain of 50  $\mu\text{mm/mm}$ . The test results are the stiffness modulus and phase angle. The values of stiffness modulus as a parameter taken into account during designing structures are on a level which is typical for asphaltic concrete for a base-course layer. In case of the mixture with 35/50 bitumen a stiffness increased about 11% as a result of ageing. In case of mixtures with WMA bitumens that increase is lower after the STOA short-term ageing, i.e. on a level up to 3% and after LTOA long-term ageing about 7%.

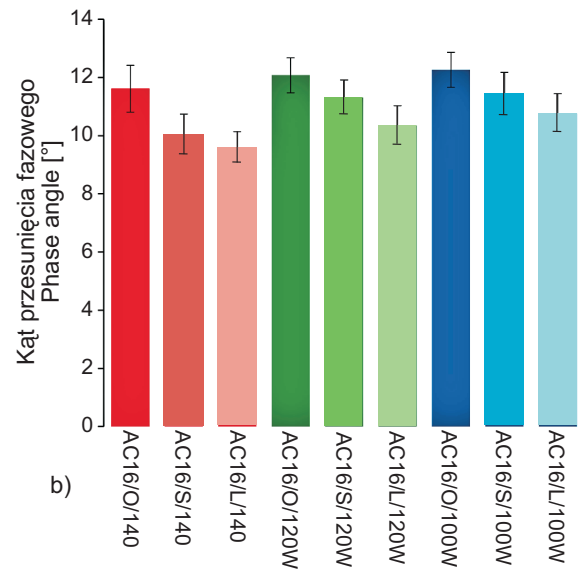


Fig. 7 presents the comparison of the stiffness modulus and phase angle at a frequency of 10 Hz and a temperature of 10°C as typical parameters taking into account at designing structures of road pavements in Poland. In each case test results of mixtures compacted in individual variants of compaction temperature show the effect of the ageing process on viscoelastic characteristics achieved through tests of the complex modulus. Ageing causes the increase in rigidity of mixtures and the decrease in phase angle. The change in stiffness of a mixture can be interpreted as a measure of ageing resistance. It can be found when analysing the test results of stiffness that mixtures with WMA bitumens are more resistant in this respect.

pod tym względem odporniejsze. Wzrost sztywności po starzeniu technologicznym w ich przypadku nie przekroczył 2% wartość modułu w stanie oryginalnym, a po starzeniu eksploatacyjnym wyniósł około 7%. Tymczasem dla mieszanki z asfaltem porównawczym zmiany te wyniosły około 11-12%.

Oznacza to zwiększenie udziału fazy sprężystej kosztem fazy lepkiej. W pewnym stopniu stanowi to przyczynę zmniejszenia trwałości zmęczeniowej na skutek procesu starzenia. Można stwierdzić, że usztywnienie mieszanki i zmniejszenie udziału fazy lepkiej pogarsza jej trwałość zmęczeniową. Zmiana udziału tej fazy jest dobrze widoczna na wykresach Cole-Cole, gdzie wyraźnie uwidacznia się przesunięcie wyników w kierunku strefy sprężystej (Rys. 8). Podobne obserwacje można poczynić porównując mieszanki na ciepło i na gorąco. Mieszanka AC 16 na ciepło zagęszczana w temperaturze 120°C charakteryzuje się większym udziałem fazy lepkiej niż mieszanka na gorąco czy mieszanka WMA zagęszczana w temperaturze 100°C (Rys. 9).

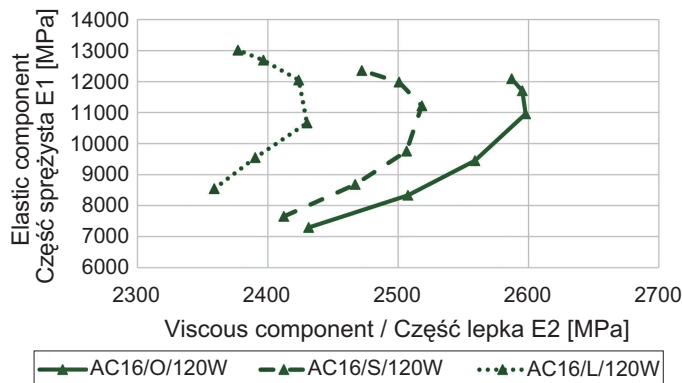


Fig. 8. The ageing effect on viscoelastic characteristics of the AC 16 mixture

Rys. 8. Wpływ starzenia na właściwości lepko-sprężyste mieszanki AC 16

## 9. OCENA ODPORNOŚCI NA PROPAGACJĘ PĘKNIĘCIA

Badanie propagacji pęknięcia przeprowadzono metodą SCB (ang. *Semi-Circular Bending*), zgodnie z normą PN-EN 12697-44. Badanie polega na trójpunktowym zginaniu próbek w kształcie połówki walca. Próbki posiadają nacięcie o głębokości 10 mm równoległe do kierunku przyłożenia siły, wokół którego następuje koncentracja naprężeń i inicjowane jest pęknięcie, które w trakcie zwiększania obciążenia propaguje ku górze, prowadząc do całkowitego zniszczenia próbki. Badania przeprowadzono w temperaturze 0°C. Wynikiem badania jest naprężenie

The increase in rigidity in their case after the technological ageing did not exceed 2% of the module value in the original condition, but after the long-term ageing came to about 7%. Meanwhile, those changes for the mixture with a comparative bitumen reached around 11-12%.

That means an increase in share of elastic phase at the expense of viscous phase. To a certain degree it is the cause of decreasing the fatigue durability as a result of the ageing process. It can be stated that the mixture bracing and the decrease in share of viscous phase worsen its fatigue durability. The change in the share of viscous phase is clearly noticeable on Cole-Cole diagrams with an evident shift of results towards the elastic area (Fig. 8). Similar observations can be made when comparing warm and hot mixtures. The AC 16 warm mixture compacted at a temperature of 120°C is distinguished by the larger share of viscous phase than a hot mixture or the WMA mixture compacted at a temperature of 100°C (Fig. 9).

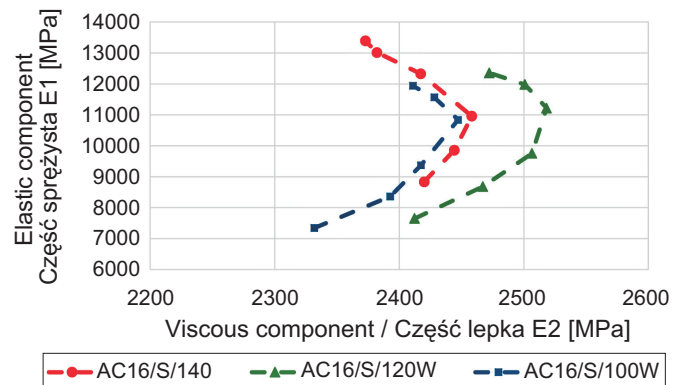


Fig. 9. Comparison of viscoelastic characteristics of the AC 16 mixture after technological ageing

Rys. 9. Porównanie właściwości lepko-sprężystych mieszank AC 16 po starzeniu technologicznym

## 9. THE ASSESSMENT OF RESISTANCE TO CRACK PROPAGATION

The research into crack propagation was conducted with the use of the SCB (Semi-Circular Bending) method in accordance with the PN-EN 12697-44 standard. This test consists in three-point bending the half cylinder-shaped specimens. They have 10 mm deep cuts, parallel to the direction of imposing a force around which the stress concentration occurs and the crack is initiated, propagating upwards and leading to the total destruction of a specimen. The tests were executed at a temperature of 0°C. The test result is the stress at  $\sigma_{\max}$  crack initiation - the

przy inicjacji pęknięcia  $\sigma_{\max}$  (2), odporność na pęknięcie  $K_{lc}$  - wskaźnik intensywności naprężeń, por. (3) i (4) oraz praca potrzebna do przełamania próbki  $W_p$  obliczana na podstawie pola pod wykresem siły w funkcji przemieszczenia [16-18]:

$$\sigma_{\max} = \frac{4263 \cdot F_{\max}}{D \cdot t}, \quad (2)$$

gdzie:

$D$  - średnica próbki [mm],

$t$  - wysokość próbki [mm],

$F_{\max}$  - maksymalna wartość bezwzględna zarejestrowanej w trakcie obciążenia siły [N].

Z kolei odporność na pęknięcie można wyznaczyć ze wzoru:

$$K_{lc} = \sigma_{\max} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (3)$$

gdzie funkcja  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  jest przybliżona następującym wielomianem:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -4.9965 + 155.58 \left(\frac{a}{W}\right) - 799.94 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2141.9 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 2709.1 \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 1398.6 \left(\frac{a}{W}\right)^5. \quad (4)$$

W powyższym wzorze  $a$  jest głębokością nacięcia, zaś przez  $W$  oznaczono wysokość próbki. Jeśli  $9 < a < 11$  mm i  $70 < W < 75$  mm, to można przyjąć, że  $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,956$ .

Wyniki badań odporności na propagację pęknięcia przedstawiono na Rys. 10-12. W przypadku mieszanki SMA 8 wartości naprężenia przy pękaniu mieszczą się w przedziale 5,2 - 6,1 MPa. Biorąc pod uwagę wartości przedziałów ufności zaznaczonych na rysunkach można stwierdzić, że obniżanie temperatur technologicznych oraz starzenie nie ma negatywnego wpływu na wartość naprężenia przy pękaniu oraz pracy potrzebnej do przełamania próbki  $W_p$ , wyniki są na bardzo zbliżonym poziomie. Analogiczne wnioski można sformułować na podstawie parametru wyznaczonego zgodnie ze wzorem (3), określanego jako odporność na propagację pęknięcia. Uzyskiwane wyniki mieszczą się w przedziale 31,3 - 36,6 N/mm<sup>1,5</sup>.

Analizując wyniki mieszanki AC 16 stwierdzono, że naprężenie przy pęknięciu przy temperaturach zagęszczania 140°C i 120°C nieznacznie maleje wskutek starzenia STOA i LTOA. Natomiast, przy temperaturze zagęszczania 100°C wartość naprężenia przy pęknięciu rośnie w wyniku starzenia i w przypadku mieszanki AC16/L/100W przyjmuje najwyższą wartość wynoszącą 4,2 MPa. W zakresie parametru

equation (2),  $K_{lc}$  crack resistance - the factor of stress intensity, comparison of equations (3) and (4), and the work needed for bending the  $W_p$  specimen calculated on the basis of an area under the graph of a force as a function of displacement [16-18]:

where:

$D$  - the specimen diameter [mm],

$t$  - the specimen height [mm],

$F_{\max}$  - the absolute maximal value of a force [N] registered during loading.

Then the crack resistance can be determined through the formula:

where the function  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  is approximated with the following multi-nominal:

In the above formula  $a$  means the cut depth, when  $W$  denotes the specimen height. It can be assumed that  $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5.956$ , when  $9 \text{ mm} < a < 11 \text{ mm}$  and  $70 \text{ mm} < W < 75 \text{ mm}$ .

Results of investigating the resistance to crack propagation presents Figs. 10-12. In case of the SMA 8 mixture the values of cracking stresses are contained in the interval 5.2 - 6.1 MPa. Considering the values of confidence intervals marked on the figures, it can be found that lowering technological temperature and ageing does not exert negative effects on the value of cracking stress and work needed to break the  $W_p$  specimen. Consequently, results remain on a very similar level. Analogical conclusions can be formulated basing on the parameter determined according to the formula (3), described as a resistance to crack propagation. The acquired results are contained in the interval 31.3 - 36.6 N/mm<sup>1.5</sup>.

It has been found when analysing the results of the AC 16 mixture that the cracking stress at compaction temperature of 140°C and 120°C was slightly lowering due to STOA and LTOA ageing. However, at the compaction temperature of 100°C the value of stress at cracking grew as a result of ageing, taking the value equal to 4.2 MPa in case of the AC16/L/100W mixture. The results of all

określającego jako odporność na pękanie wyniki wszystkich wariantów mieszczą się w przedziale 19,9 - 24,6  $\text{N/mm}^{1.5}$ . Maksymalną wartość odporności na pękanie uzyskano w przypadku mieszanki AC16/L/100W (24,6  $\text{N/mm}^{1.5}$ ), a najmniejszą 19,9  $\text{N/mm}^{1.5}$  dla tej samej mieszanki w stanie bez starzenia. Ogólnie jednak wyniki naprężeń i odporności na pękanie są na bardzo zbliżonym poziomie, a różnice często mieszczą się w zakresie błędów pomiarowych. Natomiast odkształcenie pęknięcia jest parametrem, który został określony z największym rozrzutem wyników, więc formułowanie jakichkolwiek wniosków na tej podstawie byłoby niewłaściwe. Należy również zauważyć, że parametr ten w sposób jednoznaczny nie klasyfikuje odporności na propagację pęknięcia.

variants have fallen into the interval 19.9 - 24.6  $\text{N/mm}^{1.5}$  within the scope of a parameter determining crack resistance. The maximal value of crack resistance was acquired in case of the AC16/L/100W mixture (24.6  $\text{N/mm}^{1.5}$ ) and the least one, i.e. 19.9  $\text{N/mm}^{1.5}$ , for the same mixture in the state without ageing. Generally, test results of stresses and crack resistance were on the very similar level with differences located within the measuring error. However, the crack deformation is a parameter that has been determined with the highest scatter of results. Consequently, formulating any conclusions on this basis would be improper. Still, it should be noted that this parameter does not classify the resistance to crack propagation in a clear-cut way.

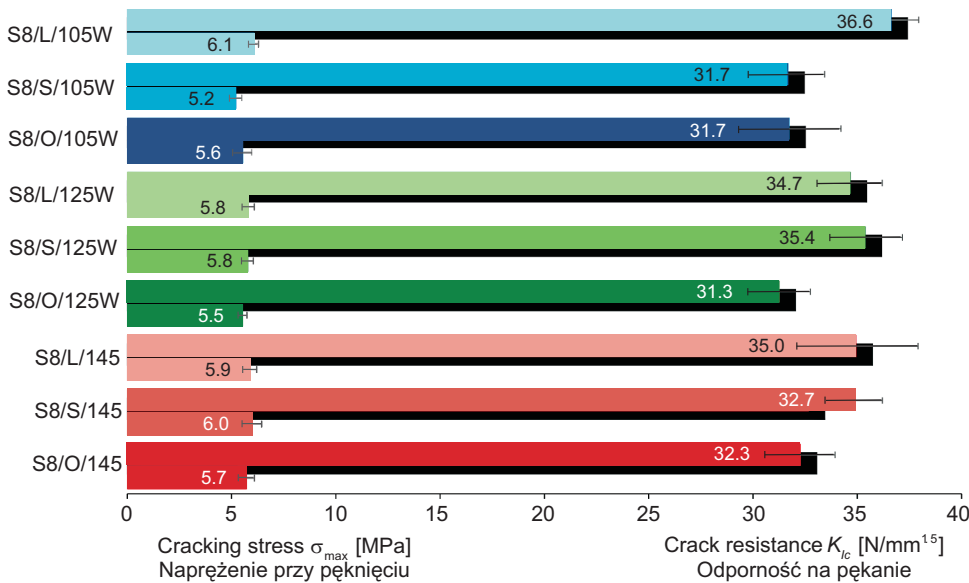


Fig. 10. The cracking stress  $\sigma_{\max}$  and  $K_{ic}$  crack resistance of SMA 8 mixtures  
Rys. 11. Naprężenie przy pęknięciu  $\sigma_{\max}$  oraz odporność na pękanie  $K_{ic}$  mieszanek SMA 8

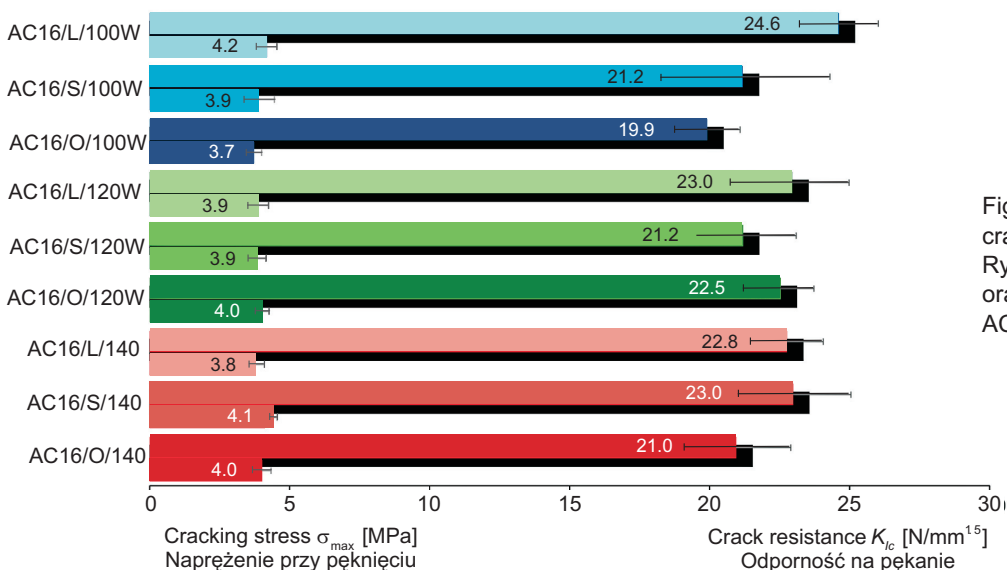


Fig. 11. The cracking stress  $\sigma_{\max}$  and  $K_{ic}$  crack resistance of AC 16 mixtures  
Rys. 11. Naprężenie przy pęknięciu  $\sigma_{\max}$  oraz odporność na pękanie  $K_{ic}$  mieszanek AC 16

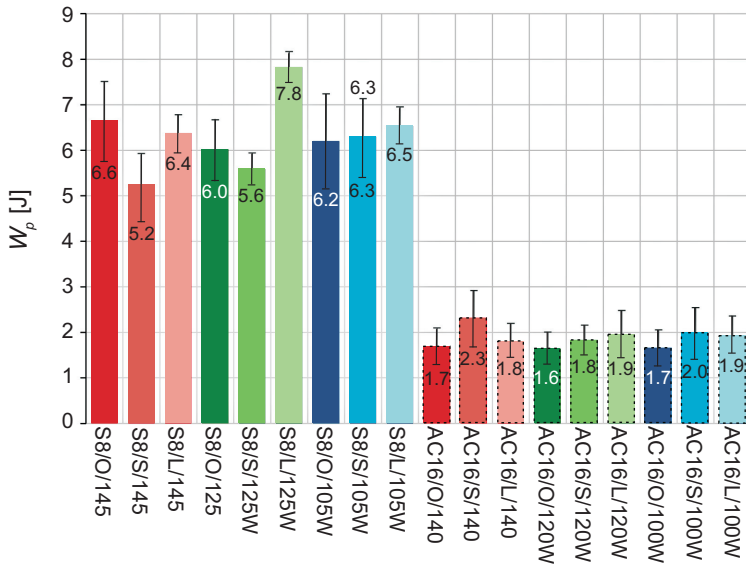


Fig. 12. Work  $W_p$  needed to break specimens for individual variants of mixtures

Rys.12. Praca  $W_p$  potrzebna do przełamania próbki dla poszczególnych wariantów mieszanek

Porównując przebieg testów SCB w przypadku mieszanki SMA 8 i AC 16 można stwierdzić, że w pierwszym przypadku pękanie miało charakter mniej gwałtowny niż w przypadku mieszanki AC 16 (z kruszywem wapiennym). Różnica jest przede wszystkim widoczna w wynikach pracy potrzebnej do przełamania próbki  $W_p$ . W celu zniszczenia próbek SMA trzeba wykonać przeszło trzykrotnie większą pracę niż przy mieszance AC 16. Analizując przełomy próbek SMA 8 można stwierdzić, że spękania przyrastają w mastyksie, czyli pomiędzy ziarnami szkieletu grysowego. Jeśli chodzi o mieszankę AC 16, w wielu przypadkach widoczne są pęknięcia także ziaren wapiennych kruszywa, co skutkuje bardzo gwałtownym przebiegiem próby po osiągnięciu maksymalnej siły zginającej półkolistą próbkę z nacięciem.

## 10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedmiotem analizy były badania porównawcze mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii na gorąco i mieszanek na ciepło z asfaltami WMA, tj. zagęszczanych w niższych temperaturach. Zastosowanie asfaltów WMA do mieszanek zagęszczanych w obniżonych temperaturach poprawia ich zagęszczalność. W przypadku betonu asfaltowego uzyskano prawidłowe zagęszczenie próbek Marshalla i płyt w temperaturach obniżonych o 20°C i 40°C. W przypadku mieszanki SMA podobny rezultat uzyskano przy obniżeniu temperatury o 20°C. Natomiast mieszanka zagęszczana w najniższej temperaturze, tj. 105°C, była niedogęszczona. Najprawdopodobniej możliwe byłoby dobre zagęszczenie mieszanki SMA na ciepło w temperaturze obniżonej o 30°C, co jest typową wartością dla technologii WMA. Należy również zauważyć, że badania zagęszczalności w prasie żyrotorowej wskazują na możliwości

Comparing the course of SCB tests in case of SMA 8 and AC 16 mixtures it can be found that in the first case cracking had the less violent character than in the case of the AC 16 mixture (with calcareous aggregate). First of all, the difference is noticeable in amounts of efforts needed to break the  $W_p$  specimen. More than threefold intensive work in comparison with the mixture AC 16 had to be performed in order to destroy SMA specimens. Considering the fractures of SMA 8 specimens it can be found that cracks increase in mastic, i.e. between grains of the chipping skeleton. In case of the AC 16 mixture there were many cases of cracking calcareous grains of aggregate. It results in a very violent course of test after the achievement of the maximal value of force bending the semicircular specimen with a cut.

## 10. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The comparative research into hot mix asphalts and warm mixes with WMA bitumens, i.e. materials compacted at lower temperature variants, constitutes the object of analysis. The application of WMA bitumens to mixes compacted at lowered temperature improves their compactibility. In case of asphaltic concrete the proper compaction of Marshall's specimens and slabs at temperature lowered by 20°C and 40°C was achieved. In case of the SMA mixture a similar result was obtained with the temperature lowered by 20°C. However, the mixture compacted at the lower temperature, i.e. 105°C, was not compacted enough. Probably the proper warm compaction of the SMA mixture could be possible at a temperature reduced by 30°C what makes a typical value for the WMA technology. It should also be noted that testing compactibility in a gyratory press indicates possibilities

uzyskania prawidłowego zagęszczenia wszystkich mieszanek WMA niezależnie od temperatury i stanu starzenia. Natomiast najniższe temperatury wymagają użycia większej energii zagęszczenia. Jest więc wielce prawdopodobne, że w warunkach rzeczywistych mieszanki również będą mogły być prawidłowo zagęszczone.

W zakresie badania wodoodporności nie stwierdzono istotnego wpływu zastosowania mieszanek z asfaltami WMA na wartość ITSR. Zastosowanie obniżonej temperatury zagęszczania nie wpływa więc niekorzystnie na właściwości mieszanki w zakresie odporności na działanie wody. Wpływ procesów starzeniowych również nie okazał się w tym zakresie najistotniejszy. Najlepsze wyniki zmęczeniowe uzyskała mieszanka AC 16 z asfaltem WMA zagęszczana w temperaturze 120°C (tj. obniżonej o 20°C). Mieszanka zagęszczana w temperaturze o 40°C niższej uzyskała wyniki na poziomie mieszanki z konwencjonalnym asfaltem drogowym zagęszczanej w temperaturze 140°C. Z uwagi na niewielkie różnice pomiędzy wynikami można stwierdzić, że niższe temperatury zagęszczania mieszanek z asfaltem WMA nie obniżają trwałości zmęczeniowej, a przy ograniczeniu obniżenia temperatury zagęszczenia do 20°C można oczekiwać nawet zwiększenia trwałości zmęczeniowej. Wpływ starzenia krótko i długoterminowego na trwałość zmęczeniową jest widoczny w każdym wariancie mieszanki AC 16.

Zauważono również, że o ile moduł sztywności mieszanek w danym stanie starzenia nie zależy od wariantu mieszanki (temperatury zagęszczenia), to w przypadku mieszanek WMA widać większy udział fazy lepkiej modułu. Fakt ten może uzasadniać uzyskane korzystne wyniki trwałości zmęczeniowej i odporności na pękanie niskotemperaturowe, zarówno dla betonu asfaltowego, jak i SMA wyprodukowanych z asfaltem WMA. Na podstawie wyników badań odporności na propagację pęknięcia stwierdzono, że zastosowanie niższych temperatur zagęszczania przy zastosowaniu asfaltów WMA nie ma negatywnego wpływu na tę cechę zarówno w przypadku mieszanki SMA 8, jak i AC 16. Podsumowując, wyniki pracy wskazują na możliwość obniżenia temperatury zagęszczania przy zastosowaniu asfaltów WMA i zachowaniu dobrych właściwości funkcjonalnych, które decydują o trwałości eksploatacyjnej nawierzchni. Można też oczekiwać poprawy w zakresie odporności na zmęczenie i pękanie w niskich temperaturach.

## INFORMACJE DODATKOWE

Publikacja powstała na podstawie wyników pracy badawczej N-3507 „Badania asfaltów WMA w technologii budowy dróg „na ciepło” w Polsce”, sfinansowanej przez LOTOS Lab Sp. z o.o.

of acquiring the proper compaction of all WMA mixtures regardless of the temperature and ageing condition. However, lower temperature requires the application of higher energy of compaction. Therefore, the proper compaction of mixtures is highly probable in real conditions.

It has not been observed any significant influence of the application of mixtures with WMA bitumens on the *ITSR* value. Therefore, the application of the lowered compaction temperature do not exert a negative effect on characteristics of a mixture within the scope of water resistance. Apparently, also the influence of ageing processes has not turned out the most significant within that scope of investigations. The AC 16 mixture with WMA bitumen compacted at a temperature of 120°C (i.e. lowered by 20°C) acquired the best fatigue results. The mixture compacted at the temperature lower by 40°C achieved results at the level of a mixture with ordinary road bitumen compacted at a temperature of 140°C. Due to some irrelevant differences between results, it can be stated that lower compaction temperature of mixtures with WMA bitumen do not reduce the fatigue resistance. An increase in fatigue durability can be even expected when limiting the compaction temperature to 20°C. The influence of long-term and short-term ageing on the fatigue durability is noticeable in each variant of the AC 16 mixture.

It has been noticed that while stiffness modulus of mixtures in a given state of ageing do not depend on their variants (compaction temperature), the larger portion of viscous phase of the module in case of WMA mixtures can be observed. That fact may explain the achieved positive results of fatigue durability and low-temperature crack resistance both for asphaltic concrete and SMA produced by applying WMA bitumen. Moreover, it has been found basing on test results of resistance to crack propagation that the application of lower compaction temperature with the use of WMA bitumen has no negative impact on that characteristic in case of both SMA 8 and AC 16 mixtures. To sum up, the results of the project indicate that the possibility of reducing the compaction temperature by means of WMA bitumens and keeping their good functional properties deciding on the long-term durability of pavement. An improvement within the scope of fatigue and crack resistance at low temperature can also be expected.

## ACKNOWLEDGEMENT

The article was based on the results of research project N-3507 “Testing WMA bitumens in “warm” technology of roads construction in Poland”, financed by LOTOS Lab, LLC.



**BIBLIGRAFIA / REFERENCES**

- [1] *Stienss M., Judycki J.*: Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło - przegląd dodatków. *Drogownictwo*, **LXVI**, 7-8, 2010, 227-232
- [2] EAPA. The use of Warm Mix Asphalt. EAPA Position Paper, 2010
- [3] *Capitão S.D., Picado-Santos L.G., Martinho F.*: Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, **36**, 2012, 1016-1024
- [4] *Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., Perveneckas Z.*: Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **4**, 2, 2009, 80-86
- [5] *Prowell B.*: Warm Mix Asphalt: European Practice - The International Technology Scanning Program - Summary Report, NCHRP, 2007
- [6] *Olard F., Le Noan C., Romier A.*: Low energy asphalt technique for minimizing impacts from asphalt plants to road works. *European Roads Review*, **10**, 2007, 64-75
- [7] *Croteau J.M., Tessier B.*: Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, 2008
- [8] *Bonaquist R.*: Materials Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. NCHRP REPORT 691, Washington, 2011
- [9] *Zhao S., Huang B., Shu X., Woods M.*: Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, **44**, 7, 2013, 92-100
- [10] *Król J.B., Kowalski K.J., Radziszewski P., Sarnowski M.*: Rheological behaviour of n-alkane modified bitumen in aspect of Warm Mix Asphalt technology. *Construction and Building Materials*, **93**, 2015, 703-710
- [11] *Bańkowski W., Horodecka R., Wróbel A.*: Laboratoryjna ocena zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych na ciepło. *Logistyka*, **3**, 2014, 282-293
- [12] *Król J., Matraszek K., Pilat J., Radziszewski P., Kowalski K.*: Właściwości lepiszczy asfaltowych modyfikowanych parafinami nowej generacji. Projekt MMAC - cz. 1, *Magazyn Autostrady*, **5**, 2011, 72-76
- [13] *Karp E., Czajkowski P.*: Ekologia w cenie. *Infrastruktura: Ludzie Innowacje Technologie*, **80**, 5-6, 2015, 32-35
- [14] *Bańkowski W.*: Innowacje w asfaltach drogowych. *Builder*, **9**, 2015, 76-78
- [15] Wymagania Techniczne. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych WT-2. GDDKiA, 2014
- [16] *Szydłowski C., Judycki J.*: Badanie parametrów mechaniki pęknięcia betonów asfaltowych konwencjonalnych i o wysokim module sztywności. *Drogownictwo*, **LXIX**, 7-8, 2014, 219-225
- [17] *Neimitz A.*: Mechanika pęknięcia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998
- [18] *Judycki J.*: Fatigue of asphalt mixes. Publication of University of Oulu, Finland, 1991