

MATEUSZ M. IWĄŃSKI¹
ANNA CHOMICZ-KOWALSKA²
Kielce University of Technology
¹e-mail: mateusz.iwanski@tu.kielce.pl
²e-mail: akowalska@tu.kielce.pl

INFLUENCE OF SYNTHETIC FIBRES ON THE PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE PRODUCED AT REDUCED TEMPERATURE

Abstract

This paper presents the effects of synthetic fibers from car tire recycling on the properties of binder course asphalt concrete. The asphalt concrete was produced in conventional hot mix asphalt technology as well as in lowered temperatures as warm mix (WMA) and half-warm mix asphalt (HWMA). The aim of the research was to analyze the influence of fiber content and the production technique on the air void content, moisture resistance (ITSR), resistance to permanent deformation (WTS_{AIR}), stiffness modulus at 20°C and fatigue resistance under indirect tension test. The performed analyses have proven the influence of synthetic fibers on the characteristics of asphalt concrete produced in WMA technology (with synthetic F-T wax modified bitumen) and HWMA technology (with foamed bitumen) to be significant.

Keywords: synthetics fibers, asphalt concrete, foamed bitumen, WMA, HWMA, reduced temperature

1. Introduction

The dynamic increase in traffic and the rising share of heavy goods vehicles in its structure are the reasons for the rise of new requirements for road structure design and development for new road materials so that those new challenges can be met.

The structure of a road surface must bear increasing loads, so the fatigue resistance of materials (especially those for wearing course layers) has to be improved [10]. The processes associated with the production of those materials are highly energy intensive. Bitumen road construction materials are produced at temperatures ranging from 160°C to 180°C (depending on the bitumen type used), which is a source of wide critique throughout the world because of the negative impact on the environment. Low carbon dioxide emission processes are preferred to reduce the greenhouse effect and research have been carried out to lower the mineral-bitumen mix production temperatures [4, 5, 7, 8, 9, 12]. A new warm mix asphalt (WMA) technology was developed to lower the production temperatures by 20°C to 30°C. However this decrease does not allow to achieve the expected environmental effects in emission reduction. To resolve this problem,

studies are performed to implement the half warm mix asphalt technology which permits the production of the mineral-bitumen mix at ca. 100°C, resulting in up to 80°C temperature reduction.

Another important issue in modern road engineering is the problem of recycling. Cold recycling of asphalt pavements with the use of bituminous emulsion and foamed bitumen binder is widely used [1, 2, 3, 6]. New structural materials, in which recycled substances from other branches of industry could be used, are under development. In this way, waste materials which are a product of almost any production industry instead of being stored could be incorporated into road structure. What is more, new strict environmental regulations are inducted, according to which every existing actions and future developments must realize criteria of: economic efficiency, environmental protection and safety of human health.

The idea of recycling in civil engineering has recently flowered under the slogan of “Environmentally Friendly Roads”. One of the ways to realize this goal is by the use of worn tires, which due to increasing wheel transport and increasing quantities of this

Table 1. Properties of base 35/50 bitumen and the 35/50 F-T wax modified bitumen (3% modification)

Characteristic	Unit of measurement	Test method	Binder	
			35/50	35/50+3.0% F-T
Penetration grade at 25°C	0.1 mm	EN 1426	41	29
Ring and Ball temperature	°C	EN 1427	55.6	72.5
Breaking point temperature	°C	EN 12593	-8	-6

waste, are difficult to dispose or to store [11]. Besides the techniques that use tires as a whole and so called energy recycling (heat recovery during combustion of rubber) are available. A new innovative solution to this problem is to use the ground tire cord. This technology is meant to provide fibers with an addition of rubber granules by grinding whole tires. The introduction of such a material into mineral-bitumen mixes creates a possibility of achieving a pavement with increased durability, rubber modification of the binder and improvement of the mix' rheological characteristics.

Recently, the fiber acquired from processing of the textile tire cord has become especially appealing. This material is composed of synthetic polymer fibers approximately 30 mm long accompanied by rubber granules (40% by mass) characterized by granulation below 8 mm.

Taking those properties into account, the introduction of the recycled tire material may have a significant effect on the characteristics of asphalt concrete produced at lowered temperature range of production and paving. By combining the waste material – recycled tires – and production of the mineral-bitumen mix at lowered temperatures, it may be possible to increase the durability of asphalt concrete along with a significant decrease in the environmental impact of the bituminous pavements.

2. Asphalt concrete mix design

The evaluation of the impact of synthetic fibers and production technology (HMA, WMA, HWMA) was conducted on asphalt concrete mix for binder course layer under traffic load KR3 – KR4. The asphalt concrete mix was designed according to technical guidelines WT-2 2010 [13]. The fiber additive was composed of 20% rubber granules and 80% fibers. One of the effects of the presence of rubber is an increase in fatigue resistance of the asphalt concrete.

2.1. Properties of the bitumen

In the laboratory investigations for the asphalt concrete in the conventional HMA technology for binder course layer according to guidelines WT-2 2010 [13] and European standard EN 13108-1, the 35/50

bitumen was used. For the use in the WMA technology, the bitumen was modified with synthetic Fisher-Tropsh wax (3% content in relationship to the binder). For the HWMA the bitumen was additionally foamed. The modifier used in the research (F-T wax) is an odor-free, granular, milk-like color substance, solidifying at the temperature range from 70 to 100°C. One of the properties of the F-T wax that permit production of asphalt concrete at lower temperatures, is the fact that it decreases the viscosity of bitumen. Selected properties of the base 35/50 bitumen and the 35/50 F-T wax modified bitumen are presented in Table 1.

The synthetic F-T wax is a hard-crystalline long chain aliphatic-polymer paraffin obtained in coal gasification. It is produced by heating coal or natural gas up to 280°C in a presence of catalyst. During this process, the wax solidifies in a form of regular disjointed bars. This form provides the structure that increases the viscosity of bitumen in operation temperatures of a bitumen pavement, which increases its resistance to permanent deformations.

The HWMA technology with foamed bitumen has been under rapid development since the first decade of XXI century. The fundamental parameters of foamed bitumen that decide about its usefulness for this technology, are the expansion ratio (ER) and half-life time ($t_{1/2}$). Those parameters are conditioned, among other things, by the initial temperature of the binder (before foaming) and the amount of foaming water. The characteristics of the foamed 35/50 bitumen modified by 3% content of F-T wax are shown in Figure 1.

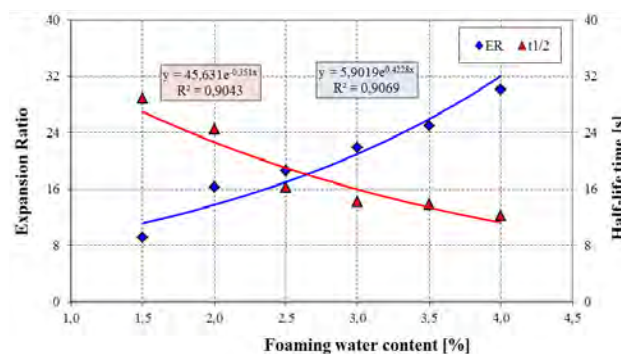


Fig. 1. Characteristics of foamed 35/50 bitumen (with 3% F-T wax content)

Optimum foaming water content of FWC = 2.5% was determined based on the relationship shown in figure 1. The obtained bitumen foam parameters at this point were: ER = 18.6 and $t_{1/2} = 16.3$ s.

2.2. Mix design procedure

The binder course asphalt concrete (AC 16 W) mineral-bitumen mix for KR3 – KR4 traffic load was designed according to European standard EN 13108-1 and technical guidelines WT-2 2010 [13]. The general composition of the mineral mix (MM) is presented in table 2. The grading of the designed mineral mix for the asphalt concrete is presented in Table 3 and Figure 2.

Table 2. The composition of the mineral mix for asphalt concrete AC 16 W

Materials	MM [%]
Limestone, granulated 16/22	15.0
Limestone, granulated 8/16	20.0
Limestone, granulated 2/8	20.0
Lime crushed sand 0/2	26.0
Reclaimed asphalt pavement	15.0
Lime filler	4.0
Total	100.0

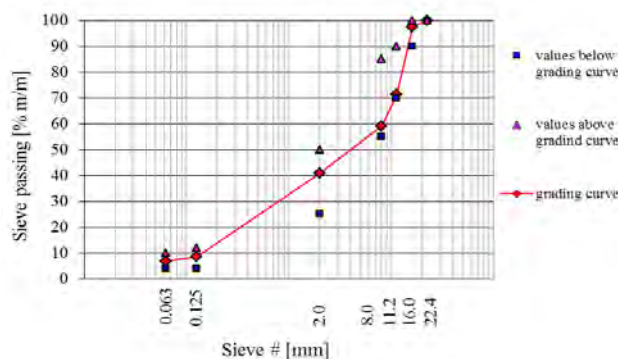


Fig. 2. The designed mineral mix for the asphalt concrete AC16 W

Table 3. Mineral mix grading for the AC16 W

Sieve # [mm]	0.063	0.125	0.25	0.50	2.0	4.0	8.0	11.2	16.0	22.4
Content [%]	6.9	8.5	13.7	21.2	40.9	49.4	59.1	71.3	97.4	100.0

The control mix used to verify the findings was an asphalt concrete mix with 35/50 bitumen (4.8% binder content according to WT-2 2010 [13]) produced in HMA technology (label: M0). Four different types of mineral-bitumen mixes at lowered production temperatures (labels: M1, M2, M3, M4) were designed for the experiment. The mixes differed in synthetic fiber content (0.3% and 0.6%) and in

bitumen binder content. The mixes M1 and M2 were produced in warm technology and the M3 and M4 samples were produced as half warm mixes with the use of foamed bitumen. The binder used for all samples produced at lowered temperatures (WMA, HWMA) was a 35/50 bitumen modified by 3% addition of F-T wax. To achieve required void ratio, it was necessary to increase the binder content up to 5.3%. This was a result of more difficult compaction conditions at lower temperatures and the presence of the introduced fibers. Table 4 presents the contents of bituminous binder and synthetic fibers in the designed mixes, relating to the production method.

Table 4. Bituminous binder and synthetic fiber content in the designed asphalt concrete mixes

Mix signature	Production technology	Bitumen type	Bitumen content [%]	Fiber content [%]
M0	HMA	35/50	4.8	-
M1	WMA	35/50 + 3.0% F-T	4.8	0.3
M2	WMA	35/50 + 3.0% F-T	4.8	0.6
M3	HWMA	35/50 + 3.0% F-T	5.3	0.3
M4	HWMA	35/50 + 3.0% F-T	5.3	0.6

3. Results and discussion

A set of parameters were determined (according to guidelines WT-2 2010 [13] and EN 13108-1) to analyze the influence of the synthetic fiber content and the production technique (HMA, WMA, HWMA) on the characteristics of the asphalt concrete mix for binder course layer (AC 16 W) under traffic load KR3 - KR4. These parameters were:

- air void content (V_m),
- moisture damage resistance, according to WT-2 2010 (Appendix 1) and EN 12697-12, based on:
 - indirect tensile strength of wet (ITS_w) and dry (ITS_d) samples,
 - indirect tensile strength ratio (ITSR),
- resistance to permanent deformation (rutting test in small apparatus, method B in air), according to EN 12697-22 (WTSAIR),
- stiffness modulus in an indirect tensile test (IT-CY) at 20°C, according to EN 12397-26 (Appendix C),
- fatigue resistance in an indirect tensile test (IT-FT), according to EN 12697-24 (Appendix E).

The authors did not observe any negative effect of the introduced fibers on the coating of aggregate by the binder during the asphalt concrete mix production in both WMA and HWMA techniques. What is more, the synthetic fibers were dispersed evenly and correctly during the production and compaction of all the



Fig. 3. Inner structure of Marshall samples – asphalt concrete with synthetic fiber content of 0.6% produced in: a) WMA technology with 4.8% binder content, b) HWMA technology with 5.3% binder content

samples. The example of achieved Marshall samples' inner structure in warm and half warm techniques with the synthetic fibers content of 0.6% is presented in Figure 3.

Average values for air void content in the asphalt concrete related to the type of production technology are shown in Figure 4.

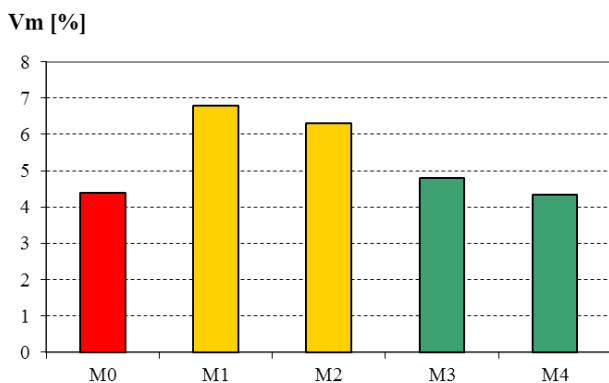


Fig. 4. Air void content in the asphalt concrete AC 16 W related to the type of production technology

The analysis of results, shown in Figure 4, leads to a conclusion that the highest air void contents were observed in samples produced in WMA technology (M1 and M2). Air void contents of HWMA samples are comparable to those obtained from control mixes (M0). This is a result of increased share of the bituminous binder in mixes M3 and M4. The introduction of synthetic fibers in the amount of 0.6%

led to the lowest air void content ($V_m = 4.35\%$). It must be clearly stated that all investigated mixes have met the requirements for air void content according to WT-2 2010 (required values: 4.0 – 7.0%).

Indirect tension tests were conducted to assess the moisture damage resistance of the designed asphalt concretes. The average results of dry samples (ITS_d) and samples conditioned in water and frost (ITS_w) are presented in Figure 5. The indirect tensile strength ratios obtained for the concretes are given in Figure 6.

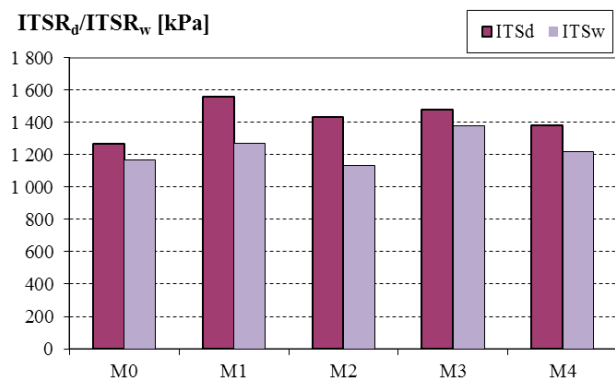


Fig. 5. Indirect tensile strengths of asphalt concrete AC 16 W samples depending on the production process: dry samples (ITS_d) and samples conditioned in water and frost (ITS_w)

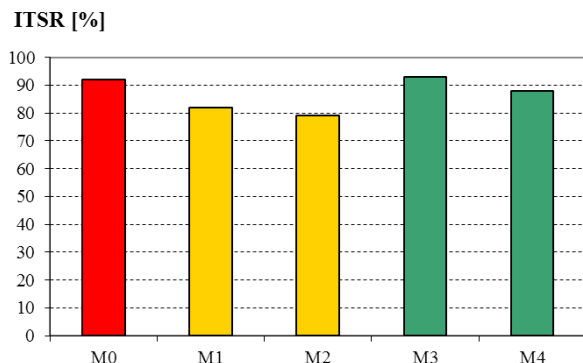


Fig. 6. Moisture damage resistance of asphalt concrete AC 16 W depending on the production process

The obtained results suggest that asphalt concrete M1 has the highest indirect tensile strength after dry conditioning. Results for the M2 mix and HWMA foamed bitumen mixes (M3 and M4) were comparable to those of M1. As for the ITS_w parameter measured after conditioning in water and frost: best results were recorded for the M3 asphalt concrete, but the performance of M4 and M1 mixes were comparable.

The highest resistance to moisture damage (measured by the ITSR parameter) was recorded for HWMA asphalt concrete with foamed bitumen and 0.3% synthetic fiber content. Similar results were obtained for M4 asphalt concrete with 0.6% fiber content. The superior performance of HWMA concretes in this domain is an effect of increased binder content which improves the moisture damage resistance. It is worth noting that the WMA M1 asphalt concrete yielded a lower ITSR ratio than the M0 control mix and according to technical guidelines WT-2 2010 it was on the limit ($ITSR \geq 80$) of filling this criterion. The M2 mix did not meet the requirements ($ITSR = 79\%$).

Another important parameter in the assessment of pavement durability is its resistance to permanent deformations measured by the rate of rut development WTS_{AIR} (Fig. 7).

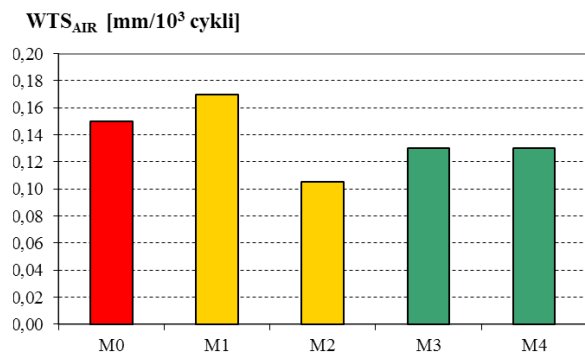


Fig. 7. Permanent deformation resistance of asphalt concrete AC 16 W in relation to production technique – proportional rut development WTS_{AIR} [mm/10³ cycles]

Based on the test results presented in Figure 7 it can be stated that the WMA M2 asphalt concrete with 0.6% fiber content was the most resistant one to permanent strain development. The test outcome was $WTS_{AIR} = 0.105$ mm/10³ cycles. The HWMA samples: M3 and M4 resulted to perform slightly worse, with the WTS_{AIR} parameter ranging from 0.1 to 0.12 mm/10³ cycles. The M1 asphalt concrete shown to be the least resistant to rutting. However, in terms of the requirements ($WTS_{AIR} \leq 0.3$ mm/10³ cycles according to [13]) all tested specimens, regardless of the amount of synthetic fibers used and production technique, yielded to be resistant to rutting.

The fundamental parameter reflecting the mechanical properties of asphalt concrete is the stiffness modulus which is the primary material characteristic used in the mechanistic pavement design. The results for stiffness modulus are presented in Figure 8 and the fatigue damage of assessed materials is shown in Figure 9.

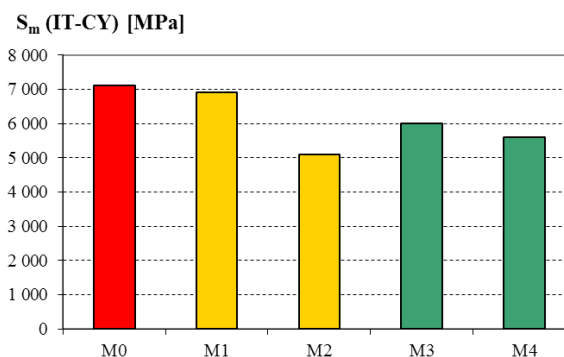


Fig. 8. Stiffness moduli of asphalt concrete, measured in indirect tensile test in relations to production technology

The results of stiffness modulus, measured in indirect tension test, which are presented in Figure 8, show that the conventional HMA M0 control samples yielded highest stiffness moduli at a value of 7131 MPa. Comparable results were obtained for the WMA M1 asphalt concrete samples containing 0.3% addition of synthetic fibers. The use of HWMA technology implied the decrease in the stiffness modulus of 1000 to 1500 MPa in relation to the control asphalt concrete. Also it can be stated that an increase of the synthetic fiber content in asphalt concrete mix results in a decrease of stiffness modulus measured in indirect tension test.

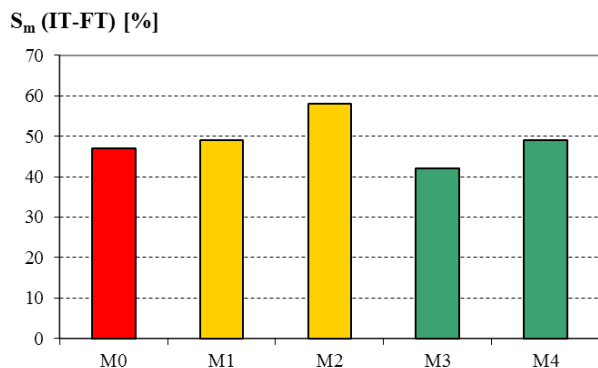


Fig. 9. Fatigue damage of asphalt concrete, measured in indirect tensile test in relations to production technology

The performed analyses show that both factors: the amount of bitumen and synthetic fibers, influence the durability of asphalt concrete measured by a decrease of stiffness modulus in initial phase of fatigue testing according to IT-FT method. The increase of fiber content in asphalt concrete mixes has a positive effect on the magnitude of fatigue, which was observed best in M2 samples with 0.6% fiber content

4. Conclusions

Based on the performed investigations, the following conclusions were drawn:

- there are potential possibilities for the use of synthetic fibers from tire recycling in the technology of asphalt concrete,
- synthetic fibers have a significant influence on the investigated properties of asphalt concrete produced at lowered temperatures (WMA and HWMA with foamed bitumen),
- positive influence of the synthetic fiber on the rutting resistance was particularly observed in the M2 warm mix asphalt concrete and half warm mix asphalt concretes with foamed bitumen (M3 and M4 which had air void contents similar to HMA control samples),
- the use of a fiber from worn tire cord may be a promising application which could contribute to disposing of this waste material and protecting the environment,
- the results presented in this paper show that those fibers can be used in WMA and HWMA production of asphalt concrete but further investigations are needed to clearly assess the influence of this material on the parameters of asphalt concrete and its performance in field tests.

References

- [1] Iwański M.: *Podbudowa z asfaltem spieniony*. Drogownictwo 3, 2006, s. 97-106.
- [2] Iwański M., Chomicz A.: *Przydatność stosowanych w Polsce asfaltów do spieniania*. Drogownictwo 8, 2006 s. 267–27.
- [3] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym*. Drogownictwo Nr 9, 2011, s. 271–277.
- [4] Iwański M., Mazurek G.: *Synthetic Wax Effect on the Resilient Stiffness Modulus of Asphalt Concrete*. Road and Bridges No 3, Vol. 11. Warszawa, 2012, pp. 233–248.
- [5] Iwański M., Mrugała J.: *Beton asfaltowy w technologii na półciepło z asfaltem spienianym*. Drogownictwo Nr 4, 2013, s. 110–115.
- [6] Jenkins K.J., Collings D.C, Thesey H.L., Long F.M.: *Interim Technical Guideline Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials*. Edited by Les Sampson of Asphalt Academy. ISBN 0-7988-7743-6. Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, 2003.
- [7] Judycki J., Stienss M.: *Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otoczenia – raport końcowy*, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk 2011.
- [8] Judycki J., Stienss M.: *Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło – przegląd dodatków*. Drogownictwo 7-8/2010, s. 227–232.
- [9] Król J., Matraszek K., Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K.J.: *Właściwości lepizszy asfaltowych modyfikowanych parafinami nowej generacji*. Projekt MMA – cz. 1, Autostrady, 5/2011, s. 72–76.
- [10] Piłat J., Radziszewski P.: *Nawierzchnie asfaltowe*. WKŁ, Warszawa 2010.
- [11] Sybilski D.: *Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym*. Przegląd budowlany 5/2009, s. 37–44.
- [12] Thorsten Butz: *Warm Asphalt Mix – Technologies, Research and Experience*, Sasol Wax GmbH. Warm Mix Asphalt technology, AASHTO standing committee on highways technical meeting, Nashville, 2005.
- [13] *Wymagania techniczne – Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych*. Mieszanki mineralno-asfaltowe (WT-2 2010). IBDiM, Warszawa 2010.

Mateusz M. Iwański
Anna Chomicz-Kowalska

Wpływ włókien syntetycznych na właściwości betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonej temperaturze

1. Wprowadzenie

Konstrukcja nawierzchni drogowej przenosi coraz to większe obciążenia. W związku z tym, niezbędne jest zwiększenie trwałości zmęczeniowej materiałów stosowanych do jej wykonania, a przede wszystkim wykorzystywanych do budowy asfaltowych warstw jezdnych [10]. Technologie związane z wykonawstwem tego rodzaju materiałów charakteryzują się dużą energochłonnością. Wytwarzane są one bowiem w temperaturze od 160°C do 180°C, która uzależniona jest od rodzaju asfaltu stosowanego do mieszanki mineralno-asfaltowej. Tego rodzaju technologie na całym świecie poddawane są krytyce, ponieważ wpływają negatywnie na środowisko naturalne. Dlatego też podjęto prace badawcze w drogownictwie w celu obniżenia temperatury wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej [4, 5, 7, 8, 9, 12]. Opracowano technologię pozwalającą zmniejszyć temperaturę jej produkcji i wbudowywania w konstrukcję nawierzchni drogowej o około 20-30°C, którą nazwano technologią na ciepło (WMA – Warm Mix Asphalt). Prowadzone są również badania oraz prace wdrożeniowe dotyczące technologii na półciepło (HWMA – Half Warm Mix Asphalt), która pozwala wytwarzać mieszankę mineralno-asfaltową w temperaturze około 100°C.

Również bardzo istotnym współczesnym problemem jest stosowanie recyklingu w drogownictwie. Dość powszechnie stosowana jest technologia recyklingu na zimno konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem jako lepiszcza emulsji asfaltowej lub asfaltu spienionego [1, 2, 3, 6].

Technologie recyklingu szczególnie silnie rozwijają się ostatnio w budownictwie, gdzie między innymi wykorzystuje się zużyte opony, których składowanie staje się coraz poważniejszym problemem z uwagi na dynamiczny rozwój motoryzacji i wzrost liczby pojazdów [11]. Technologia wykorzystująca zmielony kord z opon samochodowych ma na celu uzyskanie

z opony włókien z dodatkiem granulatu gumowego. Wprowadzenie takiego włókna do mieszank mineralno-asfaltowych stwarza potencjalne możliwości m.in.: uzyskania nawierzchni o podwyższonej trwałości, modyfikacji lepiszcza obecną w dodatku gumą oraz poprawę właściwości reologicznych mieszanki.

Szczególnie interesujące jest ostatnio pozyskiwane włókno powstałe z przeróbki kordu tekstylnego opon składające się z syntetycznych włókien polimerowych o długości około 30 mm. Ponadto w materiale włóknistym występuje granulaty gumowy w ilości 40% (m/m) o uziarnieniu do 8 mm.

W związku z tym, połączenie wykorzystania materiału odpadowego – recyklowanych opon samochodowych oraz technologii produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej w obniżonej temperaturze może przyczynić się do podwyższenia trwałości betonu asfaltowego oraz znacznej ochrony środowiska

2. Projekt betonu asfaltowego

Oceną wpływu włókien syntetycznych oraz technologii wytwarzania (HMA, WMA, HWMA) wykonano dla betonu asfaltowego przeznaczonego na warstwę wiążącą konstrukcji nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4. Beton asfaltowy zaprojektowano zgodnie z Wytycznymi Technicznymi WT-2 z 2010 roku [13]. Zastosowany dodatek włóknisty zawiera w swoim składzie około 20% granulatu gumowego. Obecność gumy powoduje m.in. podwyższenie trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego.

2.1. Właściwości asfaltu

W badaniach laboratoryjnych do mieszanki betonu asfaltowego wytwarzanej w tradycyjnej technologii na gorąco przeznaczonej na warstwę wiążącą nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4 zgodnie z Wytycznymi WT-2 2010 [13] oraz PN-EN-13108-1 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania. Część 1: Beton asfaltowy” zastosowano asfalt 35/50. Asfalt ten w celu wykorzystania go w technologii WMA

modyfikowany był woskiem syntetycznym F-T (Fisher-Tropsha) w ilości 3% w stosunku do masy lepiszcza. Natomiast w celu zastosowania go w technologii HWMA poddany był dodatkowo procesowi spieniania (rys. 1).

Na podstawie przedstawionej zależności ustalono optymalną zawartość wody spieniającej na poziomie $FWC = 2,5\%$ (Foaming Water Content), przy której piana asfaltowa cechuje się następującymi parametrami: $WE = 18,6$ i $t_{1/2} = 16,3s$.

2.2. Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanka mineralna betonu asfaltowego na warstwę wiążącą (AC 16 W) nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4 zaprojektowana została zgodnie z normą PN-E-13108-1 oraz Wytycznymi WT-2 2010 [13]. Skład ramowy mieszanki mineralnej (MM) zestawiono w tabeli 2. Uziarnienie zaprojektowanej mieszanki mineralnej betonu asfaltowego zestawiono w tabeli 3 oraz graficznie przedstawiono na rysunku 2.

2.3. Projekt mieszanki mineralno-asfaltowej

W badaniach laboratoryjnych kontrolną mieszankę stanowił beton asfaltowy wytwarzany w tradycyjnej technologii na gorąco (M0), w którym stosowano asfalt 35/50. Następnie zaprojektowano 4 rodzaje mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonych temperaturach wytwarzania (M1, M2, M3, M4), które zawierały włókna syntetyczne w ilości 0,3% i 0,6% oraz różniły się zawartością lepiszcza asfaltowego. Mieszanki oznaczone symbolem M1 i M2 produkowano w technologii na ciepło, natomiast mieszanki M3 i M4 wytwarzano w technologii na półciepło z zastosowaniem asfaltu spienionego. W mieszankach o obniżonych temperaturach produkcji (WMA, HWMA) stosowano lepiszcze 35/50 z zawartością 3,0% modyfikatora F-T. Zawartość asfaltu w kontrolnej mieszance ustalono na poziomie 4,8% zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2 2010 [13]. Ze względu na niższą temperaturę wytwarzania mieszanki w technologii na półciepło wpływającą na pogorszenie warunków jej zagęszczania oraz dodatkowo ze względu na obecność materiału włóknistego w składzie betonu asfaltowego istniała konieczność stosowania większej ilości lepiszcza asfaltowego (5,3%) w celu uzyskania wymaganego poziomu zawartości wolnych przestrzeni. W tabeli 4 zestawiono zawartości lepiszcza asfaltowego oraz włókien syntetycznych w zaprojektowanych mieszankach betonu asfaltowego w zależności od stosowanej technologii ich produkcji.

3. Wyniki badań i ich analiza

W celu oceny wpływu włókien syntetycznych oraz technologii wytwarzania (HMA, WMA, HWMA) na zmiany właściwości betonu asfaltowego do warstwy wiążącej (AC 16 W) nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4 zgodnie z procedurami badawczymi przedstawionymi w Wymaganiami Technicznymi WT-2 2010 [13] oraz PN-EN 13108-1 oznaczono:

- zawartości wolnych przestrzeni V_m (rys. 4),
- odporność na działanie wody na podstawie oceny:
 - wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla grupy próbek mokrych ITSw i suchych ITSs (rys. 5),
 - wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR (rys. 6),
- odporność na powstawanie deformacji trwałych na podstawie pomiaru prędkości przyrostu koleiny w $60^{\circ}C$ WTSAIR (rys. 7),
- moduł sztywności w schemacie pośredniego rozciągania (IT-CY) w temperaturze $20^{\circ}C$ (rys. 8),
- odporność na zmęczenie metodą pośredniego rozciągania (IT-FT) (rys. 9).

W czasie wytwarzania betonu asfaltowego zarówno w technologii WMA, jak i HWMA z asfaltem spienionym, nie zaobserwowano negatywnego wpływu włókien syntetycznych na proces obtaczania lepiszczem ziaren kruszywa mieszanki mineralnej. Włókna syntetyczne rozkładały się prawidłowo w czasie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej oraz podczas procesu jej zagęszczania niezależnie od zastosowanej technologii, ich ilości oraz zawartości asfaltu. Widok struktury wewnętrznej próbek Marshalla z betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii na ciepło i półciepło z zawartością 0,6% włókien syntetycznych przedstawiono na rysunku 3.

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić istotny wpływ włókien syntetycznych zawartych w składzie betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonej temperaturze (WMA i HWMA) na analizowane jego właściwości. Szczególnie istotny jest wzrost odporności na powstawanie deformacji trwałych betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii HWMA z asfaltem spienionym.

4. Wnioski

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- istnieją potencjalne możliwości wykorzystania włókien syntetycznych powstałych w procesie recyklingu opon samochodowych w technologii betonu asfaltowego;

- włókna syntetyczne w istotny sposób wpływają na analizowane właściwości betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonej temperaturze, to jest w technologii WMA i HWMA z asfaltem spienionym;
- szczególnie korzystny jest wpływ włókien syntetycznych na odporność na koleinowanie betonu asfaltowego M2 wytwarzanego w technologii WMA oraz betonu asfaltowego (M3 i M4) otrzymanego w technologii HWMA z asfaltem spienionym; przy czym beton asfaltowy M3 i M4 charakteryzuje się zawartością wolnych przestrzeni na poziomie kontrolnego betonu asfaltowego wytwarzanego w tradycyjnej technologii na gorąco;
- stosowanie włókna powstałego z kordu zużytych opon samochodowych do betonu asfaltowego może być istotną propozycją w znacznym stopniu przyczyniającą się do rozwiązania problemu utylizacji tego rodzaju materiału i wpływającą w istotny sposób na ochronę środowiska naturalnego;
- przedstawione w opracowaniu wyniki pozwalają stwierdzić, że wykorzystanie włókien może być rozszerzone o stosowanie ich w technologii wytwarzania betonu asfaltowego WMA lub HWMA. Niezbędne jest jednak wykonanie dodatkowych badań pozwalających na jednoznaczną ocenę wpływu włókien syntetycznych na właściwości betonu asfaltowego oraz jego pracy w konstrukcji nawierzchni w warunkach terenowych.