



MARCIN BILSKI¹⁾
 MARTA MIELCZAREK²⁾
 PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ³⁾
 MIECZYŚLAW SŁOWIK⁴⁾
 PATRYCJA WOJCIECHOWSKA⁵⁾

THE EFFECT OF THE MIXING METHOD OF THE ADDITION OF GILSONITE NATURAL BITUMEN ON ASPHALT MIXTURE PROPERTIES

OCENA WPŁYWU SPOSOBU DOZOWANIA DODATKU ASFALTU NATURALNEGO GILSONITE NA WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) typu beton asfaltowy, które zawierały w swoim składzie dodatek asfaltu naturalnego Gilsonite w ilości 4% w stosunku wagowym do masy asfaltu, dozowany dwiema metodami: „na mokro” lub „na sucho”. Zakres przeprowadzonych badań laboratoryjnych obejmował oznaczenie modułów sztywności w badaniach pośredniego rozciągania, modułów sztywności metodą pełzania pod obciążeniem statycznym oraz odporności na działanie wody i mrozu. Na podstawie analizy statystycznej otrzymanych wyników badań laboratoryjnych dokonano oceny istotności różnic w uzyskanych właściwościach MMA zawierających dodatek Gilsonite dozowany różnymi metodami, w porównaniu do wartości uzyskanych na mieszance referencyjnej. Ustalono, że metoda dozowania („na mokro” lub „na sucho”) dodatku asfaltu naturalnego Gilsonite do analizowanej mieszanki mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy nie ma istotnego wpływu na wartości modułów sztywności oznaczonych metodą IT-CY, metodą pełzania, a także na wartości wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie *ITSR*.

SŁOWA KLUCZOWE: asfalt naturalny Gilsonite, mieszanka mineralno-asfaltowa, test pełzania, odporność na działanie wody i mrozu.

ABSTRACT. The paper presents the results of laboratory tests performed on asphalt concrete mixtures modified with addition of Gilsonite natural bitumen (4% content in the weight of binder). Gilsonite was introduced into asphalt concrete using two methods: wet mixing and dry mixing. The laboratory tests encompassed determination of stiffness modulus in indirect tensile test, stiffness modulus in static creep test and resistance to water and frost. Based on statistical analysis of the obtained results, significance of differences was evaluated for the parameters of asphalt concrete modified with addition of Gilsonite (both wet-mixed and dry-mixed) and an unmodified reference mixture. It was determined that the method ("wet" or "dry") of mixing Gilsonite into the analyzed asphalt concrete mixture does not have a significant effect on the values of stiffness modulus in IT-CY test, static creep test stiffness modulus or the indirect tensile strength ratio *ITSR*.

DOI: 10.7409/rabdim.022.014

KEYWORDS: asphalt mixture, creep test, Gilsonite natural bitumen, water and frost resistance.

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; marcin.bilski@put.poznan.pl

²⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; marta.mielczarek@put.poznan.pl

³⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; przemyslaw.gomas@put.poznan.pl

⁴⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl

⁵⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; patrycja.wojciechowska@student.put.poznan.pl

1. WSTĘP

Asfalt naturalny Gilsonite zalicza się do grupy asfaltytów – błyszczących, czarnych, stałych węglowodorów, które z wyglądu przypominają węgiel kamienny [1]. Asfaltyty występują na całym świecie pod różnymi nazwami. Charakteryzują się one nieznacznymi różnicami w składzie chemicznym, w porównaniu z asfaltami naturalnymi zaliczanymi do grupy piasków roponośnych, takich jak Trinidad Lake Asphalt czy Selenizza [1, 2]. Złoża Gilsonite występują w północno-wschodniej części stanu Utah (USA). Surowiec ten jest naturalną mieszaniną (w przeliczeniu na masę produktu): węgla – 85%, wodoru – 10%, azotu – 3% oraz tlenu, siarki i pozostałych składników w ilości około 2% [3]. Zazwyczaj po wydobyciu Gilsonite jest poddawany kruszeniu i dostarczany do klientów w postaci granulatu o wielkości ziaren 0/2 mm lub sproszkowanej. Gilsonite ze względu na pochodzenie, skład chemiczny i dużą masę cząsteczkową charakteryzuje się dobrym powinowactwem z asfaltem [4] i jest stosowany jako dodatek do mieszanek mineralno-asfaltowych. Dodanie asfaltu naturalnego Gilsonite do mieszanki mineralno-asfaltowej powoduje jej usztywnienie, co zwiększa odporność warstw asfaltowych na powstawanie deformacji trwałych [5-8], lecz jednocześnie przyczynia się do wzrostu podatności na spękania niskotemperaturowe i zmęczenie [6, 9].

Gilsonite może być zastosowany w mieszance mineralno-asfaltowej na dwa sposoby, tzn. metodą „na mokro” przez rozpuszczenie dodatku bezpośrednio w asfalcie [6-8, 10-13] lub metodą „na sucho”, w której dodatek dozuje się bezpośrednio do bębna otaczarki w procesie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej [8, 14]. Sposób dodawania asfaltów naturalnych do mieszanek mineralno-asfaltowych można porównać z przykładami wykorzystania granulatu gumowego, który również można dozować na dwa sposoby, tzn. „na mokro” lub „na sucho” [15-17]. Z punktu widzenia technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem Gilsonite wygodniejsze jest zastosowanie metody „na sucho” ze względu na brak dodatkowego etapu technologicznego polegającego na osobnym wytwarzaniu lepiszcza modyfikowanego. W przypadku metody „na mokro” proces wytworzenia mieszanki mineralno-asfaltowej wymaga dodatkowych kosztów związanych z wyższą temperaturą produkcji (zachodzi proces przegrzewania asfaltu, który może mieć wpływ na szybszy proces jego starzenia [9, 18]), w celu uzyskania lepiszcza modyfikowanego będącego mieszaniną asfaltu drogowego i naturalnego.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że autorzy wybranych prac badawczych [9, 19, 20] dotyczących wpływu zastosowania dodatku Gilsonite na zmianę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystują metodę „na mokro”, tzn. roz-

1. INTRODUCTION

Gilsonite is a natural bitumen that belongs to asphaltites – shiny, black, solid hydrocarbons resembling coal [1]. Asphaltites occur worldwide and are known under various names. In comparison with natural bitumens from the group of rope sands, such as Trinidad Lake Asphalt or Selenizza, asphaltites are characterized by minor differences in chemical composition. Deposits of Gilsonite are located in north-eastern Utah. The material is a natural mixture of (percentages given by mass): carbon – 85%, hydrogen – 10%, nitrogen – 3%, and oxygen, sulfur and other components – around 2% [3]. Gilsonite is typically crushed after mining and is supplied in the form of granulated 0/2 mm grains or powder. Owing to its origin, chemical composition and high molecular mass, Gilsonite displays good affinity to bitumen [4] and is used as an additive in asphalt mixtures. Addition of Gilsonite increases the stiffness of the asphalt mixture, thus improving resistance of the asphalt courses to permanent deformation [5-8], but simultaneously contributing to their greater susceptibility to thermal and fatigue cracking [6, 9].

Gilsonite may be introduced into an asphalt mixture using two methods – it may be wet-mixed with the bitumen and dissolved [6-8, 10-13] or dry-mixed in a mixing plant during asphalt mixture production [8, 14]. The manner of addition of natural bitumen to asphalt mixtures may be likened to the usage of crumb rubber, which may also be wet-mixed or dry-mixed [15-17]. In the perspective of asphalt production technology, dry mixing of Gilsonite into the mix is more convenient, as it does not require the additional technological stage consisting in separate production of Gilsonite-modified binder. In the case of wet mixing, the production process is more costly due to the higher production temperatures required to obtain a mixture of road and natural bitumen (moreover, overheating of the bitumen may accelerate its aging [9, 18]).

It is noteworthy that the authors of chosen research works [9, 19, 20] on the effect of Gilsonite addition on asphalt mixture properties use the wet mixing method, i.e. they dissolve the natural bitumen in the road bitumen. However, this procedure is not necessary in the case of natural bitumens [2], as opposed to typical modifiers such as polymers [21-23] or synthetic waxes [24, 25]. The authors of [8] observed significant differences in stiffness moduli obtained for asphalt mixtures containing wet-mixed and dry-mixed Colombian natural bitumen. Therefore, the authors of this paper decided to analyze the effect of the adopted mixing method on selected properties of Gilsonite-modified asphalt mixtures.

puszczają dodatek asfaltu naturalnego bezpośrednio w asfalcie drogowym, co w przypadku asfaltów naturalnych [2] nie jest konieczne, w odróżnieniu od typowych modyfikatorów takich jak polimery [21-23] lub woski syntetyczne [24, 25]. W pracy [8] zaobserwowano istotne różnice w oznaczonych wartościach modułów sztywności próbek MMA sporządzonych przy zastosowaniu metody „na mokro” oraz „na sucho” przy dozowaniu asfaltu naturalnego ze złóż w Kolumbii, stąd autorzy niniejszego artykułu podjęli się analizy wpływu sposobu dozowania dodatku asfaltu naturalnego Gilsonite na wybrane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest ocena wpływu metody dozowania dodatku asfaltu naturalnego Gilsonite, tj. w technologii „na sucho” i „na mokro”, na uzyskane właściwości wytworzonej mieszanki mineralno-asfaltowej. Badania dotyczyły oznaczenia modułów sztywności w badaniach pośredniego rozciągania, modułów sztywności metodą pełzania pod obciążeniem statycznym oraz odporności na działanie wody i mrozu wybranej mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do warstwy podbudowy.

3. MATERIAŁY

3.1. LEPI SZCZE ASFALTOWE

W badanych mieszankach mineralno-asfaltowych zastosowano dwa rodzaje lepiszczy: asfalt drogowy 50/70 wyprodukowany z ropy uralskiej oraz lepiszcze modyfikowane składające się z asfaltu drogowego 50/70 i dodatku 4% (w stosunku wagowym) asfaltu naturalnego Gilsonite. Zawartość dodatku Gilsonite (skład i charakterystyka przedstawiona w punkcie 1 i zgodna z [26]) została przyjęta na podstawie wcześniejszych badań autorów przedstawionych m.in. w pracach [9, 26-28]. Dodatek Gilsonite zastosowano w postaci sproszkowanej o uziarnieniu poniżej 2 mm. Właściwości zastosowanych lepiszczy asfaltowych zestawiono w Tabl. 1.

Procedura przygotowania lepiszcza modyfikowanego polegała na rozgrzaniu asfaltu drogowego 50/70 do temperatury 170°C oraz, po uzyskaniu ciekłej konsystencji, dodaniu 4% asfaltu naturalnego Gilsonite w stosunku wagowym do masy asfaltu modyfikowanego. Dodatek Gilsonite dozowano małymi porcjami przy jednoczesnym mieszaniu powstałego lepiszcza modyfikowanego szklaną pałeczką w celu zapobiegnięcia zbrzylaniu się Gilsonite. Następnie powstałe lepiszcze poddawano przez 15 minut wygrzewaniu w temperaturze 170°C (wybór zastosowanej temperatury związany jest z faktem, że asfalt naturalny Gilsonite charakteryzuje się temperaturą mięknięcia > 160°C [24]), po którym przeprowadzono proces ujednorodniania przy zastosowaniu homogenizatora (prędkość mieszania 200 obr./minutę przez okres 3 minut). Na podstawie wartości

2. THE AIM AND SCOPE OF THE WORK

The aim of the work is to evaluate the effect of the mixing method of Gilsonite natural bitumen (i.e. wet mixing or dry mixing) on the properties of the produced asphalt mixture. The research encompassed testing of stiffness modulus in indirect tension, stiffness modulus in static creep test and resistance to water and frost of a chosen asphalt mixture dedicated for asphalt base courses.

3. MATERIALS

3.1. BITUMINOUS BINDER

Two types of binder were used in the tested asphalt mixtures: road bitumen 50/70 (produced from Urals oil) and modified binder consisting of the 50/70 road bitumen with 4% content of Gilsonite (by weight). Content of Gilsonite (composition and characteristics shown in section 1 and consistent with [26]) was adopted based on previous research by the authors, including the works [9, 26-28]. Gilsonite was used in pulverized form, with grading below 2 mm. Properties of the bituminous binders are given in Table 1.

Table 1. Basic properties of the used bituminous binders

Tablica 1. Podstawowe właściwości zastosowanych lepiszczy asfaltowych

Property / Właściwość	Bituminous binder Lepiszcz e asfaltowe	
	50/70	50/70 + 4% Gilsonite
Penetration at 25°C [0.1 mm] according to PN-EN 1426:2015 Penetracja w 25°C [0,1 mm] wg PN-EN 1426:2015	61.4 ± 0.3	41.8 ± 0.4
Softening point [°C] according to PN-EN 1427:2015 Temperatura mięknięcia [°C] wg PN-EN 1427:2015	49.8 ± 0.4	53.2 ± 0.2
Performance Grade	70-28	76-28

Preparation procedure of the Gilsonite-modified binder consisted in heating of the 50/70 road bitumen to the temperature of 170°C, bringing the bitumen to liquid consistency and adding Gilsonite natural bitumen to obtain its content of 4% (by weight of the modified binder). Gilsonite was added to the binder in small doses; the binder was being simultaneously stirred with a glass rod in order to prevent consolidation of Gilsonite into lumps. The obtained binder was subsequently kept at the temperature of 170°C for 15 minutes (this temperature was chosen due to the fact that the softening point of Gilsonite is > 160°C [24]). The binder was then homogenized in

zebranych w Tabl. 1 można zauważyć, że po zastosowaniu dodatku Gilsonite w ilości 4% uzyskano lepszycze o właściwościach spełniających podstawowe wymagania dla asfaltu drogowego gatunku 35/50 wg PN-EN 12591.

3.2. KRUSZYWO

W badanych mieszankach mineralno-asfaltowych zastosowano kruszywo granodiorytowe o frakcjach: 0/2, 2/5, 5/8, 8/11 i 11/16. Granodioryt jest gębinową skałą magmową o zabarwieniu biało-szarym i strukturze gruboziarnistej, charakteryzującą się kwaśnym odczynem chemicznym i dużą odpornością na polerowanie. Jako wypełniacz w mieszance mineralno-asfaltowej zastosowano mączkę wapienną.

3.3. MIESZANKA MINERALNO-ASFALTOWA

Zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu beton asfaltowy do warstwy podbudowy o uziarnieniu kruszywa do 16 mm. Skład ziarnowy mieszanki mineralno-asfaltowej został zaprojektowany z zastosowaniem metody krzywej najlepszego uziarnienia. Zaprojektowaną krzywą uziarnienia mieszanki mineralnej (kolor niebieski) przedstawiono wraz z krzywymi granicznymi (kolor czarny) na Rys. 1. Zważywszy na fakt, że zastosowany dodatek Gilsonite zawiera tylko 1% składników mineralnych [29], pominięto wprowadzenie korekty składu ziarnowego wynikającej z jego zastosowania.

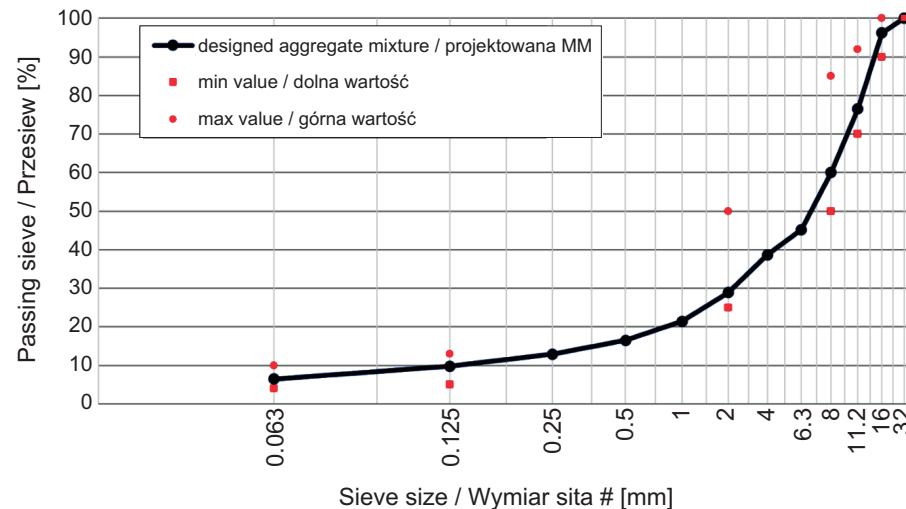


Fig. 1. Particle size distribution curve of the designed aggregate mixture
Rys. 1. Krzywa uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej

Przy ustalaniu zawartości lepszycza w mieszance mineralno-asfaltowej uwzględniono gęstość zastosowanego kruszywa równą $2,715 \text{ Mg/m}^3$ oraz minimalną wymaganą zawartość asfaltu, która w tym przypadku wynosi 4,4% według dokumentu WT-2 2014 - część 1. Asfalt naturalny Gilsonite dozowano na dwa sposoby tzn. metodą „na mokro” lub „na sucho”. W przypadku metody „na mokro” wymieszano dodatek asfaltu naturalnego z asfaltem drogowym 50/70, a następnie dodano już zmodyfikowany asfalt do mieszanki mineralnej. W metodzie

a homogenizer (mixing rate of 200 rpm, time of 3 minutes). Values presented in Table 1 indicate that the use of 4% Gilsonite content provided binder properties meeting the basic requirements for road bitumen 35/50 according to the PN-EN 12591 standard.

3.2. AGGREGATE

The tested asphalt mixtures were produced using granodiorite aggregate of the following fractions: 0/2, 2/5, 5/8, 8/11 and 11/16. Granodiorite is a plutonic rock of white-gray coloring, coarse-grained structure, acidic character and high polishing resistance. Limestone powder was used as filler in the asphalt mixture.

3.3. ASPHALT MIXTURE

An asphalt concrete mixture dedicated for asphalt base courses was designed with aggregate size of up to 16 mm. Particle size distribution of the aggregate mix was designed using the best grading curve method. The designed grading curve (black) and the limit curves (red) are shown in Fig. 1. Since Gilsonite contains only 1% of mineral components [29], no corrections were introduced in particle size distribution of the aggregate due to the use of the additive.

Target bitumen content in the asphalt mixture was determined taking into account the density of the aggregate (2.715 Mg/m^3) and the required minimum bitumen content according to the document WT-2 2014 - part 1, which in this case equals 4.4%. Gilsonite natural bitumen was added using two methods, i.e. wet-mixed and dry-mixed. In the case of the “wet” method, the addition of Gilsonite was first mixed with the 50/70 road bitumen and then the obtained modified binder was added to the aggregate mix.

dozowania „na sucho” asfalt naturalny dodano w postaci sproszkowanej bezpośrednio do kruszywa w ilości 4% w stosunku do masy asfaltu 50/70 dodawanego w kolejnym etapie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej. Przyjęto następujące oznaczenia: AC - mieszanka mineralno-asfaltowa referencyjna (bez dodatku Gilsonite), AC WET – mieszanka zawierająca dodatek Gilsonite dozowany „na mokro”, AC DRY – mieszanka z Gilsonite dozowanym metodą „na sucho”. Mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające asfalt drogowy 50/70 oraz lepsze modyfikowane (asfalt 50/70 z dodatkiem 4% Gilsonite) zostały przygotowywane w takim samym reżimie technologicznym (taka sama temperatura wykonania i zagęszczenia, ze względu na zbliżoną wartość temperatury mięknięcia – różnica wynosi 3,4°C). Przygotowane mieszanki mineralno-asfaltowe podzielono na odpowiednie porcje przeznaczone do wykonania próbek Marshalla zgodnie z normą PN-EN 12697-30. Próbki przeznaczone do oznaczenia modułów sztywności w teście pośredniego rozciągania i modułów sztywności metodą pełzania pod obciążeniem statycznym w urządzeniu Nottingham Asphalt Tester (NAT) zostały zagęszczone metodą ubijania poprzez wykonanie 75 uderzeń na każdą stronę (podstawę) próbki walcowej. Dla każdej z tych dwóch metod badania przygotowano po 15 próbek (3 zestawy po 5 próbek dla każdego rodzaju badanej mieszanki mineralno-asfaltowej). W przypadku badania odporności na działanie wody i mrozu przygotowano dla każdego rodzaju badanej MMA zestaw próbek zgodnie z WT-2 (zał. 1), które zostały zagęszczone poprzez wykonanie 35 uderzeń na każdą stronę próbki. Następnie każdy z zestawów podzielono na dwie równe części, otrzymując w ten sposób dwie grupy próbek, tzn. próbki wykorzystane bezpośrednio w badaniu oraz próbki, które przed badaniem poddano kondycjonowaniu.

4. METODY BADAŃ

4.1. OZNACZANIE MODUŁU SZTYWNOŚCI W TEŚCIE POŚREDNIEGO ROZCIĄGANIA

Badanie IT-CY (ang. *Indirect Tensile test on Cylindrical Specimens*) wykonano zgodnie z normą PN-EN 12697-26 przy zastosowaniu urządzenia Nottingham Asphalt Tester (NAT). Przygotowane uprzednio próbki walcowe (z zaznaczonymi dwiema średnicami przecinającymi się pod kątem 90°) termostatowano w komorze termicznej urządzenia NAT w temperaturze 20°C przez okres 12 h. Następnie każdą z próbek umieszczano pojedynczo w ramie obciążającej w urządzeniu NAT, w taki sposób, aby jedna z narysowanych średnic była w pozycji pionowej. Następnie wykonano 10 impulsów kondycjonujących w celu oznaczenia wartości maksymalnej siły obciążającej tak, aby wartość poziomego przemieszczenia próbki wynosiła $5 \pm 2 \mu\text{m}$. Następnie próbka została poddana

In the “dry” method, pulverized Gilsonite was added directly to the aggregate; the quantity of Gilsonite was selected in order to obtain its content of 4% (by weight) in the final binder, based on the 50/70 bitumen, which was added afterwards in the production process. The following designations were adopted: AC – reference asphalt concrete (without Gilsonite), AC WET – asphalt concrete containing wet-mixed Gilsonite, AC DRY – asphalt concrete containing dry-mixed Gilsonite. The asphalt mixtures containing 50/70 road bitumen and the modified binder (the 50/70 bitumen with 4% content of Gilsonite) were prepared in the same technological conditions (the same production and compaction temperatures – due to similar softening point values, which differed by 3.4°C). The prepared asphalt mixtures were adequately portioned for preparation of Marshall specimens according to the PN-EN 12697-30 standard. Cylindrical specimens for determination of stiffness moduli in the indirect tensile test and the static creep test in the Nottingham Asphalt Tester (NAT) device were compacted with 75 blows per side. A total of 15 specimens was prepared for each stiffness modulus test method (a set of 5 specimens for each of the 3 mixtures). In the case of water and frost resistance testing, a set of specimens was prepared for each mixture according to WT-2 (Appendix 1) and compacted with 35 blows per side. Every set assigned to this test was then divided into two parts; one was intended for direct testing and the other was to be conditioned prior to testing.

4. TEST METHODS

4.1. STIFFNESS MODULUS IN THE INDIRECT TENSILE TEST

The Indirect Tensile Test on Cylindrical Specimens (IT-CY) was performed according to the PN-EN 12697-26 standard using the Nottingham Asphalt Tester (NAT) device. The produced cylindrical specimens (with two perpendicular diameters marked with chalk) were first conditioned for 12 hours in the thermal chamber of the NAT device at the constant temperature of 20°C. They were then successively placed in the NAT loading frame in such a manner that one of the marked diameters was oriented vertically. Each specimen was subjected to 10 conditioning load impulses applied in order to determine the maximum loading force that would result in horizontal deformation of the specimen of $5 \pm 2 \mu\text{m}$. Each specimen was then subjected to 5 test impulses with loading force growth time of $124 \pm 4 \text{ ms}$ at intervals of $3 \pm 0.1 \text{ s}$. In the next step the specimen was rotated by $90^\circ \pm 10^\circ$ and the measurement procedure was repeated. Using the recorded values of the

5 impulsom pomiarowym w odstępach co $3 \pm 0,1$ s, a czas przyrostu siły wynosił 124 ± 4 ms. W kolejnym kroku odwracano próbkę o $90^\circ \pm 10^\circ$ i powtarzano procedurę pomiaru. Wykorzystując zarejestrowane wartości siły obciążającej oraz wartości przemieszczenia poziomego obliczono wartości modułu sztywności sprężystej S_{IT-CY} dla poszczególnych impulsów siły wg wzoru:

$$S_{IT-CY} = \frac{P}{\Delta \cdot h} \cdot (0,02732 + \nu) \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

gdzie:

P – maksymalna wartość siły [N],

Δ – maksymalna wartość przemieszczenia poziomego [mm],

h – wysokość próbki [mm],

ν – współczynnik Poissona (przyjęto $\nu = 0,35$ zgodnie z zapisem normy PN-EN 12697-26:2012).

Ostateczną wartość modułu sztywności sprężystej S_{IT-CY} pojedynczej próbki obliczono jako średnią arytmetyczną z wartości modułów sztywności odpowiadających dwóm pozycjom próbki (po obrocie o kąt 90°).

4.2. OZNACZANIE MODUŁU SZTYWNOŚCI MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ METODĄ PEŁZANIA PRZY OBCIĄŻENIU STATYCZNYM

Badanie pełzania próbki walcowej pod obciążeniem statycznym wykonano w celu oznaczenia wartości modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej w temperaturze 40°C [30]. Badanie rozpoczyna się od wstępnego obciążenia próbki tak, aby wywoływać w niej naprężenie ściskające o wartości 2,0 kPa przez okres 2 minut, po czym przykłada się obciążenie badawcze, wywołując w próbce naprężenie ściskające o wartości 100 kPa przez okres 1 h. Na podstawie wyznaczonej wartości odkształcenia próbki obliczono wartość modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej metodą pełzania S_{creep} . Odkształcenie próbki ε po czasie obciążenia równym 1 h obliczono jako iloraz zmiany wysokości próbki Δh do jej wysokości pierwotnej h , zgodnie z wzorem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}. \quad (2)$$

Następnie obliczono wartości modułu sztywności z wykorzystaniem wzoru:

$$S_{creep} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]}. \quad (3)$$

gdzie:

σ – naprężenie ściskające równe 0,1 MPa,

ε – odkształcenie.

loading force and the horizontal displacement, S_{IT-CY} stiffness modulus values for individual impulses were calculated using the equation:

$$S_{IT-CY} = \frac{P}{\Delta \cdot h} \cdot (0,02732 + \nu) \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

where:

P – maximum force value [N],

Δ – maximum horizontal displacement [mm],

h – specimen height [mm],

ν – Poisson's ratio ($\nu = 0,35$ was adopted, according to the PN-EN 12697-26:2012 standard).

The final value of the S_{IT-CY} stiffness modulus of a given specimen was calculated as the arithmetic mean of the values obtained for both specimen orientations (after rotation by 90°).

4.2. STIFFNESS MODULUS IN THE STATIC CREEP TEST

Static creep tests on cylindrical specimens were performed in order to determine the asphalt mixture stiffness modulus at the temperature of 40°C [30]. At the beginning of the test, the specimen is subjected to preliminary loading – compressive stress of 2.0 kPa is maintained for 2 minutes. Then the proper testing load is applied, so that the specimen is subjected to compressive stress of 100 kPa for 1 h. Value of the creep stiffness modulus S_{creep} was determined based on the recorded strain of the specimen. Strain ε after 1 h of loading was calculated as the ratio of the change in specimen height Δh to the original height h , according to the equation:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}. \quad (2)$$

Stiffness modulus values were then calculated as:

$$S_{creep} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]}. \quad (3)$$

where:

σ – compressive stress of 0.1 MPa,

ε – strain.

4.3. WATER AND FROST RESISTANCE OF THE ASPHALT MIXTURE

Indirect tension test enables determination of the Indirect Tensile Strength Ratio (*ITSR*), which reflects the susceptibility of an asphalt mixture to water and frost action. The value of *ITSR* is calculated as the ratio (in percent) of indirect tensile strength of specimens subjected to conditioning vs. indirect tensile strength of specimens tested directly without conditioning. The test was performed according to

4.3. OZNACZANIE ODPORNOŚCI MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ NA DZIAŁANIE WODY I MROZU

Badanie rozciągania pośredniego pozwala na oznaczenie wartości *ITSR* (ang. *Indirect Tensile Strength Ratio*), która odzwierciedla wrażliwość mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu. Wartość *ITSR* oblicza się jako wyrażony w procentach stosunek wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek poddanych kondycjonowaniu oraz próbek niepoddanych kondycjonowaniu. Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12697-12 oraz WT-2 (zał. 1), na próbkach przygotowanych zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 3.3. Przed badaniem część próbek niepoddanych kondycjonowaniu przechowywano w temperaturze pokojowej ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) na płaskiej powierzchni. Natomiast drugą część próbek poddano kondycjonowaniu. Proces ten polegał na umieszczeniu próbek w zbiorniku z wodą destylowaną o temperaturze 20°C i ciśnieniu $6,7 \pm 0,3$ kPa utrzymywanym przez okres 30 minut, po którym powoli podwyższono wartość ciśnienia do atmosferycznego. W dalszej kolejności próbki umieszczono w łaźni wypełnionej wodą o temperaturze 40°C na okres 68-72 h. Następnie każdą z próbek umieszczono w plastikowej torbie wypełnionej wodą w ilości 10 ml, którą szczelnie zamknięto. Kolejny etap procesu kondycjonowania polegał na umieszczeniu tak przygotowanych próbek w zamrażarce na okres 16-18 h. Po wyjęciu z zamrażarki i rozwinięciu z folii, próbki umieszczono na okres 24 h w łaźni z wodą o temperaturze 25°C . Po zakończeniu procesu kondycjonowania oba zestawy próbek doprowadzono do temperatury badania 25°C przez okres 4 h, a następnie na każdej próbce oznaczono wytrzymałość na rozciąganie pośrednie zgodnie z PN-EN 12697-23.

Do obliczeń wytrzymałości na rozciąganie pośrednie *ITS* wykorzystuje się wartość maksymalną siły, która jest rejestrowana w chwili zniszczenia próbki:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot D \cdot h} \text{ [MPa]}, \quad (4)$$

gdzie:

P_{\max} – wartość maksymalnej zarejestrowanej siły ściskającej [N],

D – średnica próbki [mm],

h – wysokość próbki [mm].

W dalszej kolejności oblicza się średnią wytrzymałość na rozciągnięcie pośrednie próbek poddanych i niepoddanych kondycjonowaniu. Ostatnim etapem jest obliczenie wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie *ITSR* według wzoru:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (5)$$

the PN-EN 12697-12 standard and the WT-2 (Appendix 1) document, on specimens described in section 3.3. Specimens that were not intended for conditioning were stored on a level surface at room temperature ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). The other group of specimens was subjected to conditioning. The process consisted of several stages. Specimens were first placed in a tank with distilled water at the temperature of 20°C and pressure of 6.7 ± 0.3 kPa, which was maintained for 30 minutes and later gradually increased to the level of atmospheric pressure. Specimens were then stored in a water bath at 40°C for the duration of 68-72 h. Subsequently, each specimen was placed in a plastic bag containing 10 ml of water and closed tightly. The next stage of the process consisted in storage of the wrapped specimens in a freezer for 16-18 h. Upon removal from the freezer, the specimens were unwrapped, submerged in water bath at 25°C and stored for 24 h. When the conditioning process was over, both groups of specimens were kept at the target testing temperature of 25°C for 4 h and then subjected to indirect tensile strength testing in accordance with the PN-EN 12697-23 standard.

Indirect tensile strength (*ITS*) is calculated based on the maximum loading force registered at the moment of specimen failure:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot D \cdot h} \text{ [MPa]}, \quad (4)$$

where:

P_{\max} – the maximum recorded compressive force [N],

D – specimen diameter [mm],

h – specimen height [mm].

Mean values of indirect tensile strength for the conditioned and nonconditioned sets are then calculated. The last stage consists in determination of the indirect tensile strength ratio (*ITSR*) according to the equation:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (5)$$

where:

ITS_w – mean indirect tensile strength in the set of conditioned specimens [kPa],

ITS_d – mean indirect tensile strength in the set of nonconditioned specimens [kPa].

5. TEST RESULTS AND ANALYSIS

5.1. EVALUATION OF THE TEST RESULTS

In order to determine whether the obtained values of asphalt mixture parameters are dependent on the method of Gilsonite mixing, the test of significance of difference between two means was used (i.e. it was verified if the sets of results differed

gdzie:

ITS_w – średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie zestawu próbek poddanych kondycjonowaniu [kPa],

ITS_d – średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie zestawu próbek niepoddanych kondycjonowaniu [kPa].

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.1. SPOSÓB OCENY WYNIKÓW BADAŃ

W celu określenia, czy oznaczone wartości parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych są zależne od metody dozowania asfaltu naturalnego Gilsonite, wykorzystano test istotności różnicy dwóch średnich (sprawdzono, czy zbiory wyników różnią się istotnie między sobą wartościami średniej danego parametru). Dla przeprowadzonych obliczeń postawiono hipotezę zerową $H_0: \mu_1 = \mu_2$ oznaczającą, że średnie wartości parametrów wyrażających daną cechę mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających Gilsonite dozowany metodą „na sucho” i „na mokro” są od siebie zależne (sposób dozowania nie ma istotnego wpływu na oznaczaną wartość parametru MMA) przy przyjętym poziomie ufności $p = 95\%$. Analizowane przypadki dotyczyły małych prób, dla których do określenia istotności różnicy dwóch średnich wykorzystano statystykę t_0 :

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{n_1 \cdot \sigma_1^2 + n_2 \cdot \sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right) \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (6)$$

gdzie:

\bar{x} – średnia arytmetyczna dla próby statystycznej,

σ – odchylenie standardowe dla próby statystycznej,

n – liczebność próby.

Ma ona w przybliżeniu rozkład t-Studenta o liczbie stopni swobody równej ν [31]:

$$\nu = n_1 + n_2 - 2. \quad (7)$$

Jeżeli t_0 jest mniejsze bądź równe kwantylowi rozkładu t-Studenta o ν stopniach swobody przy poziomie ufności $p = 95\%$, można powiedzieć, że oznaczone wartości średnie parametrów mieszanek są od siebie zależne. Wyniki oznaczeń przedstawiono na Rys. 2-4 w postaci średniej arytmetycznej i rozszerzonej niepewności pomiarowej $U(x)$ obliczonej przy poziomie ufności $p = 95\%$, natomiast wartości $ITSR$ (Rys. 5) w postaci średniej arytmetycznej i niepewności pomiarowej wielkości złożonej.

5.2. OZNACZANIE MODUŁU SZTYWNOŚCI W TEŚCIE POŚREDNIEGO ROZCIĄGANIA

Na Rys. 2 przedstawiono wyniki oznaczania modułu sztywności w teście pośredniego rozciągania IT-CY. Zastosowanie

significantly in terms of their means). The null hypothesis in the calculations was $H_0: \mu_1 = \mu_2$, meaning that the mean values of the given parameter for the two groups of Gilsonite-modified specimens (wet-mixed and dry-mixed) were dependent at the adopted confidence level of $p = 95\%$, which would indicate that the mixing method had no significant effect on the value of the measured mixture parameter. Since the analyzed cases made use of small samples, the t_0 statistic was used to evaluate the significance of difference between two means:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{n_1 \cdot \sigma_1^2 + n_2 \cdot \sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right) \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (6)$$

where:

\bar{x} – arithmetic mean for the statistical sample,

σ – standard deviation for the statistical sample,

n – sample size.

Its distribution is similar to the Student's t -distribution with the number of degrees of freedom ν equal to [31]:

$$\nu = n_1 + n_2 - 2. \quad (7)$$

If t_0 is less than or equal to the quantile of the Student's t -distribution with ν degrees of freedom at the confidence level of $p = 95\%$, it may be stated that the obtained mean values of the parameter are dependent. The results are presented in Figs 2-4 in the form of arithmetic means and expanded measurement uncertainty $U(x)$ calculated at the confidence level of $p = 95\%$. The $ITSR$ values (Fig. 5) are presented as arithmetic means and combined measurement uncertainty.

5.2. STIFFNESS MODULUS DETERMINED IN THE INDIRECT TENSILE TEST

The results of stiffness modulus in the IT-CY indirect tensile test are presented in Fig. 2. Gilsonite content of 4% (by weight of the binder) results in an increase in the asphalt stiffness modulus by about 70% in comparison to the reference asphalt mixture, confirming the stiffening effect of Gilsonite addition. The results of the test of significance of difference between two means according to the method described in section 5.1 are presented in Table 2. The results indicate that the addition of Gilsonite itself has a significant influence on the change in the IT-CY stiffness modulus (the populations AC vs. AC WET and AC vs. AC DRY are independent), but the Gilsonite mixing method is insignificant (AC WET and AC DRY populations are dependent). Therefore, in the case of asphalt mixture analyzed in the work, mixing method of Gilsonite addition

dotatku Gilsonite w ilości 4% powoduje zwiększenie wartości modułu sztywności w stosunku do referencyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej o około 70%, co potwierdza usztywniające działanie dodatku asfaltu naturalnego Gilsonite. Tabl. 2 przedstawia wyniki testu istotności dwóch średnich wg metody przedstawionej w punkcie 5.1. Odnośnie zestawionych w Tabl. 2 wyników zauważono, że dodatek asfaltu naturalnego Gilsonite ma istotny wpływ na zmianę wartości modułu sztywności oznaczonego metodą IT-CY (populacje AC i AC WET oraz AC i AC DRY są niezależne), ale sposób dozowania dodatku jest nieistotny (populacje AC WET i AC DRY są zależne). Świadczy to o tym, że metoda dozowania asfaltu naturalnego Gilsonite nie ma istotnego wpływu na uzyskane wartości modułu sztywności oznaczonego metodą IT-CY w przypadku analizowanej w pracy mieszanki mineralno-asfaltowej.

Table 2. Results of the test of significance of difference between two means in the case of the IT-CY test at the temperature of 20°C

Tablica 2. Wyniki testu istotności różnicy dwóch średnich w przypadku badania IT-CY w temperaturze 20°C

Asphalt mixture / Rodzaj MMA		
AC AC WET	AC AC DRY	AC WET AC DRY
$t_0 = 15.0 > 2.3$	$t_0 = 25.3 > 2.3$	$t_0 = 1.2 < 2.3$
independent niezależne	independent niezależne	dependent zależne

5.3. OZNACZANIE MODUŁU SZTYWNOŚCI MMA METODĄ PEŁZANIA PRZY OBCIĄŻENIU STATYCZNYM

Na Rys. 3 przedstawiono wyniki oznaczania modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej metodą pełzania przy obciążeniu statycznym. Uwzględniając obliczoną niepewność pomiarową, można zauważyć, że wartości dla próbek z zastosowanym dodatkiem Gilsonite w ilości 4% zawierają się w jednym przedziale wraz z wartościami oznaczonymi dla próbki referencyjnej. Świadczy to o tym, że w przypadku wartości modułu sztywności oznaczonych metodą pełzania dodatek Gilsonite oraz metoda jego dozowania nie mają istotnego wpływu na zmianę tej właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia są wyniki przedstawione w Tabl. 3, w której zestawiono rezultaty testu istotności dwóch średnich, z których wynika, że średnie wartości modułu sztywności oznaczonego metodą pełzania są dla wszystkich próbek zależne (AC, AC DRY i AC WET).

has no significant impact on the obtained IT-CY stiffness modulus.

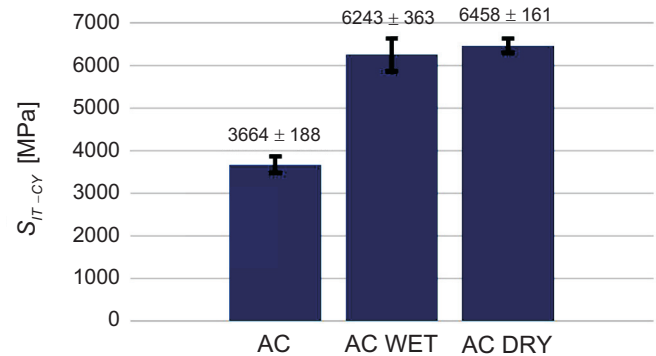


Fig. 2. Stiffness modulus S_{IT-CY} in the IT-CY test at the temperature of 20°C

Rys. 2. Zestawienie wartości modułów sztywności S_{IT-CY} oznaczonych metodą IT-CY w temperaturze 20°C

5.3. STIFFNESS MODULUS IN THE STATIC CREEP TEST

The results of stiffness modulus determined in the static creep test are presented in Fig. 3. Taking into account the calculated measurement uncertainty, it is visible that the values obtained for specimens of mixture with Gilsonite addition and for specimens of the reference mixture lie within the same range. The results indicate that neither the addition of Gilsonite nor the manner of its mixing significantly affect the stiffness modulus values in the static creep test. This observation is confirmed by the results of the test of significance of difference between two means presented in Table 3, which indicate that the mean values of stiffness moduli in the static creep test for all samples (AC, AC DRY and AC WET) are dependent.

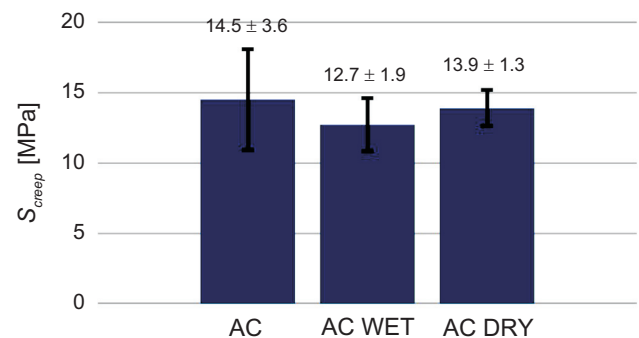


Fig. 3. Stiffness modulus S_{creep} in the static creep test at the temperature of 40°C

Rys. 3. Zestawienie wartości modułów sztywności S_{creep} oznaczonych metodą pełzania w temperaturze 40°C

Table 3. Results of the test of significance of difference between two means in the case of stiffness modulus determined in the static creep test at the temperature of 40°C
 Tablica 3. Wyniki testu istotności różnicy dwóch średnich w przypadku modułu sztywności oznaczonego metodą pełzania w temperaturze 40°C

Asphalt mixture / Rodzaj MMA		
AC AC WET	AC AC DRY	AC WET AC DRY
$t_0 = 1.1 < 2.3$	$t_0 = 0.4 < 2.3$	$t_0 = 1.3 < 2.3$
dependent zależne	dependent zależne	dependent zależne

5.4. OZNACZANIE ODPORNOŚCI MMA NA DZIAŁANIE WODY I MROZU

Na Rys. 4 i 5 przedstawiono wyniki badania wrażliwości mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu w postaci wartości *ITS* oraz *ITSR*. Można zauważyć nieznaczny przyrost wartości *ITSR* wynoszący do 9% w przypadku mieszank mineralno-asfaltowych zawierających dodatek Gilsonite. Uzyskane wyniki świadczą, że metoda dozowania asfaltu naturalnego Gilsonite nie ma istotnego wpływu na uzyskane wartości *ITSR* – różnica wynosi $\pm 2\%$ od wartości średniej w przypadku obu badanych mieszank AC DRY i AC WET. Potwierdzają to wyniki przedstawione w Tabl. 4, gdzie widać ich wzajemną zależność od siebie.

Table 4. Results of the test of significance of difference between two means in the case of resistance to water and frost
 Tablica 4. Wyniki testu istotności różnicy dwóch średnich w przypadku badania odporności na działanie wody i mrozu

Asphalt mixture without conditioning Rodzaj MMA bez kondycjonowania		
AC AC WET	AC AC DRY	AC WET AC DRY
$t_0 = 1.4 < 2.8$	$t_0 = 1.2 < 2.8$	$t_0 = 0.7 < 2.8$
dependent zależne	dependent zależne	dependent zależne
Asphalt mixture with conditioning Rodzaj MMA z kondycjonowaniem		
AC AC WET	AC AC DRY	AC WET AC DRY
$t_0 = 2.6 < 2.8$	$t_0 = 0.8 < 2.8$	$t_0 = 2.3 < 2.8$
dependent zależne	dependent zależne	dependent zależne

5.4. WATER AND FROST RESISTANCE OF THE ASPHALT MIXTURE

The *ITS* and *ITSR* values, which reflect the water and frost resistance of an asphalt mixture, are presented in Figs 4 and 5. A slight increase in the *ITSR* values (of up to 9%) may be observed for asphalt mixtures containing Gilsonite. The results indicate that the method of Gilsonite mixing has no significant effect on the obtained *ITSR* values – the difference between the means for AC DRY and AC WET is within the range of $\pm 2\%$. Results shown in Table 4 confirm this observation and indicate that the means are dependent.

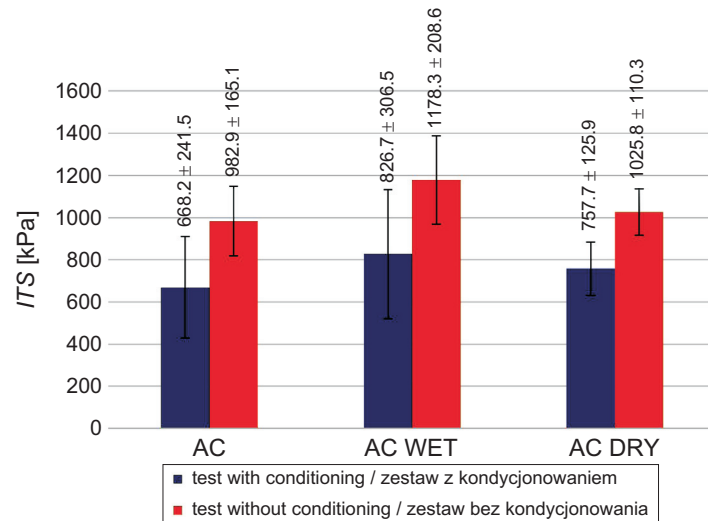


Fig. 4. Indirect tensile strength *ITS* of asphalt specimens tested at 25°C

Rys. 4. Zestawienie wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie *ITS* mieszank mineralno-asfaltowych oznaczonych w temperaturze 25°C

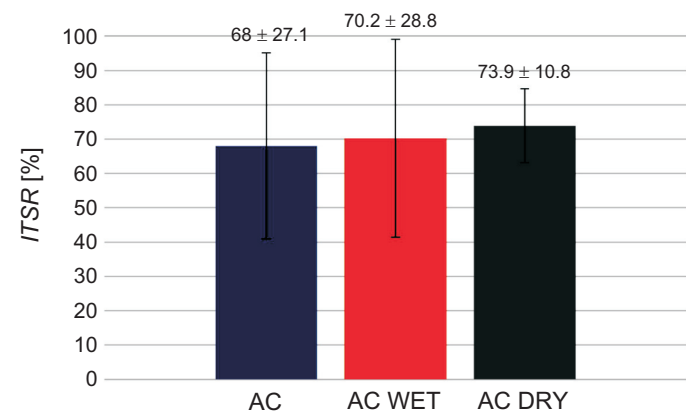


Fig. 5. Water and frost resistance results *ITSR* of the tested asphalt mixtures

Rys. 5. Wyniki badania odporności *ITSR* na działanie wody i mrozu mieszank mineralno-asfaltowych

6. DYSKUSJA

Przeprowadzone przez autorów badania laboratoryjne nie potwierdziły wyników opublikowanych m.in. w pracy [8], wskazujących na zwiększenie odporności na deformacje trwałe MMA z dodatkiem Gilsonite. Może to być spowodowane zastosowaną procedurą badawczą z wykorzystaniem urządzenia NAT i uzyskaniem wyników obciążonych dużą niepewnością pomiarową. Wyniki badań stanowią natomiast ważny krok w popularyzacji asfaltów naturalnych jako dodatku do mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych w Polsce dzięki możliwości efektywnego wykorzystania przy produkcji MMA metody modyfikacji asfaltem naturalnym „na sucho”, ze względu na mało istotne pod względem statystycznym różnice w porównaniu do metody „na mokro”. Wyniki przedstawione w pracy [27] dają podstawę do rozwoju efektywnego stosowania dodatku Gilsonite jako alternatywy dla lepszczy asfaltowych obecnie stosowanych w mieszankach mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy o wysokim module sztywności w Polsce.

Przedstawione w pracy badania stanowią podstawę do przeprowadzenia szerszego projektu badawczego o zwiększonej różnorodności badanych mieszanek mineralno-asfaltowych (m.in. pod względem rodzaju i wymiaru kruszywa) oraz większej różnorodności w ilości dozowanego dodatku Gilsonite oraz rodzaju asfaltu drogowego.

7. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz wykonanej analizy stwierdzono, że:

- Metoda dozowania („na mokro” lub „na sucho”) dodatku asfaltu naturalnego Gilsonite w ilości 4% w stosunku do masy lepszcza modyfikowanego zastosowanego w analizowanej mieszance mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy nie ma istotnego wpływu na wartości modułu sztywności oznaczonego metodą IT-CY, metodą pełzania oraz na wartości *ITSR*.
- Wartości modułu sztywności oznaczone metodą IT-CY w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających dodatek Gilsonite charakteryzują się średnimi wartościami większymi o około 70% w porównaniu do mieszanki referencyjnej, natomiast moduły sztywności oznaczone metodą pełzania nie wykazują większego zróżnicowania dla próbek referencyjnych oraz zawierających Gilsonite. Może to być spowodowane doбором typu mieszanki mineralno-asfaltowej oraz temperatury badania.
- Próbki zawierające asfalt naturalny Gilsonite charakteryzują się nieznacznie większymi wartościami wskaźnika *ITSR* (będącego miarą odporności MMA na działanie wody i mrozu) – do 9% w stosunku do próbek referencyjnych.

6. DISCUSSION

Laboratory tests performed by the authors did not confirm the results published in [8], which suggested an increase in resistance to permanent deformation in asphalt containing Gilsonite. This may be related to the test procedure, usage of the NAT device and the fact that the obtained results were characterized by high uncertainty. Nevertheless, the presented research is an important step in popularization of natural bitumens as additives to asphalt mixtures in Poland. The results indicate that it is feasible to use the dry mixing method when producing asphalt mixture with natural bitumen, since the differences between the “dry” and “wet” methods are statistically insignificant. Results presented in [27] provide a basis for development of effective application of Gilsonite addition as an alternative to bituminous binders that are currently used in high modulus asphalt concrete in Poland.

Based on the presented research, a broader research project will be realized, including more varied asphalt mixture compositions (e.g. aggregate types and sizes), road bitumen types and Gilsonite quantities.

7. CONCLUSIONS

Based on the performed laboratory tests and analyses, the following conclusions were formulated:

- The method of mixing (wet mixing or dry mixing) of the addition of Gilsonite natural bitumen (content of 4% by weight of the modified bitumen) in the analyzed asphalt concrete mixture does not have a significant influence on the values of stiffness modulus determined in the IT-CY test, stiffness modulus determined in static creep test and the *ITSR* ratio.
- The results of stiffness modulus determined in the IT-CY indirect tensile test for specimens containing Gilsonite are greater by about 70% than values obtained for the reference asphalt mixture. The values of stiffness modulus determined in the static creep test do not display considerable differences between reference specimens and Gilsonite-modified specimens. This may be related to the choice of asphalt mixture type or the test temperature.
- Specimens containing Gilsonite natural bitumen are characterized by slightly greater values of the *ITSR* ratio (which is a measure of resistance to water and frost) – up to 9% in comparison to the reference specimens.
- The performed tests indicate that – due to the lack of statistically significant differences in the values of the analyzed parameters – it is more convenient to apply the dry mixing method in industrial usage of Gilsonite natural asphalt, as it does not require production of Gilsonite-modified binder prior to production of the asphalt mixture.

- Z wykonanych badań wynika, że przy braku istotnych statystycznie różnic w wartościach analizowanych parametrów w przypadku zastosowania przemysłowego asfaltu naturalnego Gilsonite wygodniejsze jest zastosowanie metody „na sucho”, ponieważ nie ma konieczności wytwarzania lepischer modyfikowanego.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Chilingarian G., Yen T.* (eds.): Bitumens, asphalts and tar sands. Elsevier Horth-Holland Inc., New York, 1978
- [2] *Bilski M.*: Natural asphalts – properties and use. Archives of Institute of Civil Engineering, 27, 2018, 25-36, DOI: 10.21008/j.1897-4007.2018.27.02
- [3] *Boden T., Tripp B.*: Gilsonite veins of the Uinta Basin, Utah Geological Survey, Salt Lake City, 2012
- [4] *Nciri N., Song S., Kim N., Cho N.*: Chemical characterization of Gilsonite bitumen. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology, 5, 5, 2014, 1000193, DOI: 10.4172/2157-7463.1000193
- [5] *Gajewski M., Horodecka R.*: Rheological properties of road bitumens modified by natural asphalt. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 17, 2, 2018, 93-109, DOI: 10.7409/rabdim.018.006
- [6] *Çeloğlu M.E., Yalçın E., Kök B.V., Alataş T., Norambuena-Contreras J., Garcia A., Yılmaz M.*: Effects of different bitumen modifiers on the rutting and cracking resistance of hot mix asphalts. International Journal of Pavement Engineering, 21, 6, 2020, 703-712, DOI: 10.1080/10298436.2018.1506122
- [7] *Lv Q., Huang W.D., Sadek H., Xiao F.P., Yan C.Q.*: Investigation of the rutting performance of various modified asphalt mixtures using the Hamburg Wheel-Tracking Device test and Multiple Stress Creep Recovery test. Construction and Building Materials, 206, 2019, 62-70, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.015
- [8] *Quintana H.A.R., Noguera J.A.H., Bonells C.F.U.*: Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes. Journal of Materials in Civil Engineering, 28, 2, 2015, 04015114, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001339
- [9] *Bilski M., Słowik M.*: Impact of aging on Gilsonite and Trinidad Epuré modified binders resistance to cracking, in: Nikolaidis A.F., Manthos E. (eds.): Bituminous Mixtures and Pavements VII, CRC Press, London, 2019, 65-70, DOI: 10.1201/9781351063265
- [10] *Sobhi S., Yousefi A., Behnood A.*: The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixture. Construction and Building Materials, 238, 2020, 117676, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117676
- [11] *Jahanian H.R., Shafabakhsh Gh., Divandari H.*: Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. Construction and Building Materials, 131, 2017, 156-164, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.069
- [12] *Yilmaz M., Yamac O.E.*: The effects of using different bitumen modifiers and hydrated lime together on the properties of hot mix asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering 29, 9, 2017, ID article: 04017089, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001938
- [13] *Yilmaz M., Yamac O.E.*: Evaluation of Gilsonite and Styrene-Butadiene-Styrene Composite Usage in Bitumen Modification on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering, 29, 9, 2017, ID article: 04017089, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001938
- [14] *Djakfar L., Bowoputro H., Prawiro B., Tarigan N.*: Performance of Recycled Porous Hot Mix Asphalt with Gilsonite Additive. Advances in Civil Engineering, 2015, article ID: 316719, DOI: 10.1155/2015/316719
- [15] *Rodriguez-Fernandez I., Baheri F.T., Cavalli M.C., Poulikakos L.D., Bueno M.*: Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process. Construction and Building Materials, 259, 2020, ID article: 119662, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119662
- [16] *Wang H.P., Liu X.Y., Erkens S., Skarpas A.*: Experimental characterization of storage stability of crumb rubber modified bitumen with warm-mix additives. Construction and Building Materials, 249, 2020, ID article: 118840, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118840
- [17] *Al-Omari A., Taamneh M., Khasawneh M.A., Al-Hosainat A.*: Effect of crumb tire rubber, microcrystalline synthetic wax, and nano silica on asphalt rheology. Road Materials and Pavement Design, 21, 3, 2020, 757-779, DOI: 10.1080/14680629.2018.1527718
- [18] *Pipintakos G., Ching H.Y.V., Soenen H., Sjøvall P., Muhlich U., Van Doorslaer S., Varveri A., Van den Bergh W., Lu X.H.*: Experimental investigation of the oxidative ageing mechanisms in bitumen. Construction and Building Materials, 260, 2020, 119702, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119702
- [19] *Mirzaiyan D., Ameri M., Amini A., Sabouri M., Norouzi A.*: Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite- and SBS-modified asphalt binders. Construction and Building Materials, 207, 2019, 679-692, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.145
- [20] *Ameri M., Mirzaiyan D., Amini A.*: Rutting Resistance and Fatigue Behavior of Gilsonite-Modified Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, 30, 11, 2018, 04018292, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002468
- [21] *Dziadosz S., Słowik M., Niwczyk F., Bilski M.*: Study on Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Binders Relaxation at Low Temperature. Materials, 14, 11, 2021, 2888, DOI: 10.3390/ma14112888
- [22] *Celauro C., Saroufim E., Mistretta M.C., La Mantia F.P.*: Influence of Short-Term Aging on Mechanical Properties and Morphology of Polymer-Modified Bitumen with Recycled Plastics from Waste Materials. Polymers, 12, 9, 2020, 1985, DOI: 10.3390/polym12091985

- [23] *Cuciniello G., Leandri P., Losa M., Airey G.*: Effects of ageing on the damage tolerance of polymer modified bitumens investigated through the LAS test and fluorescence microscopy. *International Journal of Pavement Engineering*, **23**, 4, 2022, 1083-1094, DOI: 10.1080/10298436.2020.1788031
- [24] *Mansoori S., Modarres A.*: Rheological and micro-structural properties of bituminous mastics containing chemical and wax warm additives. *Construction and Building Materials*, **248**, 2020, 118623, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.11862
- [25] *Mazurek G., Iwański M.*: Analysis of selected properties of asphalt concrete with synthetic wax. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, **66**, 2, 2018, 217-228, DOI: 10.24425/122102
- [26] *Słowik M., Bilski M.*: An Experimental Study of the Impact of Aging on Gilsonite and Trinidad Epuré Modified Asphalt Binders Properties. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **12**, 2, 2017, 71-81, DOI: 10.3846/bjrbe.2017.09
- [27] *Bilski M., Słowik M.*: Natural asphalt modified binders used for high stiffness modulus asphalt concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **356**, 012007, 2018, DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012007
- [28] *Bilski M., Słowik M.*: Assessment of Gilsonite and Trinidad Epuré natural asphalt modified binders ability to relaxation at low temperature. *MATEC Web of Conferences*, **262**, 2019, 05001, DOI: 10.1051/mateconf/201926205001
- [29] *Jurczak R., Mieczkowski P.*: Zastosowanie asfaltów naturalnych do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych. *Zachodniopomorskie Seminarium Drogowe*, Szczecin, 2013, www.sitkszczecin.org.pl/images/stories/Prezentacje-III/kntzsd2.pdf
- [30] *Tam W.O., Solaimanian M., Kennedy T.W.*: Development and use of static creep test to evaluate rut resistance of Superpave mixes. *The University of Texas at Austin, Report No. FHWA-TX-1250-4*, 2000
- [31] *Tadeusiewicz R., Izworski A., Majewski J.*: *Biomateria*. Wydawnictwo AGH, Kraków, 1993

CITED STANDARDS AND TECHNICAL DOCUMENTS / CYTOWANE NORMY I DOKUMENTY TECHNICZNE

- PN-EN 12591:2009 Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens
- WT-2 2014 – część 1 – Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania techniczne
- PN-EN 12697-30:2018 Bituminous mixtures – Test methods – Part 30: Specimen preparation by impact compactor
- PN-EN 12697-26:2018 Bituminous mixtures. Test methods. Stiffness
- PN-EN 12697-26:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność
- PN-EN 12697-12:2018 Bituminous mixtures – Test methods – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens
- PN-EN 12697-23:2017 Bituminous mixtures. Test methods. Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
- PN-EN 1426:2015-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie penetracji igłą
- PN-EN 1427:2015-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie temperatury mięknięcia – Metoda Pierścieni i Kula