



MAREK IWAŃSKI¹⁾
GRZEGORZ MAZUREK²⁾

SYNTHETIC WAX EFFECT ON THE RESILIENT STIFFNESS MODULUS OF ASPHALT CONCRETE

WPŁYW WOSKU SYNTETYCZNEGO NA MODUŁ SZTYWNOŚCI BETONU ASFALTOWEGO

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań asfaltu według amerykańskiej procedury MSCR określającej pełzanie asfaltu pod obciążeniem dynamicznym. Pozwala ona na podstawie tej charakterystyki lepszo wnioskować o możliwości pojawienia się uszkodzeń trwałych nawierzchni w środowisku wysokiej temperatury otoczenia oraz przy małych i dużych naprężeniach ścinających. Badania wykonano w przypadku asfaltów 35/50 oraz 50/70 poddanych modyfikacji woskiem syntetycznym pochodzącym z syntezy Fischera-Tropscha (F-T) w ilościach 1,5%, 2,5% i 3,5%. Ocena wpływu wosku syntetycznego na podstawowe właściwości asfaltów została wzbogacona o analizę ilościową morfologii modyfikowanych asfaltów za pomocą mikroskopu fluorescencyjnego. Badania betonu asfaltowego AC 11 S wykonano z udziałem asfaltów modyfikowanych. Beton asfaltowy był zagęszczany w temperaturze 115°C, 130°C oraz 145°C. Na podstawie analizy wyników badań sformułowano wnioski dotyczące wpływu asfaltów modyfikowanych na wartość modułu sztywności sprężystej w temperaturze 2°C oraz 20°C.

SŁOWA KLUCZOWE: beton asfaltowy, moduł sztywności, MSCR, pełzanie asfaltu.

ABSTRACT. The paper presents results of research according to American MSCR procedures specifying the bitumen creep under dynamic loading. This method allows, on the basis of the characteristics of the binder, to predict the possibility of the forming of permanent strain in the layer at the high ambient temperatures and at low and high shear stresses. The study was performed for bitumen 35/50 and 50/70 which were subjected to modification by means of synthetic wax derived from the synthesis of Fischer-Tropsch (FT) in amounts of 1.5%, 2.5% and 3.5%. Assessment of the impact of synthetic wax on the basic properties of bitumen was enriched with quantitative analysis of the morphology by using a fluorescent microscope. The study of asphalt concrete AC 11 S was performed with modified bitumen. Asphalt concrete was compacted at temperatures of 115°C, 130°C and 145°C as well. Based on the analysis of results the conclusions were drawn concerning the impact of modified bitumen on the elastic stiffness modulus at temperatures of 2°C and 20°C.

KEYWORDS: asphalt concrete, bitumen creep, MSCR, resilient stiffness modulus, synthetic wax.

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; iwanski@tu.kielce.pl (✉)

²⁾ Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; gmazurek@tu.kielce.pl

1. WSTĘP

Deformacje trwałe są jednym z najpoważniejszych uszkodzeń nawierzchni asfaltowej występujących w trakcie użytkowania dróg. Podstawowe przyczyny pojawiania się ich to: przekroczenie dopuszczalnego jednostkowego naprężenia styku koła z nawierzchnią, wzrost ilości pojazdów, zmniejszenie częstotliwości obciążenia w warunkach miejskich w interakcji z dużym obciążeniem na oś pojazdu [1]. Ograniczenie deformacji można uzyskać poprzez odpowiedni projekt mieszanki mineralnej, jak również w wyniku zastosowania odpowiednio twardego asfaltu, który zapewni wzrost lepkości strukturalnej mieszanki mineralno-asfaltowej. Użycie tego rodzaju lepiszcza wymaga stosowania wysokiej temperatury technologicznej powyżej 155°C [2] do uzyskania w procesie produkcji lepkości w przedziale od 2 do 20 Pas i wbudowania mieszanki mineralno-asfaltowej w celu zapewnienia właściwego procesu jej zagęszczania. Jednak stosowanie tak wysokiej temperatury bardzo przyspiesza starzenie asfaltu i wzrost podatności mieszanki mineralno-asfaltowej na powstawanie spękań niskotemperaturowych. W związku z tym możliwość zastosowania asfaltów twardych niemodyfikowanych jest w praktyce ograniczona do warstw ścieralnych.

Możliwością rozwiązania tego problemu jest modyfikacja asfaltu dodatkami organicznymi, do których można zaliczyć alifatyczny wosk syntetyczny. Przy czym należy zaznaczyć, że woski nie są nowymi składnikami asfaltów. Wielokrotnie poruszano kwestię ustalenia ilości wosków w asfalcie, ich właściwości krystalicznych oraz struktury chemicznej [3, 4, 5]. Zasadniczo woski podzielono na dwie grupy: parafiny w asfalcie i modyfikowane woski syntetyczne [3]. Za niekorzystny wpływ na parametry funkcjonalne asfaltu odpowiadają parafinowe woski makrokrystaliczne o temperaturze topnienia poniżej 70°C [6]. Nieco odmiennym oddziaływaniem odznaczają się alifatyczne woski syntetyczne uzyskiwane w procesie Fischera-Tropscha (F-T). Ich budowa różni się od wosków parafinowych. Ponadto współpracują w inny sposób z asfaltem oraz zawartymi w jego składzie parafinami [7]. Woski F-T krystalizują jak struktury mikrokrystaliczne zbudowane z cząsteczek o dużej liczbie atomów dochodzącej do 100 [8], [9]. Dzięki swojej morfologii istotnie oddziałują na właściwości reologiczne asfaltu oraz podwyższają lepkość dynamiczną lepiszcza w zakresie temperatury poniżej 100°C. Zwiększają tym samym temperaturę jego mięknięcia (zakres podstanu cieczy nienewtonowskiej), oddziałując jak bardzo drobny wypełniacz [10]. Natomiast

1. INTRODUCTION

Permanent deformations make one of the most serious asphalt pavement failures experienced in the course of road use. The main reasons for them are: exceeding a permissible individual wheel-pavement contact stress, a rise in the number of vehicles, decreasing loading frequency in urban traffic conditions combined with a high axle load [1]. The limitation of deformations may be achieved through appropriately designed aggregate mix, as well as an application of bitumen hard enough to guarantee an increase in the structural density of a bituminous mixture. But on the other hand, the application of that kind of a binding agent requires the use of high technological temperatures of over 155°C [2] to reach densities in the range from 2 to 20 Pas during the manufacturing process and subsequent placement of the bituminous mixture in order to provide it with the right compaction conditions. However, such a high temperature decisively promotes ageing of bitumen and increases low-temperature cracking sensitivity. That is why, the possibility of application of hard unmodified bitumens remains in practice limited to wearing courses.

Modification of paving mixtures with organic additives, including the aliphatic synthetic waxes, appears as an optional solution to that problem. It should be mentioned that waxes are not new components of bitumens. The question of determining wax contents of bitumen, its crystal properties, and chemical constitution, has repeatedly been brought up [3, 4, 5]. Basically, waxes have been divided into two groups: paraffins in bitumens and modified synthetic waxes [3]. Macrocrystalline paraffin waxes with the melting point below 70°C are responsible for disturbing impact on bitumen functional properties [6]. Aliphatic synthetic waxes obtained in the Fischer-Tropsch (F-T) process distinguish themselves by a bit different effect. Their structure differs from the paraffin wax morphology. Moreover, they work together in a different way with the bitumen and the paraffins contained in it [7]. F-T waxes crystallise as microcrystalline structures composed of molecules with a large number of atoms reaching 100 [8], [9]. Owing to their morphology they have a substantial effect on bitumen rheological properties increasing the binder dynamic density in the range of temperature below 100°C. They rise simultaneously its softening point (the sub-state range of non-Newtonian fluids) [10] and exert an influence like a very fine filling material. However, F-T synthetic waxes suddenly decrease the binder viscosity at the temperature over 100°C, lowering the compaction temperature of a bituminous mixture by about 30°C.

w temperaturze powyżej 100°C woski syntetyczne F-T gwałtownie zmniejszają lepkość asfaltu poprzez obniżenie temperatury zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej o około 30°C.

2. OCENA WPŁYWU WOSKU SYNTETYCZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTU

2.1. TEST PEŁZANIA ASFALTU POD OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM MSCR

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje asfaltów 35/50 i 50/70 o różnej konsystencji, które zostały modyfikowane woskiem syntetycznym F-T w ilości 0%, 1,5%, 3,0% wagowo. Proces przygotowania obejmował wydzielenie próbki asfaltu dla każdego poziomu modyfikacji w ilości 250 g. Następnie próbka została podgrzana do temperatury 155°C i przetrzymywana w niej przez 30 minut. Kolejnym etapem było wymieszanie asfaltu z woskiem syntetycznym. W celu zapewnienia homogenizacji lepiszcze mieszano w blenderze przy zachowaniu stałej temperatury przy 400 obr/min. Ocenę jakości wykonano zgodnie z [11].

Badanie MSCR (Multiple Stress Creep Recovery Test of Asphalt Binder) wykonano zgodnie z metodyką AASHTO TP70. Zostało ono opracowane w celu weryfikacji badań według SHRP (moduł zespolony, kąt przesunięcia fazowego) jako alternatywa dla asfaltów modyfikowanych, szczególnie polimerami. Badanie to umożliwia ocenę nieliniowego zachowania asfaltu i odznacza się wysoką korelacją wyników badań asfaltów z wynikami zagęszczonych mieszanek mineralno-asfaltowych, uzyskanymi w trakcie badań w koleinomierzu [12]. Test ten został zaproponowany, aby lepiej przewidywać uszkodzenia nawierzchni pod wpływem wysokiej temperatury otoczenia, gdy asfalt staje się lepką cieczą [13]. Metoda ta pozwala ocenić podatność oraz relaksację lepiszcza użytego w mieszance w symulowanych warunkach obciążenia zbliżonych do rzeczywistych oraz o nieliniowym charakterze lepkościowym asfaltu w szerokim zakresie naprężeń. Badanie podatności lepiszcza poprzez pomiar odkształcenia nieodwracalnego wykonano dla dwóch zakresów naprężeń 100 oraz 3200 kPa, przykadanego przez 1 sekundę, a następnie dokonano pomiaru nawrotu sprężystego asfaltu przez 9 sekund w temperaturze asfaltu 60°C. Cały cykl dla jednego zakresu naprężenia wynosił 100 sekund. W konsekwencji została ustalona wartość podatności J_{nr} (nieodwracalna część odkształcenia podzielona przez przyłożone naprężenie) oraz

2. ASSESSMENT OF SYNTHETIC WAX EFFECT ON BITUMEN PROPERTIES

2.1. BITUMEN CREEP TEST UNDER THE MSCR DYNAMIC LOAD

Two sorts of bitumen, namely 35/50 and 50/70 with a different consistency, modified with the synthetic wax F-T amounting 0%, 1.5%, 3.0% by weight, have been used in research. The preparation process has included collection of samples with a mass of 250 g for each level of modification. Then the sample has been heated up to the temperature of 155°C and retained at it for 30 minutes. Intermixing the bitumen with the synthetic wax has been the next stage. The binder has been agitated in a blender at 400 rpm retaining a constant temperature. The quality assessment has been carried out in accordance with [11].

The MSCR (abbreviation for Multiple Stress Creep Recovery Test of Asphalt Binder) has been carried out after the AASHTO TP70 methodology worked out to verify test results according to SHRP (the complex modulus, phase angle) as an alternative to modified bitumens, especially to those modified with polymers. That test enables an assessment of bitumen non-linear behaviour and it distinguishes itself with a high correlation of bitumen test results with test results of compacted bituminous mixtures obtained in the course of tests in a wheel tracker [12]. The MSCR has been proposed as a better instrument for predicting pavement failures brought about by high ambient temperatures when bitumens turn out into dense fluids [13]. That method allows to assess the compliance and relaxation of a binder applied in a mixture in simulated load conditions as near as possible to natural and with a non-linear light-resilient bitumen in a broad range of stress. Binder compliance tests by means of measuring irreversible deformations have been carried out for two stress ranges of 100 kPa and 3200 kPa applied for 1 second, followed by the measurement of the bitumen elastic recovery for 9 seconds at the bitumen temperature of 60°C. The whole cycle of one range of stress lasted 100 seconds. Consequently, the value of compliance J_{nr} (a non-reversible part of deformation divided by the applied stress), and the value of elastic recovery ε_r in % (the relative value of elastic strain in percentages being the ratio of deformation in the first second at the beginning of a cycle to the value of deformation in the tenth second) have been determined.

wartość nawrotu sprężystego ε_r w % (względna wartość odkształcenia sprężystego w procentach stanowiąca stosunek odkształcenia w 1 sekundzie na początku cyklu do wartości odkształcenia w 10 sekundzie).

Wykonane badania obejmowały pomiar następujących parametrów:

- podatność J_{nr100} (naprężenie 100 kPa),
- podatność J_{nr3200} (naprężenie 3200 kPa),
- nawrót sprężysty odkształcenia R [%].

Wartości badanych parametrów zostały oszacowane na podstawie zmian odkształcenia w procesie obciążania i odciążania próbki asfaltu. Przykładowy wykres zmian odkształcenia dla asfaltu 35/50 z zawartością modyfikatora 2,5 % przedstawiono na Rys. 1. Wyniki pomiarów podatności J_{nr} w 100 oraz 3200 kPa przedstawiono na Rys. 2.

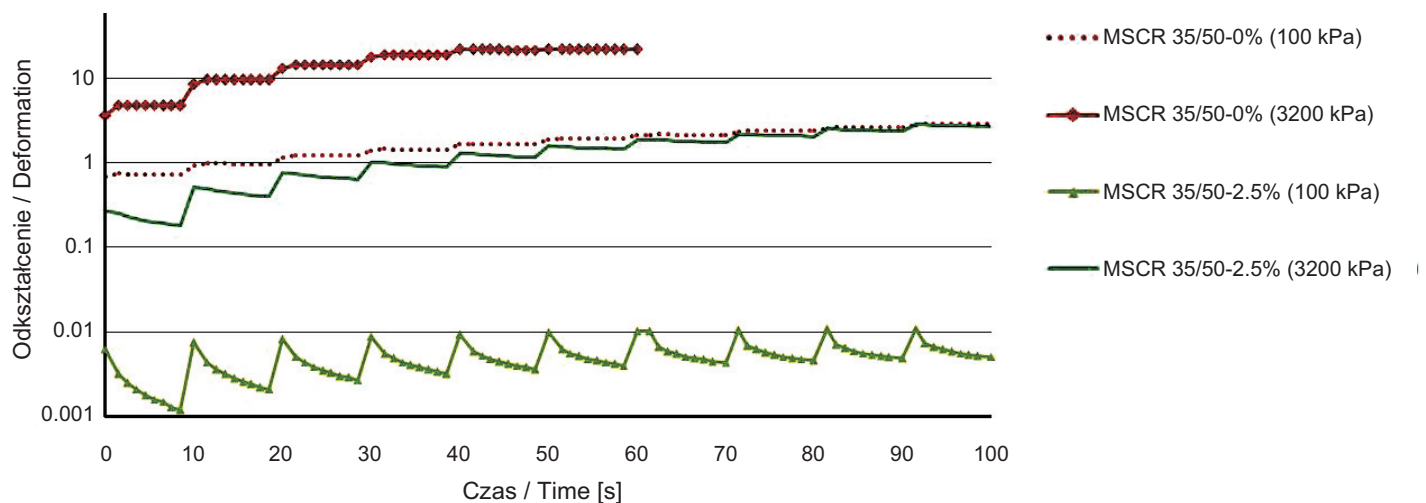
The conducted research has included measurements of the following parameters:

- compliance J_{nr100} (at stress of 100 kPa),
- compliance J_{nr3200} (at stress of 3200 kPa),
- elastic recovery at the deformation R [%].

The values of the tested parameters have been estimated basing on changes to deformation of a bitumen sample in a loading-unloading process. Figure 1 illustrates an exemplary graph of deformation changes of the bitumen 35/50 with the 2.5% modifier content, while Fig. 2 shows the measurement results of compliance J_{nr100} at 100 kPa and J_{nr3200} at 3200 kPa.

Rys. 1. Zmiany odkształcenia lepiszcza dla zadanego dynamicznego naprężenia

Fig. 1. Changes of the binder deformation dependent on dynamic stress level

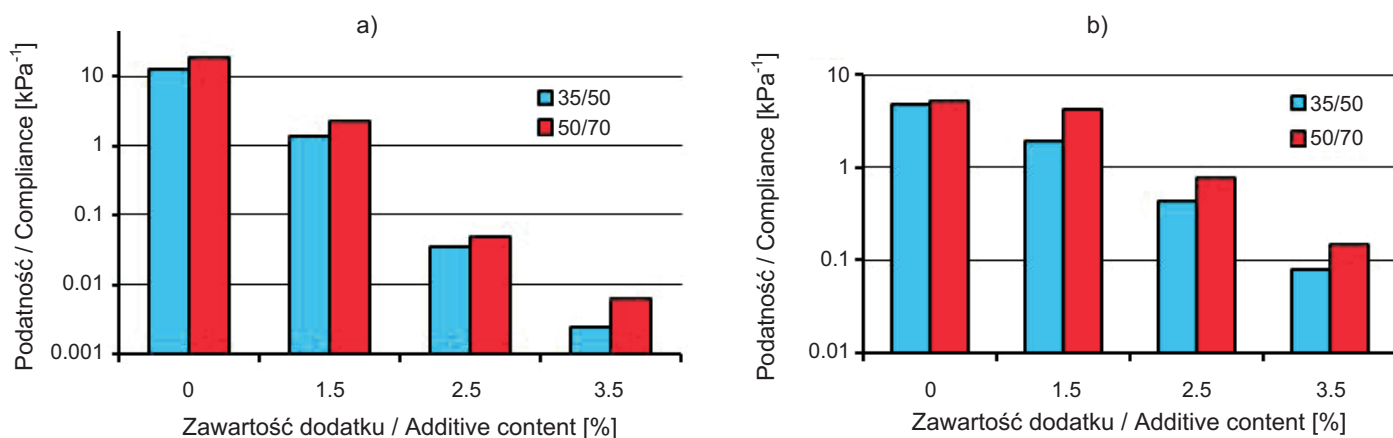


Wzrost ilości modyfikatora powoduje spadek podatności asfaltu zgodnie z modelem funkcji wykładniczej o postaci $y = a \cdot b^{-bx}$. Wobec tego w miarę zwiększenia jego ilości oraz postępującego zjawiska strukturyzacji asfaltu przez kryształy wosku F-T, należy się spodziewać co najmniej liniowego wzrostu odporności na powstawanie kolein [14] oraz podwyższenia modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego. Dla dwóch zakresów naprężeń tendencja zmian jest podobna. Podatność asfaltu ulega pewnemu zwiększeniu przy zastosowaniu dużego naprężenia 3200 kPa. Zróżnicowanie pomiędzy wartościami zarejestrowanymi dla asfaltu 35/50 i 50/70 ujawnia się dla dużych wartości naprężeń, co może być spowodowane naruszeniem struktury asfaltu. Należy zwrócić uwagę, że

An increase in the modifier amount brings about a decrease in the bitumen compliance in accordance with the exponential function model in a form $y = a \cdot b^{-bx}$. In that case, as it grows, and the process of bitumen structuring with F-T wax crystals sets in motion, it should be expected at least the linear growth of rut resistance [14] and a rise of the resilient stiffness modulus of asphalt concrete. The tendency of changes for two ranges of stresses is similar. The bitumen compliance is subjected to a certain increase when the high stress of 3200 kPa is applied. Diversification of the registered values for the bitumen 35/50 and 50/70 coming out for the high value stresses may be caused by disturbing the bitumen structure. It is worth noting that the application of the 1.5% amount of

w sytuacji zastosowania wosku syntetycznego F-T w ilości 1,5%, charakter podatności dla asfaltu 50/70 pozostaje na poziomie zbliżonym do asfaltu 50/70, nie poddanego modyfikacji. Taki stan rzeczy związany jest z naruszeniem struktury asfaltu i jego przejściem w stan lepki oraz sprzętowym ograniczeniem pomiaru przemieszczenia przez lepkościomierz (bardzo duże odkształcenie) [15]. W każdym przypadku podatność modyfikowanego asfaltu 35/50 w danym zakresie jest niższa w stosunku do zastosowania asfaltu 50/70. W celu doprowadzenia podatności asfaltu 50/70 do poziomu asfaltu 35/50, należy zwiększyć ilość modyfikatora.

F-T synthetic wax results in remaining its compliance character on the level resembling the behavior of the unmodified bitumen 50/70. Such a state of affairs is connected with a disturbance of the bitumen structure and its transition to the dense state as well as with equipment limitations on the displacement measurement with a viscometer (a very large deformation) [15]. In any case the compliance of the modified bitumen 35/50 in a given range is lower in comparison with an application of the bitumen 50/70. So as to bring the compliance of the bitumen 50/70 to the level of the bitumen 35/50, the amount of a modifier should be increased.



Rys. 2. Wyniki pomiarów podatności J_{nr} według MSCR: a) 100 kPa, b) 3200 kPa

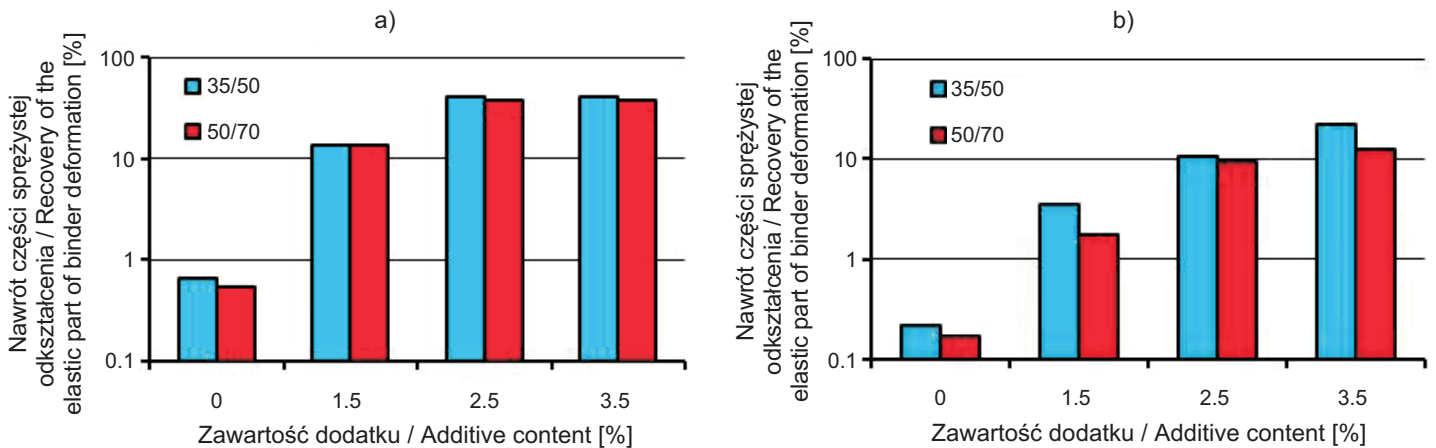
Fig. 2. The measurement results of compliance J_{nr} according to MSCR procedure: a) 100 kPa, b) 3200 kPa

Drugim charakterystycznym badanym parametrem lepiszcza był nawrót sprężystej części odkształcenia (Rys. 3). Analiza wyników pomiaru nawrotu części sprężystej odkształcenia dla obu asfaltów dla małego naprężenia nie wskazuje na istotne różnice statystyczne (Tabl. 1). Badane asfalty zachowują podobny trend wzrostu nawrotu sprężystego przy małych naprężeniach. Wartość nawrotu wzrasta wraz z poziomem strukturyzacji asfaltu przez ilość modyfikatora wosku F-T. Ten fakt w pełni koreluje z wynikami podatności i ma związek ze wzrostem modułu sztywności oraz rozszerzenia zakresu wielkości naprężenia, w której asfalt pracuje w zakresie linowej lepkością. Wyniki badań z użyciem naprężeń 3,2 MPa wskazują na pewne zróżnicowanie w charakterze nawrotu. Pomimo braku istotnego wpływu rodzaju asfaltu, różnica w odczycie tego parametru (dla tego samego asfaltu) wynosi w niektórych przypadkach około 25% przy zastosowanym naprężeniu

The recovery of the elastic part of deformation has been the second distinguishing parameter (Fig. 3) of the tested bitumen. An analysis of measurement results of the recovery of the elastic part of deformation with a low stress for both bitumens has not brought out significant statistical differences (Table 1). The tested bitumens have sustained a similar growing trend of the elastic recovery with low stresses. The value of elastic recovery has increased along with the bitumen structuring level by means of the wax F-T modifier quantity. It thoroughly corresponds with measurement results of compliance and relates with an increase in resilient modulus and the range expansion of stress values where the bitumen operates within the scope of linear viscoelasticity. Test results with the use of stresses 3.2 MPa have demonstrated a certain diversification of recovery character. Despite the lack of a significant impact of a bitumen sort, in some cases reading differences

3200 kPa. Większym nawrotem odznacza się asfalt 35/50 wraz z modyfikacjami woskiem F-T. Większy nawrót sprężysty asfaltu 35/50 związany jest z wyższym poziomem lepkości strukturalnej oraz większym poziomem maksymalnego naprężenia ścinającego, które powoduje zaburzenie stanu równowagi struktury koloidalnej asfaltu. Asfalt 50/70 modyfikowany woskiem syntetycznym ujawnia na tle modyfikacji lepkości 35/50 coraz bardziej lepki charakter pracy. Można więc stwierdzić, że dozowanie wosku syntetycznego F-T w odpowiedniej ilości może znacznie poprawić odporność asfaltu na powstawanie odkształceń trwałych, nadając mieszance mineralno-asfaltowej bardziej sprężysty charakter pracy w temperaturze 60°C, uznawanej za najwyższą temperaturę nawierzchni w okresie lata.

of that parameter (for the same bitumen) have come to around 25% at the applied stress of 3200 kPa. The bitumen 35/50 and its versions modified with the wax F-T are characterised by a higher recovery. The higher elastic recovery of the bitumen 35/50 involves the higher level of structural density and the higher level of a maximal shearing stress causing a disturbance of the equilibrium state of the bitumen colloidal system. The synthetic wax modified bitumen 50/70 reveals more and more viscous operational character in comparison with the binder 35/50 modification. Therefore it is safe to say that proportioning of the synthetic wax F-T by an appropriate quantity may significantly improve the bitumen permanent deformation resistance making a functioning character of bituminous mixture more elastic at the temperature of 60°C regarded as the highest summer pavement temperature.



Rys. 3. Wyniki pomiarów nawrotu części sprężystej odkształcenia lepkości R według MSCR: a) 100 kPa, b) 3200 kPa
Fig. 3. The measurements results of the recovery of the elastic part of binder deformation R according to MSCR procedure: a) 100 kPa, b) 3200 kPa

Tablica 1. Ocena wariancji (Two-Way Annova) istotności wpływu ilości modyfikatora oraz rodzaju asfaltu na ocenę nawrotu sprężystego odkształcenia R

Table. 1. Evaluation of the significant influence (Two-Way Annova) of additive content and type of bitumen on the elastic recovery at the deformation R

Parametr / Parameter	Sposób oznaczenia / Type of measurement	
	R przy 100 kPa / R at 100 kPa	R przy 3200 kPa / R at 3200 kPa
Źródło / Source	Pr > F (p-value) ^{*)}	
Wosk syntetyczny L_V[%] / Synthetic wax L_V [%]	0.0095	0.0211
Rodzaj asfaltu / Bitumen type	0.3135	0.2433
Uwaga / Remark		
*) odpowiednik statystyki p-value (od wersji SAS 8.1) oznaczający graniczny poziom istotności the equivalent of the p-value statistics (SAS version 8.1 and higher) denoting the limiting significance level		

2.2. INDEKS PENETRACJI ASFALTU MODYFIKOWANEGO

Indeks penetracji stanowi ocenę wrażliwości termicznej asfaltu i wskazuje na dynamikę zmian twardości asfaltu w czasie zmiany temperatury. Indeks penetracji ustalono jako wynik badań dwóch pośrednich podstawowych parametrów reologicznych asfaltu według wzoru:

$$IP = \frac{20 \cdot T_{PiK} + 500 \cdot \log P - 1952}{T_{PiK} - \log P + 120} \quad (1)$$

gdzie:

T_{PiK} – temperatura mięknięcia [°C],

P – penetracja w 25°C [$\times 0,1$ mm].

Indeks penetracji został ustalony w celu dokonania analizy wyników badań wpływu wosku syntetycznego F-T na właściwości asfaltu w wymiarze penetracji oraz temperatury mięknięcia. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 4.

2.2. PENETRATION INDEX OF A MODIFIED BITUMEN

The penetration index reflects an assessment of bitumen thermal susceptibility and indicates the dynamics of changes to the bitumen hardness as a function of changes to the temperature. It has been determined as a result of testing two basic indirect rheological parameters of the bitumen according to the formula:

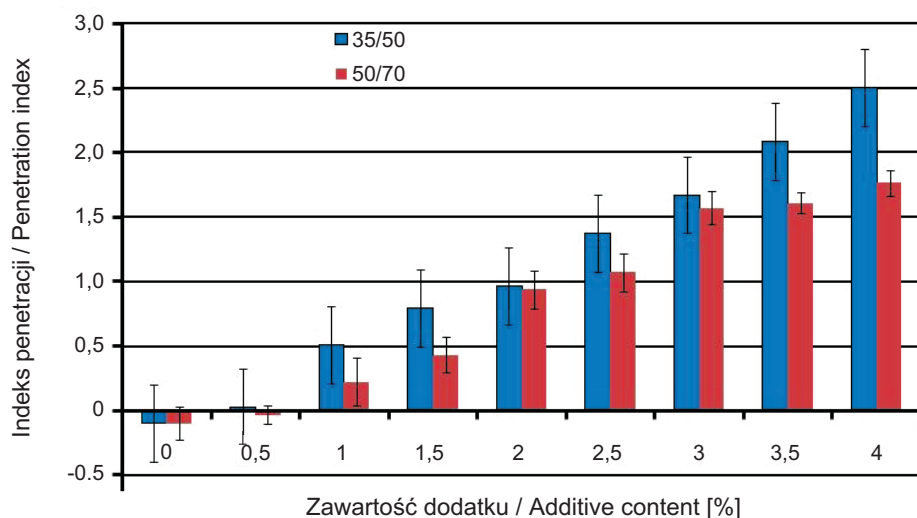
$$PI = \frac{20 \cdot T_{R\&B} + 500 \cdot \log P - 1952}{T_{R\&B} - \log P + 120} \quad (1)$$

where:

$T_{R\&B}$ – softening point [°C],

P – penetration grade at 25°C [$\times 0.1$ mm].

The penetration index has been established to analyse results of the synthetic wax F-T effect on bitumen properties with respect to the penetration and softening point. Fig. 4 shows the test results.



Rys. 4. Zmiany indeksu penetracji badanych asfaltów
Fig. 4. Changes of the penetration index of tested bitumens

Słupki błędów reprezentują wyniki pośredniej niepewności pomiaru związanej z wpływem dwóch parametrów badanych niezależnie. Dokładność wzorcowania temperatury mięknięcia wynosiła $\Delta T_{PiK} = 0,1^\circ\text{C}$, natomiast pomiaru penetracji $\Delta pen = 0,1 \times 0,1$ mm. Wyniki pomiarów wyraźnie wskazują, że asfalt 35/50 przy modyfikacji powyżej 2% dąży do postaci reologicznej typu żel. Fakt ten bezpośrednio rzutuje na charakter zmian podatności asfaltu wykonywanych procedurą MSCR. W odniesieniu do asfaltu 50/70

Columns of errors represent results of the indirect measurement uncertainty connected with an impact of two independently tested parameters. The calibration accuracy of the softening point amounted $\Delta T_{R\&B} = 0.1^\circ\text{C}$, whereas the accuracy of measurement of the penetration grade amounted $\Delta pen = 0.1 \times 0.1$ mm. The test results clearly confirm that the bitumen 35/50 modified with the additive content over 2% resembles the rheological form of gel type. That fact has a direct effect on changes to the bitumen

podobny poziom indeksu penetracji można uzyskać przy zwiększeniu ilości modyfikatora o około 0,5% (indeks penetracji powyżej +1). Wzrost ilości modyfikatora powyżej 2,5% wyraźnie ogranicza wrażliwość termiczną asfaltów, poprawiając jednak w tym samym czasie ich termostabilność, oraz powoduje wzrost sztywności lepiszcza. Należy zaznaczyć, że wzrost sztywności asfaltu powyżej 3% może pociągać za sobą wzrost kruchości asfaltu w niskiej temperaturze, co zasygnalizowano w pracy [14].

2.3. MORFOLOGIA LEPISZCZA 35/50 Z DODATKIEM WOSKU F-T

Wstępna ocena morfologii wosków została wykonana za pomocą obserwacji w epifluorescencyjnym mikroskopie Axioscope 3.1 przy zastosowaniu powiększenia 200× oraz rejestracji obrazu. Próbkę, po procesie mieszania, podgrzano do temperatury o 20°C wyższej od temperatury mięknięcia i utrzymano w niej przez 10 min w celu usunięcia historii termicznej, a następnie schłodzono do temperatury 20°C. Temperatura badania wynosiła natomiast +15°C. Uzyskane fotografie cyfrowe poddano analizie ilościowej (Rys. 5). Zarejestrowane kształty struktur wosków syntetycznych rozproszonych w fazie asfaltu (podłużne, „szpilkowe”) oceniono pod względem ich długości.

Badania morfologiczne wykonane dla asfaltu 35/50 z zawartością modyfikatora w ilości 1,5% oraz 4% stanowią materiał poglądowy. Idea przewodnia polega na wskazaniu charakteru zróżnicowania ilościowego i jakościowego wosku w asfalcie.

Analiza ilościowa długości form wosków wyróżnionych światłem U-V (oznaczonych przy pomocy programu AxioVision 4.8) wskazuje na brak istotnego wpływu pomiędzy zaobserwowanymi średnimi długościami kształtów wosku rozproszonego w asfalcie. Jednak ocena kwantyla określającego 25% oraz 75% obserwacji wskazuje, że w asfalcie 35/50 modyfikowanym 4% ilością wosków wystąpiła tendencja do wzrostu ilości struktur wosku syntetycznego o coraz to większej długości w stosunku do modyfikacji w ilości 1,5% wosku. Wzrost ilości struktur wosku o bardziej gruboziarnistym charakterze w fazie asfaltu może zachodzić odmiennie i powodować utratę homogenizacji rozproszenia struktur wosku w asfalcie oraz doprowadzić do powstawania spękań indukowanymi niską temperaturą. Zbyt małe odległości pomiędzy strukturami wosku F-T (mniejsza ilość asfaltu pomiędzy strukturami wosku F-T) spowoduje zmniejszenie wpływu efektu „smarowania” i tym samym zwiększy

compliance conducted according to MSCR procedure. A similar level of the penetration index for the bitumen 50/70 may be achieved through increasing the modifier content by circa 0.5% (the penetration index above +1). Obviously, a growth in modifier content over 2.5% limits the bitumen thermal susceptibility, but at the same time it improves the thermal stability and causes a rise in binder stiffness. It is worth mentioning that an increase to bitumen stiffness over 3% may result in a rise in the bitumen brittleness at low temperatures which has been indicated in [14].

2.3. MORPHOLOGY OF THE BINDER 35/50 WITH THE WAX F-T ADDED

An initial assessment of the wax morphology has been made through the observation under an epifluorescent microscope Axioscope 3.1 with a magnification 200× and an image recording. After mixing the samples have been initially heated up to the temperature of 20°C above the softening point, and retained at it to delete their thermal history. Next they have been cooled down to the temperature of 20°C, whereas the test temperature has amounted to +15°C. The obtained digital photographs have been subjected to quantitative analysis (Fig. 5). The registered structural shapes of synthetic wax present in the bitumen (longitudinal, needlelike forms dispersed in a bitumen phase) have been analysed regarding their length.

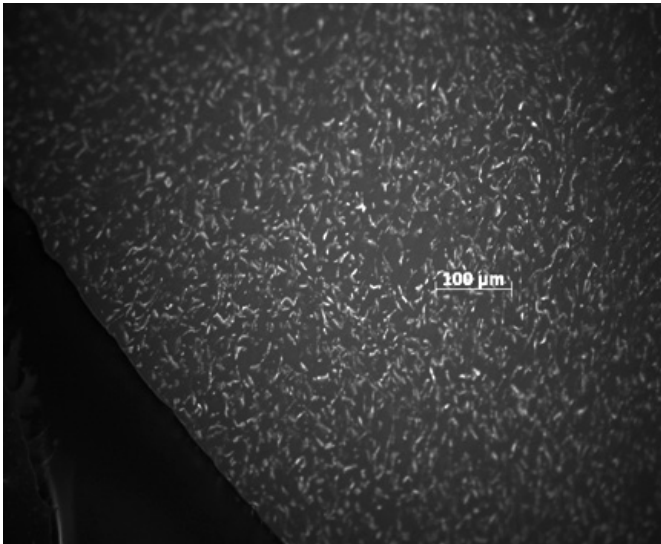
Morphological research on the bitumen 35/50 with the 1.5% and 4% modifier content provides visual materials. Its guiding principle consists in indicating the character of quantitative and qualitative diversification of wax in a bitumen.

The quantity analysis of wax length forms enhanced with UV light (measured with the use of AxioVision 4.8 program) has indicated a lack of substantial mutual effect of the observed wax medium length forms dispersed in a bitumen. However, the estimation of a quantile determining 25% and 75% of observations has confirmed in the bitumen 35/50 modified with the 4% wax quantity, a growing tendency of the amount of synthetic wax structures of longer and longer length in comparison with the 1.5% wax modification. A growth in quantity of more coarse-graded wax structures in the bitumen phase may occur differently and cause loss of homogeneity of wax structures dispersed in a bitumen, as well as bring about cracking induced by low temperatures. Too short distances amid wax structures F-T (smaller quantity of bitumen amid wax structures F-T) would decrease an impact of the “greasing” effect and would increase the binder

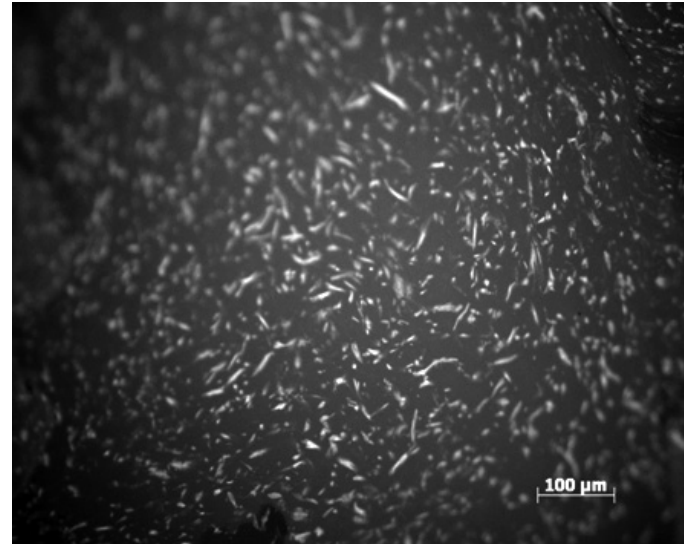
kruchość lepiscza. Podobne zjawisko zarejestrowano w pracy [14].

brittleness. A similar phenomenon has been reported in a paper [14].

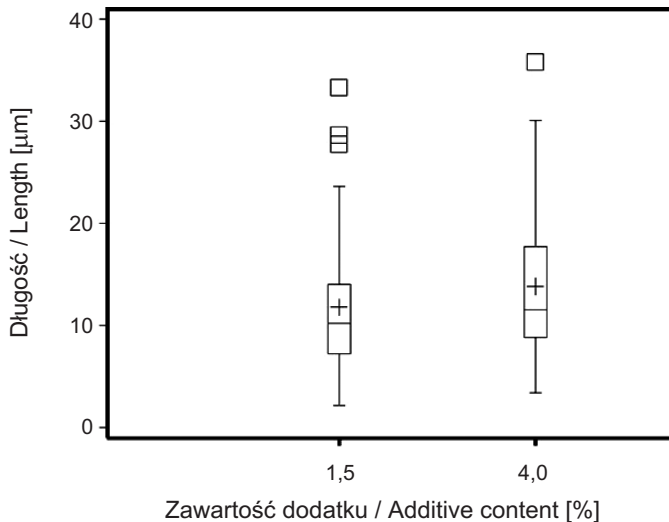
a)



b)



c)



Rys. 5. Obraz mikroskopowy asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem F-T w ilości 1,5% (a) oraz w ilości 4% (b) wraz z analizą ilościową długości struktur wosków (c)

Fig. 5. Microscopic view of F-T wax modified bitumen 35/50 amounting 1.5% (a), 4% (b), along with quantitative analysis of wax forms length (c)

3. OZNACZENIE MODUŁU SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ BETONU ASFALTOWEGO

3.1. PROJEKT MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ

Mieszanka mineralna została zaprojektowana jako AC 11 S, przeznaczona na ruch KR4 zgodnie z normą PN EN

3. MEASUREMENT OF THE RESILIENT STIFFNESS MODULUS OF AN ASPHALT CONCRETE

3.1. DESIGN OF A BITUMINOUS MIXTURE

The aggregate mix has been designed as a combination AC 11 S intended for the KR4 traffic category according

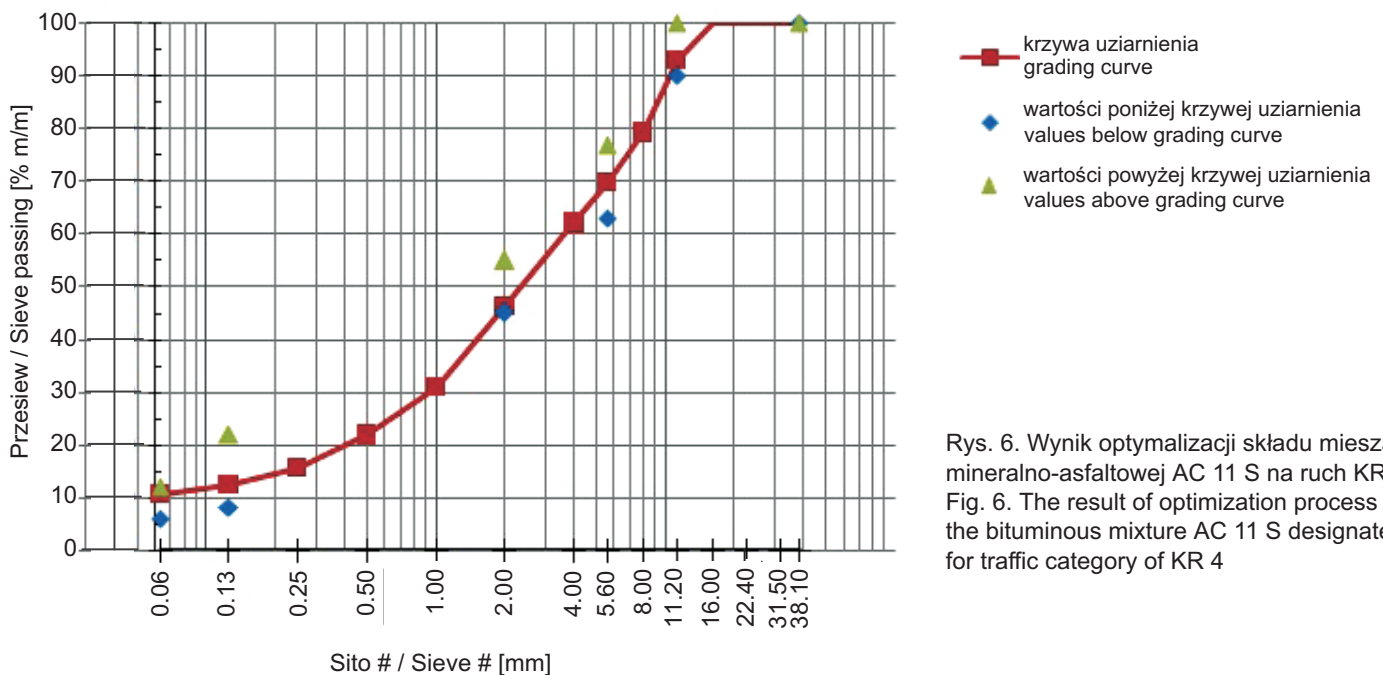
13108-1 oraz z wymaganiami WT 2-2010. Optymalny skład ziarnowy został określony przy użyciu autorskiego skryptu VBA w programie Excel (Rys. 6), wykorzystującym minimalizację sumy różnic odległości krzywej projektowanej uziarnienia do krzywych granicznych. Zawierał on 55% kruszywa skały gabbro, zastosowanej jako materiał doziarniający mieszankę dolomitową 0/4, oraz piasek granitowy. Referencyjna mieszanka mineralna została wykorzystana we wszystkich wariantach badań związanych z oceną wpływu wosków syntetycznych na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej.

Zawartość asfaltu zaprojektowano metodą doświadczalną z uwzględnieniem wymagań WT 2 - 2010 [2].

to the requirements of the standard PN-EN 13108-1 and the technical specifications WT 2-2010. The optimal mineral grading has been determined with the use of an original VBA code in Excel spreadsheet (Fig. 6), utilizing the minimisation of differential sums between a designed grading curve and limit grading curves. It has contained 55% of gabbro rock aggregate applied as a graining-up material to dolomite mix 0/4, and granite sand. The reference aggregate mix has been applied in all variants of tests connected with an assessment of the synthetic wax effect on properties of a bituminous mixture.

The bitumen content has been designed with the use of an experimental method taking into consideration requirements of WT 2 - 2010 [2].

Krzywa uziarnienia projektowej mieszanki mineralnej / Grading curve of a designed aggregate mix



Rys. 6. Wynik optymalizacji składu mieszanki mineralno-asfaltowej AC 11 S na ruch KR 4
Fig. 6. The result of optimization process of the bituminous mixture AC 11 S designated for traffic category of KR 4

3.2. MODUŁ SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ

Plan badań modułu sztywności betonu asfaltowego oparty był na czynnikiemowym planie eksperymentu typu 32. Dotyczył on poszukiwania funkcji, za pomocą której będzie można opisać i przedstawić charakter zmian analizowanej wielkości zależnej. W badaniach wykorzystano próbki walcowe o średnicy $101,6 \pm 0,1$ mm i wysokości $63,5 \pm 5$ mm. Oceniono je w temperaturze 2°C oraz 20°C . Dziedzina doświadczenia obejmowała dwa czynniki:

3.2. RESILIENT STIFFNESS MODULUS

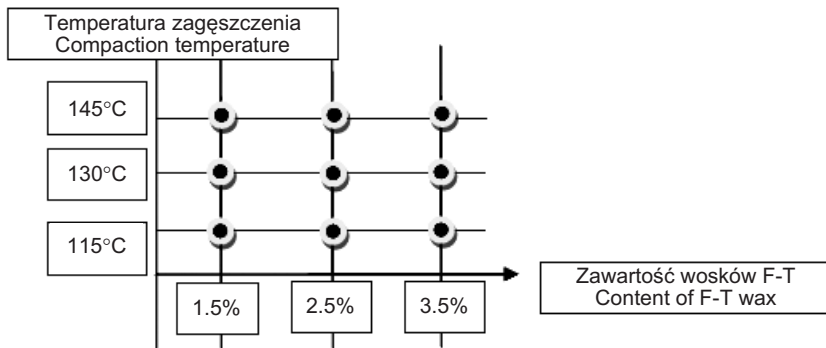
The plan of resilient stiffness modulus testing of an asphalt concrete has been based on an experiment factor plan type 32 concerning the search of a function enabling description and presentation of the nature of changes to the tested variable quantity. Cylindrical samples 101.6 ± 0.1 mm in diameter and 63.5 ± 5 mm in length have been used for testing. The samples have been evaluated at the temperature of 2°C and 20°C . Two factors have been involved in the scope of experiment:

- temperaturę zagęszczania (trzy poziomy 115°C, 130°C, 145°C),
- ilość modyfikatora wosków F-T (trzy poziomy 1,5%, 2,5%, 3,5%).

Dla zunifikowania charakteru zmian przyjęto model w postaci wielomianu stopnia drugiego [16]. Schemat dziedzi-ny eksperymentu przedstawiono na Rys. 7.

- compaction temperature (three levels: 115°C, 130°C, 145°C),
- amount of wax modifier F-T (three levels: 1.5%, 2.5%, 3.5%).

A model in a form of a quadratic polynomial has been adopted to unify the character of changes [16]. Fig. 7 depicts the scheme of the experiment scope.



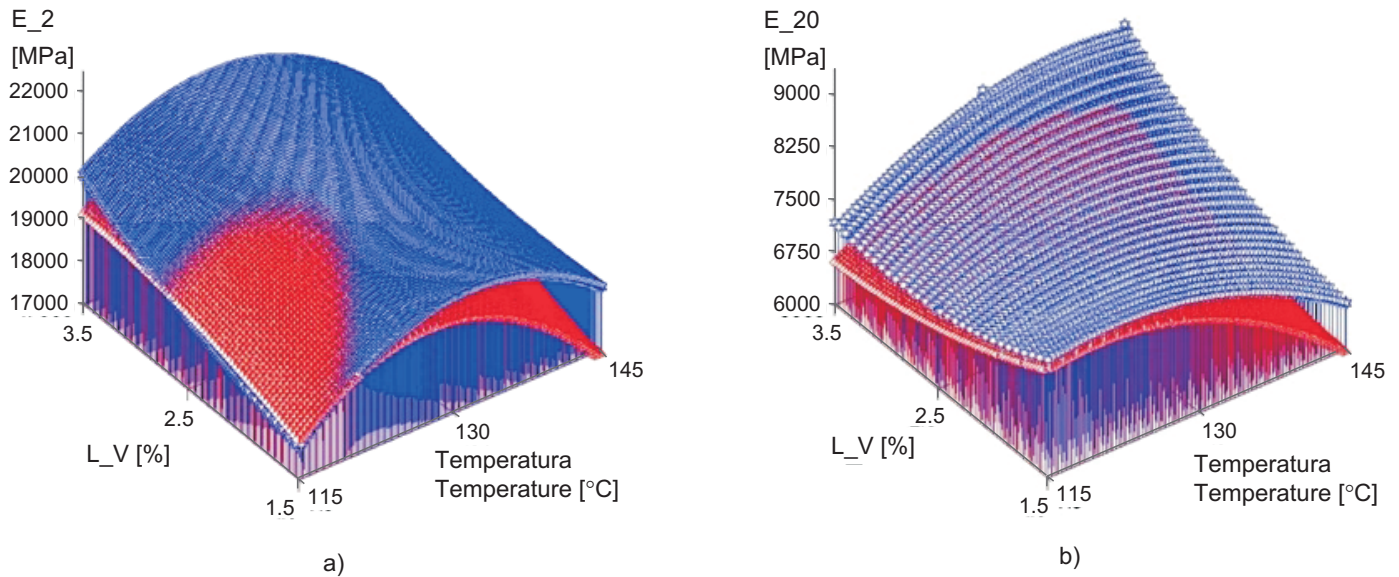
Rys. 7. Dziedzina eksperymentu
Fig. 7. The domain of experiment

Wpływ modyfikacji asfaltu na zachowanie betonu asfaltowego oceniono za pomocą pomiaru modułu sztywności sprężystej. Na podstawie sporządzonego planu eksperymentu wykonano serię próbek walcowych o średnicy 100 mm. Ilość replikacji dla każdej zmienności czynników wynosiła 6. Wartość ta została ustalona na podstawie oceny minimalnej liczby prób według procedury „Power Test” zaimplementowanej w programie SAS. Postać modelu regresyjnego zmian modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego AC 11 S w aspekcie zmian ilości modyfikatora oraz temperatury zagęszczania przedstawiono na Rys. 8.

Należy zaznaczyć, że wynik współczynnika korelacji modelu w odniesieniu do modelu dla asfaltu bazowego 35/50 wynosi 0,75 (dla 2°C) oraz 0,73 (dla 20°C), natomiast dla asfaltu 50/70 wynosi 0,72 (dla 2°C) oraz 0,78 (dla 20°C). Wyniki badań wskazują na odmienne zachowanie asfaltu 35/50 oraz 50/70 w procesie modyfikacji w aspekcie pomiaru modułu sztywności sprężystej. Asfalt 35/50 uzyskuje najlepsze właściwości dla poziomu modyfikatora powyżej 2% w temperaturze około 130°C. Natomiast asfalt 50/70 z uwagi na większą podatność uzyskał niższe wartości modułu sztywności sprężystej. Beton asfaltowy z asfaltem 50/70, wyjątkowo w temperaturze 2°C (E₂), osiągnął wartości modułu sztywności wyższe w zakresie temperatury zagęszczania 115°C i przy małej zawartości modyfikatora. Fakt ten może być związany z lepszym

The influence of bitumen modification on the performance of asphalt concrete has been evaluated through measurements of its resilient stiffness modulus. Basing on a drawn up plan of experiment a series of cylindrical samples 100 mm in diameter has been prepared. The replicate number for each factor variability has amounted to 6. That quantity has been determined on the grounds of the assessment of minimal trial number after the “Power Test” procedure implemented by a SAS program. The Fig. 8 shows a form of a regressive model of changes to the resilient stiffness modulus of the asphalt concrete AC 11 S, considering an aspect of changes in a modifier quantity and the compaction temperature.

It is necessary to stress that the result of a model correlation coefficient related to the basic bitumen model 35/50 amounts to 0.75 (at 2°C), and 0.73 (at 20°C), while for the bitumen 50/70 it equals 0.72 (at 2°C) and 0.78 (at 20°C). Test results have confirmed the different performance of the bitumen 35/50 and 50/70 in the modification process as for the measurement of resilient stiffness modulus. The bitumen 35/50 has achieved the best properties with a modifier level over 2% at the temperature of circa 130°C, whereas the bitumen 50/70 has reached lower values of the resilient stiffness modulus due to its higher compliance. At the temperature of 2°C (E₂) the asphalt concrete with the bitumen 50/70 has exceptionally reached higher values of the resilient stiffness modulus in the



Rys. 8. Wpływ ilości wosku syntetycznego (modyfikatora syntetycznego L_V) oraz temperatury zagęszczania asfaltu 35/50 (kolor niebieski) oraz asfaltu 50/70 (kolor czerwony) na moduł sztywności sprężystej E : a) temperatura badania 2°C, b) temperatura badania 20°C

Fig. 8. The influence of synthetic wax content (low-viscosity modifier L_V) and compaction temperature of bitumen 35/50 (blue color) and bitumen 50/70 (red color) on the resilient stiffness modulus E : a) test temperature 2°C, b) test temperature 20°C.

zagęszczeniem mieszanki mineralno-asfaltowej wykonanej z asfaltem 50/70 w niskiej temperaturze zagęszczania ze względu na niższą lepkość asfaltu. W sytuacji pomiaru modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego w temperaturze 20°C (E_{20}), wpływ podatności asfaltu na proces zagęszczania w niskiej temperaturze nie spowodował istotnego zysku w wymiarze sprężystości. Wskazał jednak na ujawniający się efekt szybkiego wzrostu podatności asfaltu 50/70 w wyższej temperaturze. Asfalt 35/50 wykazuje stosunkowo proporcjonalny wzrost modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego o mniejszej dynamice w interakcji ze zmianą czynników eksperymentów. Wyniki badań modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego korelują z wynikami badań asfaltów według procedury MSCR. Wysoki poziom nawrotu sprężystego części sprężystej odkształcenia całkowitego asfaltu 35/50 poddanego modyfikacji silnie wpływa na wynik modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego. Równolegle niska podatność asfaltu podnosi poziom modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego w całej dziedzinie eksperymentu.

115°C range, and with a low modifier content. That fact may be justified with a better compaction of the bituminous mixture made up with the bitumen 50/70 at a low compaction temperature because of a lower bitumen viscosity. When measuring the resilient stiffness modulus of an asphalt concrete at the temperature of 20°C (E_{20}), a bitumen compliance impact on the compaction process has not caused a substantial increase resilience, but it has pointed out an effect of the fast compliance growth of the bitumen 50/70 at higher temperatures. The bitumen 35/50 demonstrates a relatively proportional growth in the resilient stiffness modulus of an asphalt concrete with a lower dynamics interacted with a change of experimental factors. The results of testing resilient stiffness modulus of the asphalt concrete correlate with bitumen test results after the MSCR procedure. The size of the above mentioned quantity has strongly been influenced by the high level of elastic recovery of the elastic part of the modified bitumen 35/50 total strain. At the same time the low bitumen compliance has been increasing the level of resilient stiffness modulus of an asphalt concrete throughout the experiment.

3.3. METODA NIEPEWNOŚCI POMIARU BADAŃ MODUŁU SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ

W celu oceny wiarygodności uzyskanych wyników oznaczeń niezbędne było dokonanie oceny wpływu badanych czynników na wartość modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego, wykorzystując metodę niepewności pomiaru.

Niepewność pomiaru jest parametrem określającym przedział wokół wartości przyjętej, w którym na poziomie prawdopodobieństwa można spodziewać się wartości oczekiwanej [17]. Odzwierciedla ona brak możliwości ustalenia dokładnej wartości wielkości mierzonej. Niepewność pomiaru realizowana będzie w odniesieniu do niepewności pomiarów bezpośrednich oraz pośrednich. Końcowym wynikiem niepewności będzie niepewność rozszerzona, stanowiąca o zakresie przedziału ufności otaczającego wynik w postaci:

$$U(x) = k \cdot u_c(x), \quad (2)$$

gdzie:

- $u_c(x)$ – niepewność pomiarów bezpośrednich,
- k – współczynnik przyjmowany jako kwantyl rozkładu t -studenta dla założonego poziomu istotności oraz stopni swobody.

Ocenę wpływu badanych czynników na moduł sztywności sprężystej betonu asfaltowego przedstawiono w Tablicy 2.

Tablica 2. Analiza wariancji oceny wpływu badanych czynników na poziom cechy moduł sztywności sprężystej w różnej temperaturze

Table 2. The analysis of the evaluation of the tested factors influence on the levels of the resilient stiffness modulus at different temperature variants

Parametr Parameter	Pr> F dla E (2°C) Pr> F for E (2°C)	Pr> F dla E (20°C) Pr> F for E (20°C)
Asfalt 35/50 Asphalt 35/50		
Ilość wosku syntetycznego F-T (L_V) Amount of synthetic wax F-T (L_V) [%]	0.0135	< 0.001
Temperatura zagęszczania Compaction temperature [°C]	0.0122	< 0.001
Asfalt 50/70 Asphalt 50/70		
Ilość wosku syntetycznego F-T (L_V) Amount of synthetic wax F-T (L_V) [%]	0.0156	0.0155
Temperatura zagęszczania Compaction temperature [°C]	0.005	0.074

3.3. MEASUREMENT UNCERTAINTY METHOD FOR TESTING RESILIENT STIFFNESS MODULUS

The impact assessment of the tested factors on the value of resilient stiffness modulus of the asphalt concrete with the use of the measurement uncertainty method is essential to make a reliability appraisal of the obtained results.

The measurement uncertainty is a parameter characterising the dispersion of values attributed to an interval around probable value where an expected value can be found [17]. That uncertainty has a probabilistic basis and reflects incomplete knowledge of the quantity. All measurements are subject to uncertainty and a measured value is only complete if it is accompanied by a statement of the associated uncertainty. The final result of uncertainty makes an extended uncertainty determining the surrounding confidence interval through a form of the following formula:

$$U(x) = k \cdot u_c(x), \quad (2)$$

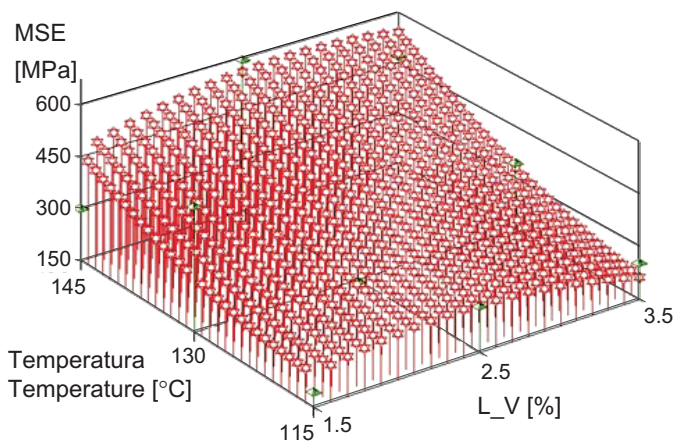
where:

- $u_c(x)$ – uncertainty of direct measurements,
- k – coefficient adopted as the Student's t -distribution quantile for an assumed significance level and degrees of freedom.

The impact assessment of the tested factors on the resilient stiffness modulus of the asphalt concrete is shown in Table 2.

Zarówno koncentracja modyfikatora, jak również poziom temperatury powoduje istotny wpływ na zakres modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego. Poziom usztywnienia asfaltu jest znacznie bardziej wyraźny w odniesieniu do modyfikacji asfaltu 35/50. Nieco większy wpływ temperatury na poziom modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego w odniesieniu do asfaltu 50/70 może być spowodowany efektem interakcji pomiędzy modyfikatorem i jego przemianą fazową w danej temperaturze zagęszczania.

Wpływ wosku syntetycznego koreluje również z jakością wykonywanych próbek. Niepewność pomiaru zależała bezpośrednio od wielkości błędu standardowego średniej modułu sztywności sprężystej. Wynik badań średniej modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego był obarczony błędem standardowym średniej (MSE). Charakter zmian tego parametru przedstawiono na Rys. 9.



Należy zwrócić uwagę, że w miarę obniżania temperatury zagęszczania pod wpływem obecności wosków syntetycznych w asfalcie wielkość błędu MSE malała. Ten fakt może być związany z niższą temperaturą zagęszczania i niższym poziomem dynamiki wymiany ciepła w mieszance mineralno-asfaltowej. W konsekwencji możliwym było wyeliminowanie błędów związanych z nierównomiernym czasem wykonywania prób i tym samym zachowanie większej jednorodności struktury zagęszczonych mieszanek mineralno-asfaltowych.

4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań asfaltu i betonu asfaltowego sformowano następujące wnioski:

Both the modifier concentration and the temperature level exert a lot of influence on the volume of the resilient stiffness modulus of the asphalt concrete. The stiffening level of the bitumen is more perceptible with reference to the modification of bitumen 35/50. A little bit higher influence of the temperature on the level of resilient stiffness modulus of the asphalt concrete with reference to the bitumen 50/70 may be produced by an interaction between a modifier and its phase conversion at a given compaction temperature.

The impact of synthetic wax also corresponds to the quality of collected samples. The measurement uncertainty has directly depended on the standard error size of the mean of resilient stiffness modulus. The test result of the mean resilient stiffness modulus of the asphalt concrete was not precise due to the mean squared error (MSE). Fig. 9 depicts the character of changes to that parameter.

Rys. 9. Zmiany błędu standardowego średniej wartości modułu sztywności betonu asfaltowego MSE w zależności od temperatury zagęszczania oraz ilości wosku syntetycznego (modyfikatora syntetycznego)
Fig. 9. Changes of mean square error of the resilient modulus of elasticity value MSE depending on compaction temperature and synthetic wax content

It is worth mentioning that the MSE level has been going down as the compaction temperature has lowered under the influence of presence of the synthetic wax in bitumen. That fact may be related with the lower compaction temperature and the lower level of heat exchange dynamics in the bituminous mixture. Consequently, it has been possible to eliminate errors related to an uneven time of testing and to retain a higher structural homogeneity of the compacted bituminous mixtures at the same time.

4. CONCLUSIONS

The following conclusions have been drawn from the carried out tests of bitumen and asphalt concrete:

1. Asfalt 35/50 i 50/70 w wyniku modyfikacji woskiem syntetycznym uzyskał mniejszą podatność przy zastosowanych poziomach naprężeń ścinających. Dynamika wpływu wosku syntetycznego na właściwości lepiszcza jest bardziej zauważalna w odniesieniu do asfaltu 35/50.
2. Asfalt 35/50 odznaczał się dużym odkształceniem sprężystym w przedziale wysokich naprężeń według procedury MSCR. Fakt ten wskazuje na strukturyzujący charakter obecności kryształów wosków syntetycznych oraz na podwyższenie poziomu lepkości dynamicznej lepiszcza.
3. Wzrost zawartości modyfikatora spowodował zmianę typu reologicznego asfaltu 35/50 i 50/70 w kierunku typu „żel”.
4. Wzrost ilości wosku syntetycznego F-T (modyfikatora syntetycznego) w zakresie od 1,5% do 4,0% w składzie badanych asfaltów objawia się powstawaniem struktur wosku syntetycznego o zróżnicowanej długości.
5. Zastosowanie asfaltu 35/50 spowodowało podwyższenie wartości poziomu modułu sztywności sprężystej betonu asfaltowego AC 11 S w porównaniu do zastosowania asfaltu 50/70. W niskiej temperaturze badania 2°C oraz niskiej temperaturze zagęszczania około 115°C asfalt 50/70 spowodował wzrost modułu sztywności betonu asfaltowego w porównaniu z zastosowaniem asfaltu 35/50.
6. Mniejsza podatność asfaltu 35/50 według MSCR wpłynęła na wzrost modułu sztywności sprężystej w temperaturze 20°C w porównaniu z zastosowaniem asfaltu 50/70 modyfikowanego woskiem syntetycznym.
7. Obniżenie temperatury zagęszczania spowodowało zmniejszenie różnicy temperatury otoczenia w porównaniu z temperaturą formowania próbek betonu asfaltowego. Fakt ten przyczynił się do wzrostu jednorodności odczytów modułu sztywności sprężystej badanego betonu asfaltowego.
1. As a result of modification with the synthetic wax the bitumen 35/50 and 50/70 have achieved lower compliance alongside the applied levels of shear stress. Dynamics of the synthetic wax effect on the binder properties is more noticeable in relation to the bitumen 35/50.
2. The bitumen 35/50 has singled out with a substantial elastic deformation in the high stress range according to the MSCR procedure. That fact points at a structural participation of synthetic wax crystals and an increase in level of a binder dynamic density.
3. The rise to a modifier content has triggered a change to the rheological kind of the bitumens 35/50 and 50/70 towards a “gel” type.
4. The amount growth of the synthetic wax F-T (a synthetic modifier) in the 1.5% to 4.0% range of the composition of the tested bitumens has manifested itself in the formation of synthetic wax structures of diversified lengths.
5. The application of the bitumen 35/50 has caused an increase in levels of values of the resilient stiffness modulus of the asphalt concrete AC 11 S in comparison with the corresponding results related to the bitumen 50/70. The latest has brought about an increase in the stiffness modulus of the asphalt concrete comparing with the performance of the bitumen 35/50.
6. The lower compliance of the bitumen 35/50 according to MSCR had an effect on the increase in resilient stiffness modulus at the temperature of 20°C when compared with the application of the synthetic wax modified bitumen 50/70.
7. The decrease in compaction temperature has provoked a difference reduction in the ambient temperature compared with the temperature of forming asphalt concrete samples. That fact has contributed to the increase in the measurement reading homogeneity of resilient stiffness modulus of tested asphalt concrete.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Judycki J., Dołżycki B.*: Analiza deformacji trwałych nawierzchni asfaltowych na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych. VIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB „Inżynieria komunikacyjna”, Krynica, 4, 2002, 201 - 208
- [2] GDDKiA, WT 2 2010 – Wymagania Techniczne. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, Załącznik Nr 2 do Zarządzenia Nr 102, Warszawa, 2010
- [3] *Edwards Y., Redelius P.*: Rheological effects of waxes in bitumen. *Energy & Fuels*, **145**, 2003, 42 - 82
- [4] *Lu X., Langton M., Redelius P.*: Wax morphology in bitumen. *Journal of Materials Science*, **40**, 8, 2005, 1893 - 1900
- [5] *Michon L.C., Netzel D.A., Planche J.P.*: NMR and DSC study of the amorphous and crystalline phases in asphalt. *Energy & Fuels*, **13**, 3, 1999, 602 - 610

- [6] *Lu X., Redelius P.*: Compositional and structural characterization of waxes isolated from bitumens. *Energy & Fuels*, **20**, 2, 2006, 653 - 660
- [7] *Polacco G., Filippi S., Paci M.*: Structural and rheological characterization of wax modified bitumens. *Fuel*, **95**, 2012, 407 - 416
- [8] *Butz T.*: Warm Mix Asphalt – Technologies, Research and Experience. Sasol Wax GmbH
<http://www.pkd.org.pl/pliki/referaty/butz.pdf>
- [9] *Silva H., Oliviera J., Peralta J., Zoorob S.*, Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*, **24**, 9, 2010, 1621 - 1631
- [10] *Merusi F., Giuliani F.*: Rheological characterization of wax-modified asphalt binders at high service temperatures. *Materials and Structures*, **44**, 10, 2011, 1527 - 1538
- [11] Product Information. The Bitumen Additive for Highly Stable Easy Compatible Asphalts, 2008
- [12] *Bahia H.U.*: Modeling of Asphalt binder Rheology and Its application to Modified Binders, in: *Modeling of Asphalt Concrete*. ASCE Press, McGraw-Hill Construction, New York, 2004, 11 - 64
- [13] Office of Pavement Technology. The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure, Technical-Brief, FHWA-HIF-11-038, April 2011
- [14] *Iwański M., Mazurek G.*: Water and Frost Resistance of Asphalt Concrete Produced in the Warm Technology. 10th International Conference Modern Building Materials. Structures and Techniques in Vilnius, 19-21 May, 2010, 200 - 206
- [15] *Sybilski D.*: Zero-shear viscosity of bituminous binder and its relation to bituminous mixture's rutting resistance. *Transportation Research Record*, **1535**, 1996, 15 - 21
- [16] *Montgomery D.G.*: Design and Analysis of Experiments. 5th Edition, John Wiley and Sons, New York, 2001, 45 -51
- [17] *Szydłowski H.*: Międzynarodowe normy oceny niepewności pomiarów. *Postępy Fizyki*, Wydział Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza, **51**, 2, 2000, 92 - 97