

# Wpływ dodatku wosku syntetycznego Fischera-Tropscha na właściwości funkcjonalne asfaltu

Iwański M.<sup>1),\*)</sup>, Mazurek G.<sup>1)</sup>

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.272

**Streszczenie:** Przeanalizowano wpływ różnej zawartości (0,5–4,0 % mas.) wosku syntetycznego Fischera-Tropscha (F-T) w mieszance z asfaltem 35/50 na: penetrację ( $P$ ), temperaturę łamliwości Fraassa ( $T_{Fraass}$ ), temperaturę mięknięcia ( $T_{PiK}$ ), lepkość dynamiczną ( $\eta$ ) w temp. 60–145 °C, moduł zespolony ( $G^*$ ), lepkość zerowego ścinania ( $ZSV$ ), kąt przesunięcia fazowego ( $\delta$ ) oraz charakterystykę MSCR lepiszcza przeznaczonego do wytworzenia mieszanki mineralno-asfaltowej metodą „na ciepło” (WMA). Wykazano, że badany modyfikator, już w ilości 1 % mas., korzystnie wpływa na oceniane właściwości funkcjonalne asfaltu, zwłaszcza na jego charakterystykę reologiczną.

**Słowa kluczowe:** asfalt, wosk syntetyczny F-T, właściwości reologiczne, metoda WMA.

## Effect of Fischer-Tropsch synthetic wax additive on the functional properties of bitumen

**Abstract:** The effects of the addition of various amounts (0.5–4.0 wt %) of Fischer-Tropsch synthetic wax (F-T) to bitumen 35/50 on the penetration ( $P$ ), Fraass breaking point temperature ( $T_{Fraass}$ ), softening point temperature ( $T_{PiK}$ ), dynamic viscosity ( $\eta$ ) in the temperature range of 50 to 145 °C, complex modulus ( $G^*$ ), zero shear viscosity ( $ZSV$ ), phase angle ( $\delta$ ) and characteristics according to MSCR of the binder prepared using Warm Mix Asphalt (WMA) method, have been analyzed. It was found that the examined modifier, even in the amount of 1 wt %, had a beneficial effect on the functional properties of the bitumen, particularly on its rheological characteristics.

**Keywords:** bitumen, F-T synthetic wax, rheological properties, WMA method.

Oszczędność energii oraz ochrona środowiska to podstawowe i najważniejsze cele współczesnej gospodarki, w tym również drogownictwa. Nawierzchnie drogowe wykonuje się z mieszanek mineralno-asfaltowych, wytwarzanych w bardzo wysokiej temperaturze, dochodzącej nawet do 220 °C (asfalt lany) [1], ważne jest więc obniżenie tej temperatury, a jednocześnie zachowanie właściwości mieszanek na poziomie wymaganym w normach [2, 3]. W ostatnim okresie rozwija się technologia produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło” – WMA (*Warm Mix Asphalt*) [4–6] pozwalającą na obniżenie, o ok. 20–30 °C, temperatury zarówno wytwarzania (ok. 165 °C), jak i wbudowania (ok. 145 °C) mieszanki mineralno-asfaltowej [7]. Jednym ze sposobów stosowanych w celu osiągnięcia takiego efektu jest wykorzystanie modyfikatorów, pełniących rolę środka zmniejszającego lepkość asfaltu, a tym samym umożliwiającego obtaczanie kruszywa lepiszczem o temperaturze niższej niż temperatura tradycyjnego gorącego lepiszcza [2]. Jednym z modyfikatorów tego rodzaju jest wosk syntetyczny otrzymywany w wyniku syntezy Fi-

schera-Tropscha (F-T) [8]. Wosk syntetyczny w istotnym stopniu różni się od naturalnej parafiny występującej w ropie naftowej. Jest długołańcuchowym węglowodorem (łańcuchy węglowodorowe złożone z 40–115 atomów węgla) uzyskiwanym z CO i H<sub>2</sub> w procesie syntezy Fischera-Tropscha. Ma bardziej drobnokrystaliczną budowę niż naturalna parafina (łańcuchy węglowodorowe parafin naturalnych zawierają 15–50 atomów węgla) [9]. Wdrożenie tego modyfikatora musi być jednak poprzedzone kompleksowymi badaniami dotyczącymi jego wpływu na właściwości funkcjonalne, a w szczególności na charakterystyki reologiczne lepiszcza, umożliwiające dokonanie oceny oddziaływania wosków syntetycznych na jakość nawierzchni asfaltowej w długim okresie jej eksploatacji.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

– Asfalt 35/50 (Petrochemia Orlen, Płock), przeznaczony do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych, stosowanych na warstwę wiążącą i podbudowę asfaltową nawierzchni obciążonych ruchem większym niż określony kategorią KR2.

<sup>1)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce.

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji; e-mail: miwanski@tu.kielce.pl

– Wosk syntetyczny F-T w ilości 0,5–4,0 % mas. (produkt koncernu SasolWax).

### Metodyka badań

Do oceny wpływu wosku syntetycznego F-T na parametry funkcjonalne asfaltu 35/50 opracowano program badawczy, składający się z dwóch zasadniczych etapów. Pierwszy etap obejmował wyznaczenie właściwości asfaltu modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T, takich jak: temperatura mięknięcia wg PN-EN 1427, penetracja w 25 °C wg PN-EN 1426 i temperatura łamliwości Fraassa ( $T_{Fraass}$ ) wg PN-EN 12593.

Drugi etap natomiast polegał na kompleksowej ocenie właściwości reologicznych asfaltu na podstawie lepkości dynamicznej (wg PN-EN 13302), modułu zespolonego, lepkości dynamicznej w funkcji prędkości ścinania, lepkości zerowego ścinania (ZSV), kąta przesunięcia fazowego i charakterystyk MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery test*) [10], do której wykorzystano zaadaptowane postanowienia amerykańskiej normy ASHTO TP 70: *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Całościową ocenę wpływu dodatku wosku syntetycznego na charakterystykę asfaltu wykonano z zastosowaniem algorytmu optymalizacji wielokryterialnej.

Na podstawie wyznaczonych wartości penetracji w 25 °C oraz temperatury mięknięcia modyfikowanego asfaltu 35/50, wyznaczono indeks penetracji (IP) wg wzoru:

$$IP = \frac{20T_{PIK} + 500 \log P - 1952}{T_{PIK} - 50 \log P + 120} \quad (1)$$

gdzie:  $T_{PIK}$  – temperatura mięknięcia (°C),  $P$  – penetracja w 25 °C (0,1 mm).

– Lepkość zerowego ścinania (ZSV) asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem F-T wyznaczono w warunkach małych prędkości ścinania, odzwierciedlających długi czas obciążenia nawierzchni drogi [11]. Ze względu na teoretyczny charakter tego parametru w badaniu zastosowano częstotliwość 0,005 Hz. Uzyskany poziom *plateau* parametru ZSV odpowiada szybkości ścinania  $\dot{\gamma} = 0,0032 \text{ s}^{-1}$  [12]. Pomiary wykonano za pomocą testów oscylacyjnych. Wartość maksymalnej amplitudy – w danym przedziale temperaturowym – odpowiadała stanowi liniowej lepko-sprężystości LVE (ang. *linear viscoelasticity*) asfaltu. Wstępnie ustalono, że wartość amplitudy nie może przekraczać 50 Pa (tak jak w przypadku asfaltu

niemodyfikowanego, w temp. 60 °C). Wyboru danego zakresu dokonano na podstawie wyników testów rozpoznawczych oraz zaleceń PKN-CEN/TS 15325. Jako wartość lepkości strukturalnej ZSV modyfikowanego asfaltu 35/50 przyjęto średnią z wyników trzech pomiarów, w których wartości pojedynczych oznaczeń nie różniły się więcej niż o 5 %.

– Kompleksową analizę wpływu wosku syntetycznego F-T na parametry reologiczne asfaltu 35/50 przeprowadzono z wykorzystaniem metody SHRP (ang. *Strategic Highway Research Program*). Badania wykonywano z obciążeniem cyklicznym o częstotliwości 1,59 Hz (odpowiednik czasu obciążenia nawierzchni drogi przez pojazdy jadące z prędkością 60 km/h) w funkcji temperatury [11, 13], zgodnie z normą EN 14770:2012. Badania takie umożliwiają wyeliminowanie lepiszczy zbyt podatnych, których eksploatacja może prowadzić do wzrostu szybkości ścinania i generowania deformacji nawierzchni w kształcie kolein. Ponadto badania te pozwalają na wyznaczenie temperatury równoważnej, w której asfalt odznacza się nadmierną podatnością. Porównanie wartości tej temperatury z maksymalną temperaturą eksploatacyjną nawierzchni (w Polsce przyjmuje się 60 °C) dostarcza danych dotyczących sztywności asfaltu w trakcie eksploatacji. Asfalty niepoddane procesowi starzenia powinny się charakteryzować parametrem ( $G^*$ )/sin  $\delta$  o wartości większej niż 1000 Pa ( $G^*$  – moduł zespolony,  $\delta$  – kąt przesunięcia fazowego).

### WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

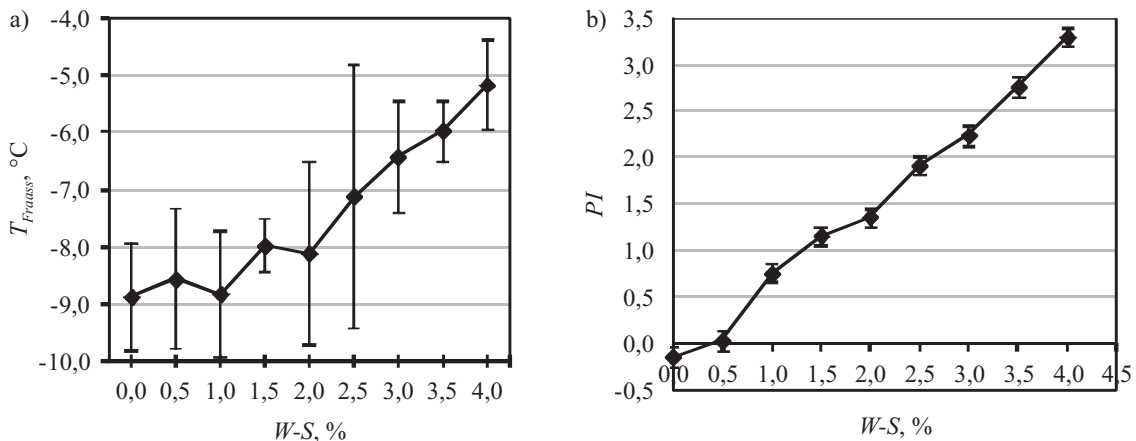
Wyniki oznaczeń podstawowych cech asfaltu wraz z niepewnością rozszerzoną pomiaru przedstawiono w tabeli 1.

Dodatek wosku syntetycznego F-T do asfaltu 35/50 powoduje niekorzystne zwiększenie jego temperatury łamliwości (rys. 1a). W przypadku asfaltu zawierającego 2,5 % mas. wosku obserwuje się wzrost  $T_{Fraass}$  o ok. 2,0 °C, co stanowi zmianę o ponad 20 % w odniesieniu do wartości  $T_{Fraass}$  asfaltu niemodyfikowanego. Większe stężenie wosku syntetycznego F-T w lepiszczu może prowadzić do braku odporności na spękania niskotemperaturowe warstwy konstrukcyjnej nawierzchni wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej z udziałem takiego lepiszcza. W związku z tym do modyfikacji woskiem syntetycznym są przeznaczone asfalty o większej zawartości peptyzantów [1].

T a b e l a 1. Podstawowe właściwości asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem F-T

T a b l e 1. Basic properties of bitumen 35/50 modified with F-T wax

Parametr	Zawartość wosku syntetycznego F-T (W-S), % mas.								
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Penetracja (P), 0,1 mm	39,5 ± 1,76	36,5 ± 1,27	32,2 ± 1,88	30,0 ± 1,88	26,4 ± 2,42	24,6 ± 1,11	22,0 ± 2,04	20,4 ± 1,72	18,4 ± 1,53
Temperatura mięknięcia ( $T_{PIK}$ ), °C	57,0 ± 0,32	58,7 ± 0,7	64,0 ± 0,10	67,2 ± 0,55	70,0 ± 0,55	74,5 ± 0,90	78,2 ± 0,42	83,1 ± 0,68	89,0 ± 0,32



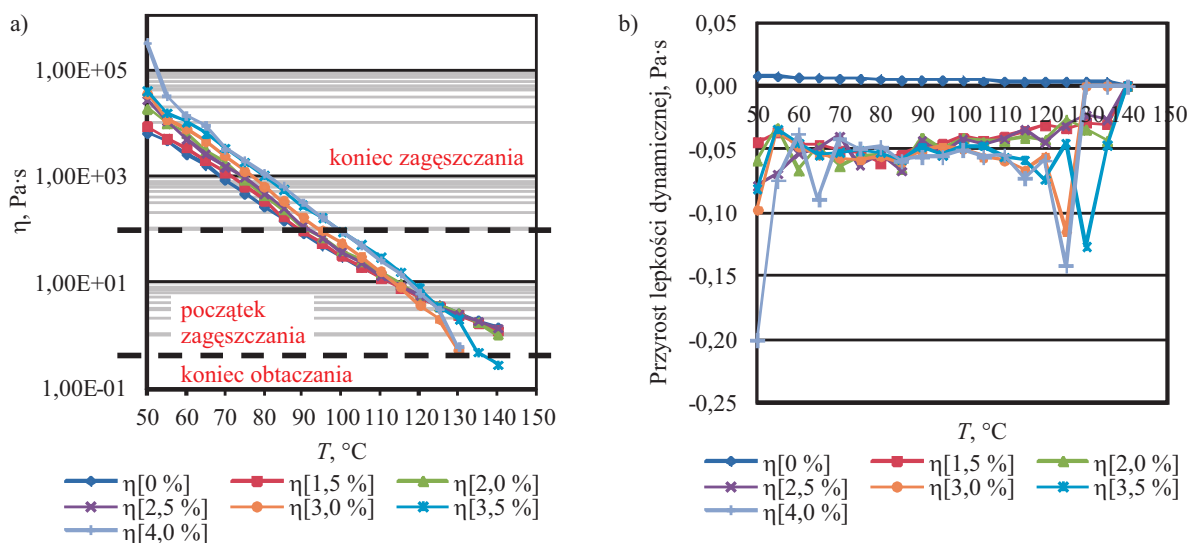
Rys. 1. Zależność: a) temperatury łamliwości ( $T_{Fraass}$ ), b) indeksu penetracji (IP) asfaltu 35/50 od zawartości wosku syntetycznego F-T (W-S)

Fig. 1. Dependence of: a) breaking point temperature ( $T_{Fraass}$ ), b) penetration index (IP) of bitumen 35/50 on the F-T synthetic wax content (W-S)

Na wykresie indeksu penetracji asfaltów zaznaczone słupki błędów prezentują niepewność pomiaru przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  (rys. 1b). Stwierdzono, że zastosowanie wosku syntetycznego F-T powoduje zwiększenie indeksu penetracji modyfikowanego asfaltu 35/50. Indeks penetracji +2,0 (umowna granica przejścia asfaltu w stan żelu) osiąga asfalt 35/50 modyfikowany za pomocą 3,0 % mas. wosku syntetycznego F-T. Zgodnie z [14, 15] zalecana wartość IP powinna się zawierać w przedziale -1,0–0,7 (takiej wartości nie określają Polskie Normy). Zgodnie z podanymi wytycznymi maksymalna ilość wosku syntetycznego F-T, zastosowana do modyfikacji asfaltu 35/50, nie powinna być większa niż 1,0 % mas. (rys. 1b), co odpowiada indeksowi penetracji równemu ok. +0,7.

Do oceny zachowania asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T, w zakresie wartości temperatury technologicznej wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej oraz eksploatacji nawierzchni, posłużył pomiar lepkości dynamicznej w przedziale temp. 50–145 °C (rys. 2), przy stałej prędkości obrotowej 1 s<sup>-1</sup>.

Przyrost lepkości lepszca określono jako współczynnik kierunkowy prostej odpowiadającej zależności logarytmu lepkości od temperatury. Dokładność odczytu lepkości przy zadanym kroku temperaturowym (co 10 °C) umożliwiła wyodrębnienie przedziałów temperatury, w których oddziaływanie wosku na asfalt w wyniku jego przemiany fazowej jest najwyraźniejsze. W zakresie 50–80 °C występuje zauważalna zmiana lepkości dynamicznej modyfikowanego asfaltu 35/50 jako efekt poja-



Rys. 2. Zależność: a) lepkości dynamicznej ( $\eta$ ), b) przyrostu zmian lepkości dynamicznej [ $\log(\eta)$ ] w funkcji temperatury asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

Fig. 2. Dependence of: a) dynamic viscosity ( $\eta$ ), b) increase in dynamic viscosity [ $\log(\eta)$ ] on the temperature of bitumen 35/50 modified with F-T synthetic wax

wienia się form krystalicznych wosku syntetycznego F-T. Zwiększenie zawartości modyfikującego wosku w połączeniu z obniżeniem temperatury wpłynęło na wzrost sztywności asfaltu w temperaturze poniżej 80 °C. Ponieważ przedział temperaturowy przemiany fazowej wosków syntetycznych F-T nie jest ściśle ustalony (charakter krystalitów wosku Fishera-Tropscha jest częściowo amorficzny i częściowo krystaliczny), kolejnym charakterystycznym dla modyfikowanego asfaltu 35/50 zakresem temperatury jest temperatura większa niż 105 °C. Wosk syntetyczny F-T po przekroczeniu temperatury krzepnięcia topnieje, zwiększa swoją objętość, a tym samym intensywnie rozprasza fazę asfaltenową w sporządzonym lepiszczu.

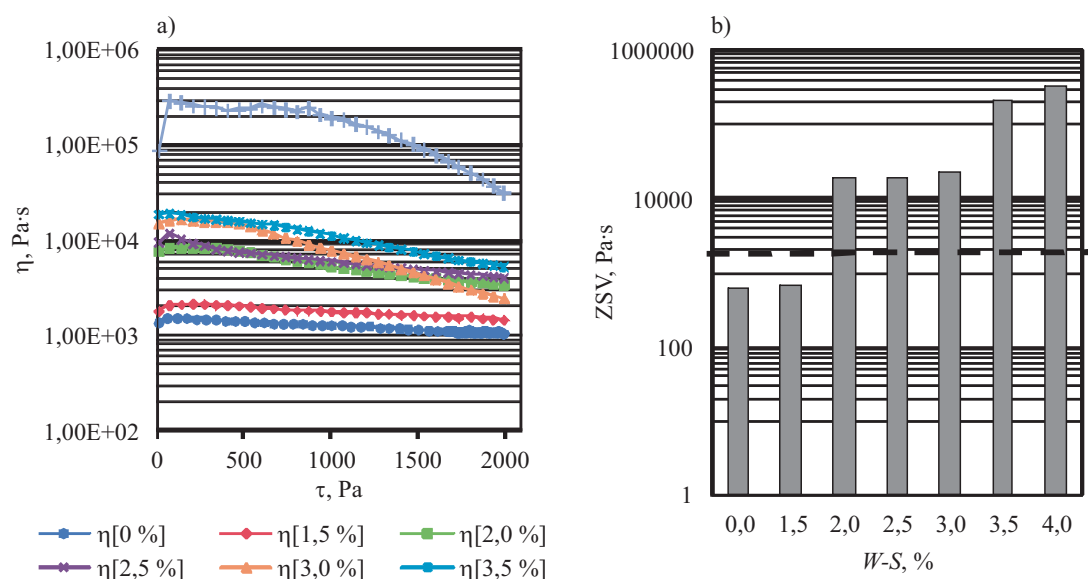
Lepkość dynamiczna modyfikowanego asfaltu 35/50 zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury oraz zwiększa się w miarę zwiększania dodatku wosku syntetycznego F-T. W temperaturze 115 °C lepkość dynamiczna asfaltu 35/50 zawierającego 2,5 % mas. wosku wyraźnie maleje. Linie poziome (przerwane) wyznaczają charakterystyczne wartości graniczne lepkości asfaltu w procesie technologicznym. Pierwsza wartość graniczna = 2 Pa · s odpowiada lepkości dynamicznej asfaltu, po osiągnięciu której należy zakończyć proces wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej, natomiast druga granica = 20 Pa · s odnosi się do lepkości dynamicznej asfaltu pod koniec procesu efektywnego zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej [15]. Należy zauważyć, że udział wosku syntetycznego F-T w ilości ok. 2,5 % mas. obniża o 15 °C temperaturę efektywnego obtaczania kruszywa lepiszczem (por. lepkość dynamiczną  $T > 120$  °C). Tym samym zmniejsza się również temperatura zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej.

Poznanie mechanizmu wpływu wosku syntetycznego F-T na lepkość dynamiczną asfaltu 35/50 wymaga oznaczenia jej w temp. 60 °C, w warunkach naprężenia ścinającego do 2000 Pa, w trybie CS (ang. *controlled stress*). Prędkość ścinania dostosowywano automatycznie, w zależności od naprężeń ścinających.

Rysunek 3 przedstawia zmiany lepkości asfaltu 35/50 z udziałem wosku syntetycznego F-T. W temperaturze 60 °C poziom naprężeń stycznych, przy którym następuje uplastycznienie asfaltu 35/50 i, tym samym, naruszenie jego struktury zwiększa się wraz z zawartością modyfikatora. Dodatek 4,0 % mas. wosku F-T spowodował znaczny wzrost granicy płynięcia asfaltu odpowiadającej asfaltowi niemodyfikowanemu.

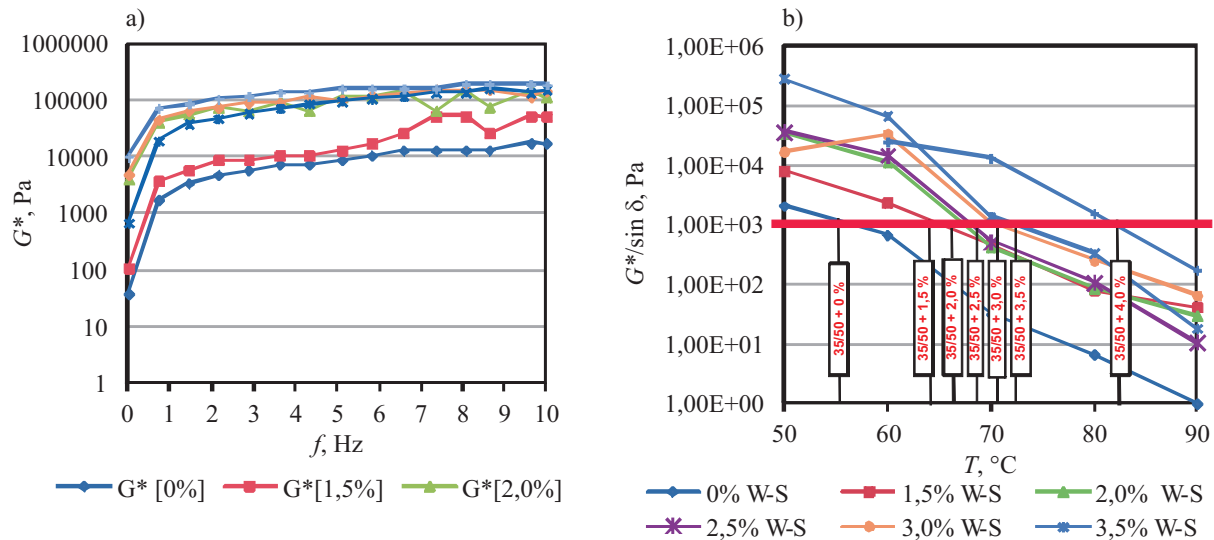
Dodatek wosku F-T w ilości 1,5 % mas. do asfaltu 35/50 powoduje wzrost jego lepkości dynamicznej o 100 Pa · s w temp. 60 °C, co wskazuje, że w zależności od temperatury wosk syntetyczny F-T krystalizuje w asfalcie z różną dynamiką. Obecny w asfalcie 35/50 wosk w istotny sposób wpływa na stopień deformacji mieszanki mineralno-asfaltowej. Zmniejszenie podatności asfaltu 35/50 w wyniku modyfikacji woskiem syntetycznym F-T przyczynia się do redukcji efektu pełzania zagęszczanej mieszanki mineralno-asfaltowej, co z kolei ogranicza szybkość z jaką ulega ona deformacji. Lepkość strukturalna nienaruszonej zależy przede wszystkim od udziału w lepiszczu fazy krystalicznej wosków, gdyż – jak ustalono wcześniej – asfalt 35/50 niepoddany modyfikacji w temp. powyżej 60 °C wykazywał cechy reologiczne cieczy newtonowskiej.

Stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem zawartości wosku syntetycznego F-T w mieszance z asfaltem 35/50, poziom jej lepkości ZSV rośnie (rys. 3b). Istotny parametr



Rys. 3. Lepkość: a) dynamiczna ( $\eta$ ) w funkcji szybkości ścinania ( $\tau$ ) w temp. 60 °C, b) strukturalna (ZSV) asfaltu 35/50 modyfikowanego różną ilością wosku syntetycznego F-T

Fig. 3. Viscosity: a) dynamic ( $\eta$ ) as a function of shear rate ( $\tau$ ) at temperature 60 °C, b) low shear (ZSV) of bitumen 35/50 modified with various amounts of F-T synthetic wax



Rys. 4. Wpływ dodatku wosku syntetycznego F-T na: a) moduł zespolony ( $G^*$ ) w temp. 60 °C, b) część sprężystą modułu zespolonego ( $G^*/\sin \delta$ ) asfaltu 35/50

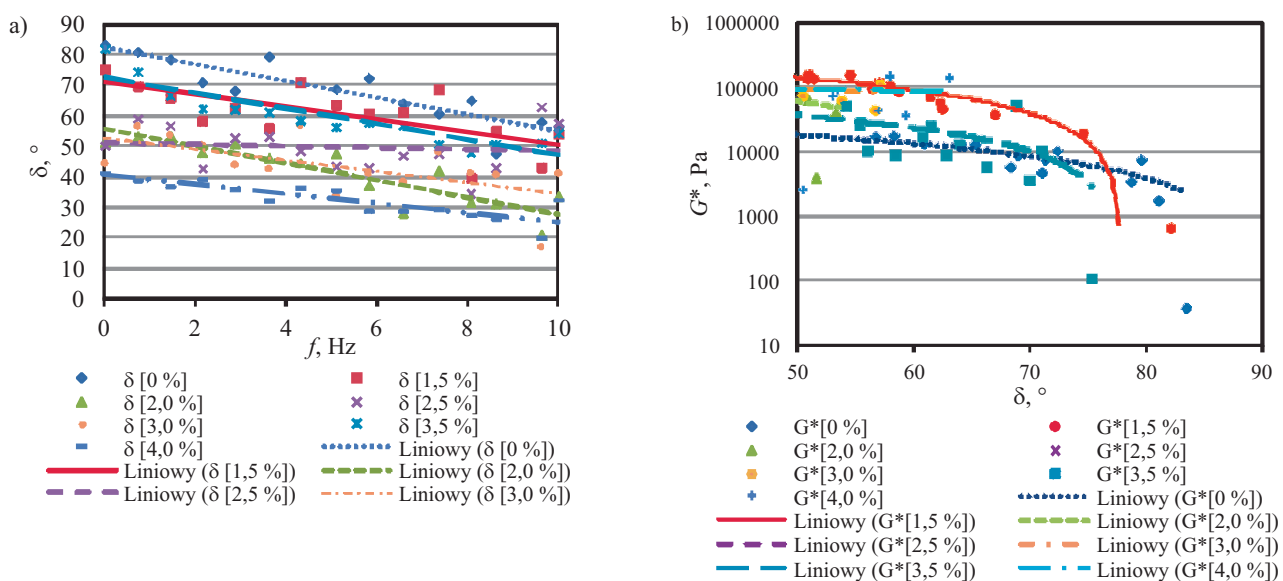
Fig. 4. Effect of F-T synthetic wax additive on: a) complex modulus ( $G^*$ ) at temperature 60 °C, b) elastic component of the complex modulus ( $G^*/\sin \delta$ ) of bitumen 35/50

przeprowadzonej analizy stanowi wartość  $EVT$  (*equi-viscosity temperature*), określająca zakres temperatury odpowiadającej lepkości strukturalnej większej niż  $2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .  $EVT$  odpowiada wartości krytycznej temperatury (dla danego poziomu lepkości dynamicznej), powyżej której mogą wystąpić deformacje lepko-plastyczne nawierzchni, spowodowane małą sztywnością asfaltu, zwłaszcza obciążonej ruchem pojazdów ciężkich [16, 17].

W temperaturze 60 °C asfalt 35/50 modyfikowany woskiem F-T w ilości 1,5 % mas. osiągnął wymagany poziom lepkości strukturalnej (rys. 3b). Mniejsza zawartość

modyfikatora wywiera niewielki wpływ na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na odkształcenia w tej temperaturze. Natomiast zwiększenie dodatku wosku syntetycznego F-T do asfaltu 35/50 do ponad 2,0 % mas. powoduje, że uzyskane lepiszcze przenosi częściowo naprężenia ścinające (w wyniku wzrostu lepkości zerowego ścinania) w mieszance mineralno-asfaltowej w temperaturze eksploatacyjnej nawierzchni (rys. 3b).

Kompleksowej oceny modyfikowanego woskiem F-T asfaltu 35/50, jako materiału lepko-sprężystego, dokonano na podstawie modułu zespolonego wyznaczonego w



Rys. 5. a) Wpływ częstotliwości obciążenia na wartość kąta przesunięcia fazowego ( $\delta$ ) asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T, w temp. 60 °C, b) korelacja kąta przesunięcia fazowego i modułu zespolonego

Fig. 5. a) Effect of load frequency on the phase angle ( $\delta$ ) of bitumen 35/50 modified with F-T synthetic wax at temperature 60 °C, b) correlation between phase angle and complex modulus

temp. 60 °C, w funkcji częstotliwości, odpowiadającej czasowi obciążenia nawierzchni przez osł pojazdu (rys. 4a).

Dodatek wosku syntetycznego F-T do asfaltu 35/50 powoduje korzystną zmianę jego modułu zespolonego, w badanym zakresie częstotliwości obciążenia, wyraźną zwłaszcza w przedziale 0–2 Hz, reprezentującym czas obciążenia nawierzchni przez pojazdy poruszające się z prędkością do 60 km/h. Nawierzchnie asfaltowe w tym właśnie zakresie częstotliwości obciążenia są szczególnie narażone na deformacje (widoczne głównie w rejonach skrzyżowań). Wpływ czasu obciążenia na moduł zespolony w temp. 60 °C lepszycza modyfikowanego woskiem F-T w ilości powyżej 2,5 % mas. jest 10-krotnie mniejszy niż w przypadku niemodyfikowanego asfaltu 35/50 (rys. 4a). W praktyce dąży się do uzyskania lepisczka odpornego na zmiany  $G^*$  w przedziale częstotliwości obciążeń do 2 Hz.

W zakresie częstotliwości 2–10 Hz zmiany modułu zespolonego asfaltu 35/50 modyfikowanego różną ilością wosku pozostają na podobnym poziomie. Wiąże się to ze znaczną różnicą między czasem relaksacji naprężeń w asfalcie, a czasem obciążenia, zwiększającą się z zawartością modyfikatora w mieszance. W temp. 60 °C zwiększająca się sztywność asfaltu zawierającego 2,5–4,0 % mas. wosku F-T powoduje wydłużenie czasu jego relaksacji, a w konsekwencji, w przybliżeniu stały, wzrost modułu zespolonego w zakresie częstotliwości obciążenia powyżej 1 Hz. W przypadku asfaltu 35/50 niemodyfikowanego takie zjawisko występuje dopiero po przekroczeniu wartości częstotliwości obciążenia 2 Hz.

Z oznaczeń parametru  $G^*/\sin \delta$  wynika (rys. 4b), że niemodyfikowany asfalt 35/50, w temp. 60 °C wykazuje wartości tego parametru poniżej wartości krytycznej (1000 Pa – linia czerwona, rys. 4b), co oznacza, że wpływ na koleinowanie mieszanki mineralno-asfaltowej w tej temperaturze będzie miało uziarnienie i jego kąt tarcia wewnętrznego. Lepiszczce modyfikowane dodatkiem 1,5 % mas. wosku syntetycznego F-T charakteryzuje się większą wartością  $G^*/\sin \delta$  niż jest wymagana w temp. 60 °C. Mieszanka mineralno-asfaltowa z asfaltu 35/50 z udziałem 2,5 % mas. wosku F-T jest odporna na deformacje trwałe w temp. bliskiej 70 °C. W przypadku asfaltu 35/50 z dodatkiem 4 % mas. wosku, wartość  $G^*/\sin \delta = 1000$  Pa jest osiągnięta w temp. 80 °C [7]. Jest to związane z obecnością w modyfikowanym asfalcie w tej temperaturze fazy krystalitów wosku F-T, w istotnym stopniu wpływających na charakter struktury asfaltu 35/50.

Oznaczenie kąta przesunięcia fazowego modyfikowanego asfaltu 35/50 (rys. 5) wykonano według procedur zastosowanych do badania modułu zespolonego.

Wartości kąta przesunięcia fazowego charakteryzują zmiany sprężystości lepisczka poddawanego obciążeniu z częstotliwością rosnącą do 10 Hz, stanowią też wyznacznik zjawiska pełzania w asfalcie. W zakresie niewielkich częstotliwości, do 2 Hz, kąty przesunięcia fazowego lepisczka modyfikowanego i referencyjnego są większe

niż w zakresie częstotliwości ok. 10 Hz. Wynika to z mniejszej różnicy między czasem relaksacji i czasem obciążenia asfaltu 35/50 z dodatkiem wosku syntetycznego F-T, niż asfaltu niemodyfikowanego. Asfalty modyfikowane większą ilością wosku F-T są mniej podatne na proces pełzania. Wartości kąta przesunięcia fazowego lepisczka z udziałem różnej ilości wosku F-T zmieniają się od 15° do 25°.

Modyfikowany asfalt 35/50 z dodatkiem 2 % mas. wosku syntetycznego F-T wykazuje kąt przesunięcia fazowego mniejszy niż 30°. Zwiększanie ilości modyfikatora w lepisczku powoduje zmniejszenie jego kąta przesunięcia. W temp. 60 °C kąt przesunięcia fazowego asfaltu 35/50 zawiera się w przedziale 50–85°, natomiast asfaltu 35/50 z dodatkiem 4 % mas. wosku syntetycznego oscyluje w przedziale 20–40°.

Wartość modułu zespolonego  $G^*$  w zakresie mniejszych wartości kąta przesunięcia fazowego  $\delta$ , na wykresie Blacka (rys. 5b) asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem F-T, dowodzi rosnącego udziału modułu sprężystości w wartości  $G^*$  w stosunku do udziału modułu lepkości. Zbliżony poziom modułu zespolonego  $G^*$  asfaltu 35/50 w odniesieniu do zmniejszającego się kąta przesunięcia fazowego wskazuje na duży udział odpowiedzi sprężystej lepisczka na obciążenie podczas pracy nawierzchni drogi. Jest to potwierdzeniem wniosku, że modyfikacja asfaltu 35/50 woskiem syntetycznym F-T zmniejsza korzystnie stopień koleinowania mieszanki mineralno-asfaltowej.

W celu określenia udziału wosku syntetycznego F-T, zapewniającego optymalne właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem 35/50, zastosowano funkcję użyteczności Harringtona [18]:

$$U^m = \exp \left[ -\exp \sum_{i=1}^m w_i \cdot \left( \frac{y^{(i)} - y_G^{(i)}}{y_L^{(i)} - y_G^{(i)}} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie:  $y^{(i)}$  – badane właściwości modyfikowanego asfaltu 35/50,  $y_L^{(i)}$  – wartość gorsza  $i$ -tej właściwości,  $y_G^{(i)}$  – wartość lepsza  $i$ -tej właściwości,  $w_i$  – wagi przypisane poszczególnym właściwościom,  $0 \leq w_i \leq 1$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1.$$

Przyjęto, że wszystkie badane właściwości modyfikowanego asfaltu 35/50 są tak samo istotne. W analizie uwzględniono uzyskane charakterystyki MSCR, opisane w [10]. Wszystkim właściwościom funkcjonalnym lepisczka przypisano więc jednakowe wagi. Stwierdzono, że najkorzystniejsza ilość wosku F-T użyta do modyfikacji asfaltu 35/50 wynosi 2,5 % mas. Dodatek takiej ilości wosku pozwala na osiągnięcie zadawalających właściwości asfaltu 35/50 w niskiej temperaturze – jego podatności w procesie pełzania oraz wysokiego poziomu lepkości struktury nienaruszonej. Ustalono też, że zawartość wosku F-T w ilości 4 % mas. niekorzystnie modyfikuje asfalt 35/50, który wykazuje wysoką temperaturę łamliwości oraz małą elastyczność. Taka ilość modyfikatora nie

może zatem być dodawana do asfaltu przeznaczonego na warstwy ścieralne nawierzchni drogowej.

#### WNIOSKI

– Dodatek wosku syntetycznego F-T w ilości większej niż 2,5 % mas. do asfaltu 35/50 w istotny sposób podwyższa temperaturę łamliwości lepiszcza i zwiększa jego kruchość w wyniku zmniejszenia odporności na działanie niskiej temperatury.

– Dodatek wosku syntetycznego F-T do asfaltu 35/50, w ilości powyżej 2 % mas., w temp. 60 °C wyraźnie zwiększa sztywność lepiszcza w porównaniu ze sztywnością asfaltu niemodyfikowanego. Tak zmodyfikowany asfalt jest materiałem odpowiednim do sporządzania mieszanek mineralno-asfaltowych wykazujących dużą odporność na zjawisko koleinowania.

– Wosk syntetyczny F-T obecny w lepiszczu, w temperaturze 90–105 °C ulega przemianie fazowej, w wyniku czego rozpoczyna się etap upłynnienia asfaltu 35/50 umożliwiającego łatwiejsze obtaczanie kruszywa lepiszczem w temperaturze o ok. 30 °C niższej niż wartości temperatury odpowiadające mieszanom z asfaltem niemodyfikowanym.

– Modyfikowany woskiem syntetycznym F-T asfalt 35/50 utrzymuje stałą lepkość dynamiczną w zakresie większych naprężeń (zakres naprężeń struktury nienaruszonej) niż asfalt niemodyfikowany.

– Optymalny dodatek wosku syntetycznego F-T do asfaltu 35/50, zapewniający najkorzystniejsze właściwości funkcjonalne lepiszcza, wynosi 2,5 % mas.

#### LITERATURA

- [1] Gawęł I., Kalabińska M., Piłat J.: „Asfalt drogowy”, WKŁ, Warszawa 2001, str. 255.
- [2] Iwański M., Mazurek G.: *Archives of Civil Engineering* **2013**, LIX (3), 295. <http://dx.doi.org/10.2478/ace-2013-0016>
- [3] Grabowski W., Janowski L., Wilanowicz J.: *BJRBE* **2013**, VIII (1), 40. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2013.06>
- [4] Hurley G., Prowell B.: Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. NCAT report 05-06, Auburn 2005.
- [5] Polacco G., Filippi S., Paci M.: *Fuel* **2012**, 95, 407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.006>
- [6] Vaitkus A., Cygas D., Laurinavicius A., Perveneckas Z.: *BJRBE* **2009**, 4 (2), 80. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.80-86>
- [7] Iwański M., Mazurek G.: “The influence of the low-viscosity modifier on viscoelasticity behavior of the bitumen at high operational temperature”, 8th International Conference. Environmental Engineering, May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania, p. 1097–1102, ISSN 2029-7092.
- [8] *Zgł. Pat.* 398 906 (2012).
- [9] Xiaohu L., Langton M., Oloffson P.: *Journal of Materials Science* **2005**, 40, 1893. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-005-1208-4>
- [10] Iwański M., Mazurek G.: *Polimery* **2012**, 57, 661. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.661>
- [11] Butz T., Rahimian I.: *Journal of Applied Asphalt Binder Technology* **2001**, 1, 70.
- [12] Morea F., Zerbino R., Agnusdei J.: *Materials and Structures* **2013**, 46, 267. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9900-8>
- [13] Silva H., Oliviera J., Peralta J., Zoorob S.: *Construction and Building Materials* **2010**, 24, 1621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030>
- [14] Bahia H.U.: “Modeling of Asphalt Concrete”, McGraw-Hill, 2004, pp. 11–64.
- [15] Błażejowski K., Olszacki J., Peciakowski H.: *Poradnik Asfaltowy 2014*, Orlen Asfalt Sp. z o.o, Płock 2014.
- [16] Sybilski D.: *Prace IBDiM, Z50*, Warszawa 2000, str. 8–177.
- [17] Zoorob S.E., Castro-Gomes J.P., Pereira Oliveira L.A.: *Construction and Building Materials* **2012**, 27 (1), 357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.037>
- [18] Harrington E.C.: *Industrial Quality Control* **1965**, 4, 494.
- [19] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania”, WKŁ, Warszawa 2008.

Otrzymano 19 II 2014.

