

Wpływ dodatku wosku syntetycznego Fischera-Tropscha na właściwości funkcjonalne asfaltu

Iwański M.^{1),*)}, Mazurek G.¹⁾

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 (η) w temp. 60–145 °C, moduł zespolony (G^*), lepkość zerowego ścinania (ZSV), kąt przesunięcia fazowego (δ) 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 (η) in the temperature range of 50 to 145 °C, complex modulus (G^*), zero shear viscosity (ZSV), phase angle (δ) 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 H₂ 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.

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce.

^{*)} 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 metodyki 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 δ o wartości większej niż 1000 Pa (G^* – moduł zespolony, δ – kąt przesunięcia fazowego).

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

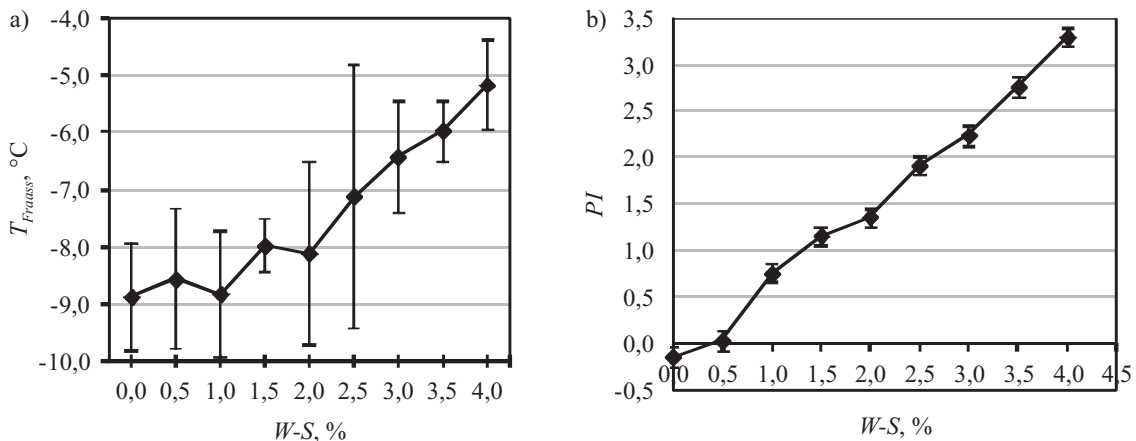
Wyniki oznaczeń podstawowych cech asfaltu wraz z niepewnością rozszerzoną pomiaru przedstawiono w tabeli 1.

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 e 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



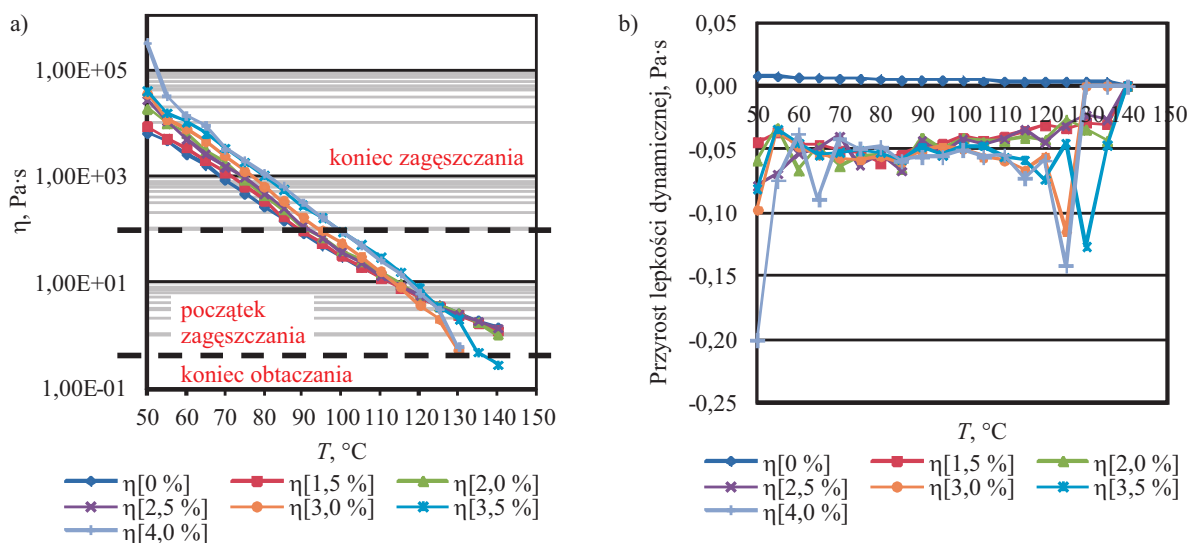
Rys. 1. Zależność: a) temperatury łamliwości (T_{Fraass}), b) indeksu penetracji (IP) asfaltu 35/50 od zawartości wosku syntetycznego F-T (W-S)

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⁻¹.

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 (η), 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 (η), 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.

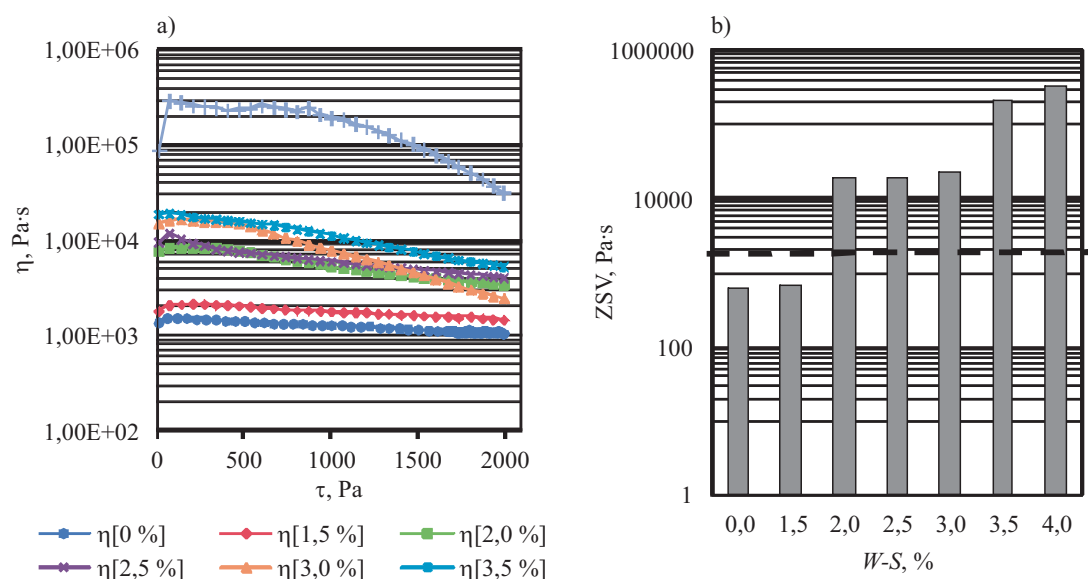
Lepkość dynamiczna modyfikowanego asfaltu 35/50 zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury oraz zwiększa się w miarę zwiększania dodatku wosku syntetycznego F-T. W temperaturze 115 °C lepkość dynamiczna asfaltu 35/50 zawierającego 2,5 % mas. wosku wyraźnie maleje. Linie poziome (przerwane) wyznaczają 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.

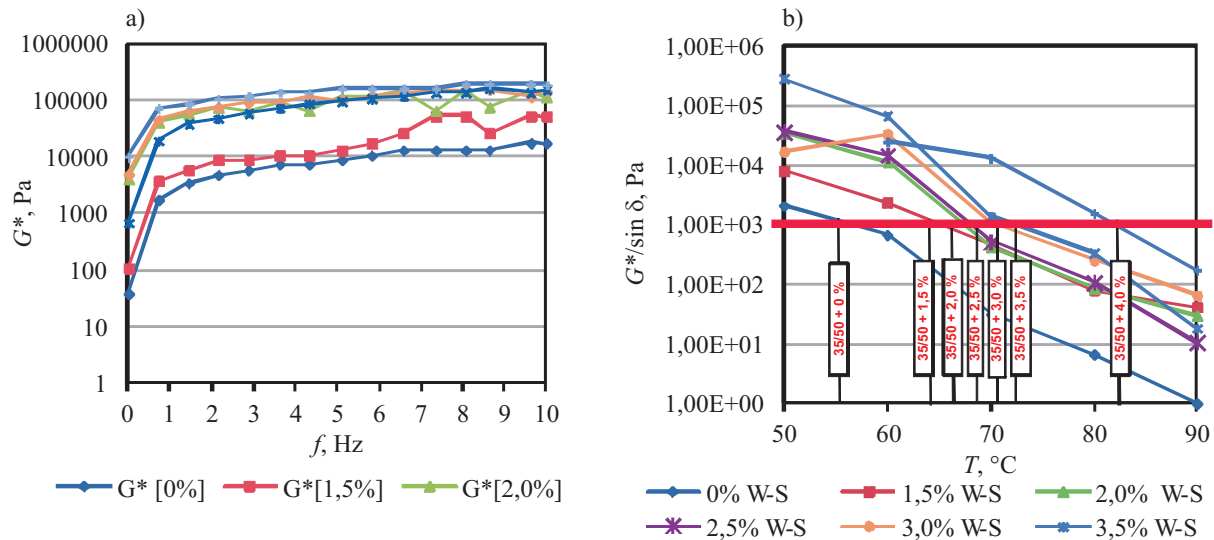
Dodatek wosku F-T w ilości 1,5 % mas. do asfaltu 35/50 powoduje wzrost jego lepkości dynamicznej o 100 Pa · s w temp. 60 °C, co wskazuje, że w zależności od temperatury wosk syntetyczny F-T krystalizuje w asfalcie z różną dynamiką. Obecny w asfalcie 35/50 wosk w istotny sposób wpływa na stopień deformacji 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 (η) w funkcji szybkości ścinania (τ) w temp. 60 °C, b) strukturalna (ZSV) asfaltu 35/50 modyfikowanego różną ilością wosku syntetycznego F-T

Fig. 3. Viscosity: a) dynamic (η) as a function of shear rate (τ) 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

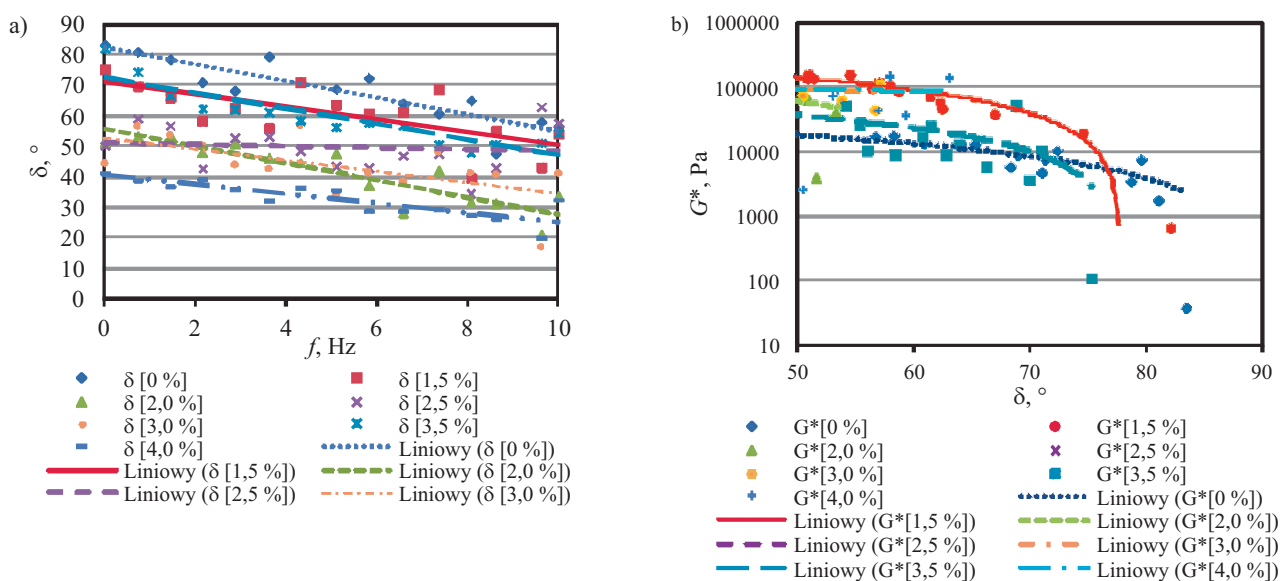
Fig. 4. Effect of F-T synthetic wax additive on: a) complex modulus (G^*) at temperature 60 °C, b) elastic component of the complex modulus ($G^*/\sin \delta$) of bitumen 35/50

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 (δ) 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 (δ) 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 lepiszcza 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 lepiszcza 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 lepiszcza 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 lepiszcza 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 lepiszcza 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 lepiszczu 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 δ , 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 lepiszcza 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 lepiszcza 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.

