Wpływ wybranego modyfikatora na właściwości asfaltu

MAREK IWAŃSKI

Politechnika Świętokrzyska
iwanski@tu.kielce.pl

GRZEGORZ MAZUREK

Politechnika Świętokrzyska
gmazurek@tu.kielce.pl

Prawidłowe zagęszczenie mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) podczas wykonywania warstw konstrukcyjnych drogi do poziomu, w którym zawartość wolnych przestrzeni spełnia kryteria normowe jest niezbędne zarówno do zapewnienia większej trwałości zmęczeniowej oraz odporności na deformacje trwałe, jak i do ograniczenia procesów utleniania i starzenia lepiszcza zachodzących w okresie użytkowania nawierzchni [6].

Na proces właściwego zagęszczenia mma ma niewątpliwie znaczący wpływ optymalny zakres temperatury, podczas którego mma jest wytwarzana i wbudowywana w nawierzchnię. Zakres ten wynika z przedziału lepkości asfaltu, w którym jest zapewnione właściwe otoczenie ziaren kruszywa, a po ułożeniu mma na drodze do jej prawidłowego zagęszczenia [2].

Istotnym czynnikiem zapewniającym prawidłowość procesu zgęszczenia jest dostatecznie wysoka temperatura, w której następuje proces zagęszczania mma. Przy tym należy pamiętać, że temperatura wytworzenia mma jest znacznie wyższa niż temperatura zagęszczania i w zależności od rodzaju asfaltu może wynosić nawet 180°C. Produkcja mma jest więc procesem bardzo energochłonnym, podczas którego emitowane są gazy cieplarniane, które ujemnie wpływają na stan środowiska naturalnego.

Dodatkowo podczas procesu technologicznego wytwarzania i wbudowywania mma produkowanej w wysokiej temperaturze, z wykorzystaniem tradycyjnego asfaltu ponaftowego, wydzielają się lotne związki asfaltu, które mogą mieć negatywny wpływ na zdrowie ludzi wykonujących prace drogowe, zwłaszcza w długim okresie czasu.

Ponadto warstwy konstrukcyjne nawierzchni asfaltowej muszą być odporne na oddziaływanie takich czynników zewnętrznych jak obciążenie ruchem pojazdów oraz na wpływ warunków klimatycznych. Odporność ta w dużym stopniu zależy od tego, jaki rodzaj lepiszcza zostanie zastosowany do sporządzenia mma, przy jednoczesnym uwzględnianiu optymalnego doboru krzywej uziarnienia mieszanki mineralnej. Występują jednak przypadki szczególne, przy których rozwiązania konwencjonalne okazują się nieskuteczne. Dotyczy to sytuacji obciążenia nawierzchni w miejscach długich postojów pojazdów w rejonie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, parkingów itp. [3].

W celu zagwarantowania odpowiednich warunków pracy nawierzchni asfaltowej, zapewnienia jej trwałości dąży się do zwiększenia przedziału plastyczności asfaltu w wyniku zastosowania modyfikatorów.

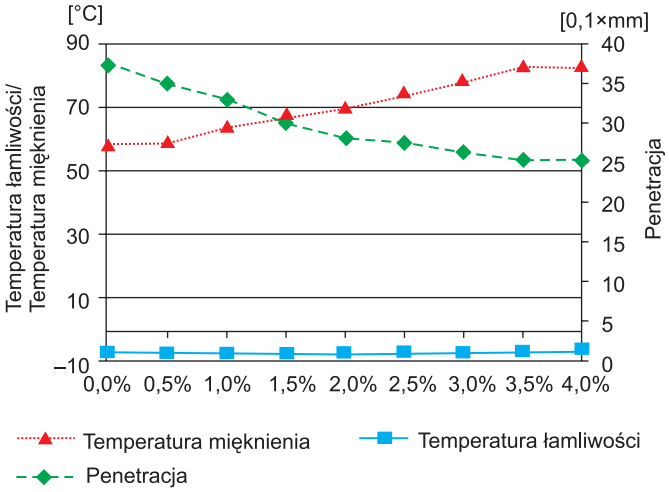
Modyfikacja lepiszcza asfaltowego, poprzez dodanie odpowiednich związków chemicznych powoduje, że lepiszcze ma znacznie większy wpływ na cechy eksploatacyjne nawierzchni asfaltowej w średnich zakresach temperatury użytkowej, a poprzez silne związki korelacyjne [7] zwiększa możliwości prognozowania właściwości nawierzchni w aspekcie reologii samego lepiszcza.

Obniżenie nakładów energetycznych związanych z doprowadzeniem asfaltu do odpowiedniego poziomu lepkości, niezbędnej do otoczenia ziarn kruszywa, a także do obniżania oporu zagęszczania, przy jednoczesnym zwiększeniu odporności na odkształcenia trwałe, można rozwiązać poprzez zastosowanie związków węglowodorów alifatycznych w postaci wosków syntetycznych (produkowanych metodą Fischera – Tropscha). Dodatek wosku syntetycznego umożliwia podwyższenie temperatury mięknienia oraz obniżenie penetracji asfaltu w porównaniu do tradycyjnych asfaltów, co w konsekwencji wpływa na zmianę termicznej wrażliwości asfaltu. Zmianie ulegają również charakterystyki lepko-sprężyste lepiszcza asfaltowego w kierunku materiału o przewadze sprężystej. Taki stan rzeczy doprowadza do możliwości obniżenia efektywnej temperatury zagęszczania mma o 10–30°C i zakwalifikowanie jej do mieszanek wytwarzanych „na ciepło” (*WMA*) [9].

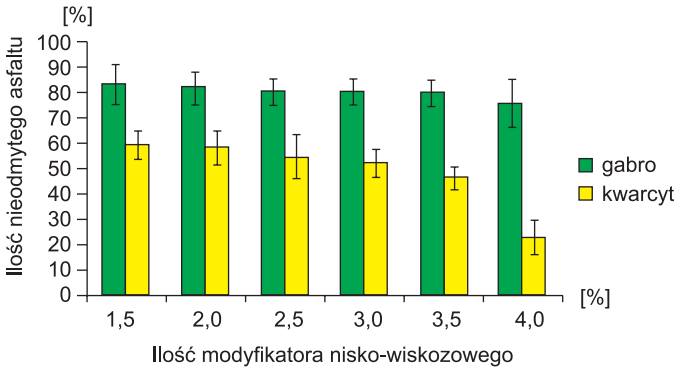
Podstawowe właściwości asfaltu modyfikowanego woskiem syntetycznym

Do badań wpływu wosku syntetycznego na zmiany właściwości lepiszcza asfaltowego zastosowano asfalt 35/50. Modyfikator występujący w postaci granulek dozowano ilości od 0,5% do 4,0%, w stosunku do masy asfaltu 35/50, zwiększając jego ilość co 0,5%(m/m). Wpływ wosku syntetycznego na temperaturę mięknienia, temperaturę łamliwości i penetrację asfaltu 35/50 przedstawiono na rysunku 1.

Analiza wyników badań pozwala stwierdzić, że wzrost zawartości wosku syntetycznego w asfalcie wpływa istotnie na zmiany wybranych cech asfaltu. Przy zawartości wosku syntetycznego w granicach do 1,0%(m/m) jego wpływ na właściwości asfaltu 35/50 jest nieistotny statystycznie. Przy dalszym zwiększaniu jego zawartości można dostrzec dynamikę zmian wartości penetracji oraz temperatury mięknienia. Kon-



Rys. 1. Wpływ wosku syntetycznego na właściwości asfaltu 35/50



Rys. 2. Wpływ zawartości wosku syntetycznego, w %(m/m,) na adhezję asfaltu do kruszywa

centracja wosku syntetycznego w ilości od 2 do 2,5%(m/m) gwarantuje stosunkowo korzystne utwardzenie asfaltu oraz uzyskanie temperatury mięknienia wyższej od temperatury eksploatacyjnej wynoszącej około 60°C oraz niewielki wzrost temperatury łamliwości, nie wpływający negatywnie na zachowanie się asfaltu w zakresach niskiej temperatury.

Adhezja lepiszcza modyfikowanego do kruszywa

Jednym z istotnych elementów oceny odporności mma na działanie wody i mrozu jest analiza wpływu zawartości wosku syntetycznego na zmiany adhezji asfaltu do kruszywa. W badaniach zastosowano kruszywo gabrowe oraz z piaskowca kwarcytowego. Oznaczenie adhezji wykonano zgodnie z PN-EN 12697-11. Wynik badania stanowi odczyt wizualny. Sposób uzyskania wyniku jednak zmodyfikowano, wykorzystując analizę cyfrową obrazu zdjęcia. Z uwagi na to, że wynik pojedynczego zdjęcia może dostarczać niemiarodajne oceny, w badaniach jednej próby wykonano serię zdjęć próbki przed otoczeniem asfaltem, próbki kruszywa otoczonej asfaltem oraz próbki po teście odmywania mechanicznego w temperaturze 60°C. Okazało się, że do uzyskania średniej wartości wyniku oznaczenia na poziomie ufności 95% przy danej dyspersji wyników, wystarczy wykonać do 20 powtórzeń zdjęć przy stałych warunkach badania. Taka sytuacja gwarantuje uzyskanie niepewności pomiaru nieprzekraczającego ±11%. Badania zmian adhezji asfaltu w zależności od zawartości wosku syntetycznego wykonano na kruszywie gabrowym oraz z zastosowaniem kruszywa z piaskowca kwarcytowego (kwarcytu) (rys. 2).

Należy zwrócić uwagę, że wpływ zawartości wosku syntetycznego na adhezję asfaltu jest różny w zależności od rodzaju kruszywa. W celu oceny oddziaływania wosku syntetycznego na adhezję lepiszcza do kruszywa dokonano analizy wariancji jednoczynnikowej przy spełnieniu warunku równych wariancji wraz z grupowaniem Duncana (tabela 1).

Wyniki analizy wariancji jednoczynnikowej wskazują na brak istotnego wpływu zmian zawartości wosku syntetycznego na adhezję zmodyfikowanego asfaltu w zadanej dziedzinie eksperymentu w odniesieniu do kruszywa gabrowego.

Tabela 1. **Wyniki analizy wariancji wraz z grupowaniem Duncana**

Zawartość wosku syntetycznego w lepiszczu asfaltowym	KWARCYT		GABRO	
	Grupowanie Duncna	wpływ (p-value)	Grupowanie Duncna	wpływ (p-value)
1,5%(m/m)	A	istotny (< 0,001)	A	nieistotny (0,2465)
2,0%(m/m)	A		A	
2,5%(m/m)	B		A	
3,0%(m/m)	B		A	
3,5%(m/m)	C		A	
4,0%(m/m)	D		A	

Wyniki analizy z zastosowaniem kwaśnego kruszywa z piaskowca kwarcytowego, charakteryzującego się małym powinowactwem z asfaltem, ujawniły istotny wpływ zawartości wosku syntetycznego. W próbkach z zastosowaniem kruszywa kwarcytowego zmiany zawartości wosku syntetycznego około 1%(m/m) powodowały spadek adhezji (ta sama litera grupowania) nie mniej niż 5% i dynamicznie postępujący w miarę zwiększania zawartości wosku syntetycznego w lepiszczu asfaltowym. Wyniki analizy zmian adhezji asfaltu z zastosowaniem obu skał ujawniły, że dozowanie wosku syntetycznego w ilości do 2%(m/m) nie zmieniły w istotny sposób powierzchni ziarn kruszywa, z których zostało odmyte lepiszcze asfaltowe. Również zawartość 3% (m/m) modyfikatora nie spowodowała drastycznego pogorszenia adhezji lepiszcza w odniesieniu do kruszywa z piaskowca kwarcytowego, ponieważ jej spadek wynosił tylko 13%.

Wpływ wosku syntetycznego na właściwości reologiczne asfaltu

W celu kompleksowej oceny wpływu zawartości wosku syntetycznego na właściwości asfaltu 35/50, konieczne było wykonanie badań reologicznych lepiszcza. Badania te pozwalają dokonać oceny zachowania się lepiszcza asfaltowego poddanego obciążeniu funkcjonalnemu, czyli możliwe jest prognozowanie jego pracy w nawierzchni asfaltowej. W czasie badań reologicznych modyfikowanego asfaltu (woskiem syntetycznym) dokonano oceny następujących wy-

branych jego parametrów reologicznych: indeksu penetracji, lepkości dynamicznej, modułu zespolonego oraz kąta przesunięcia fazowego.

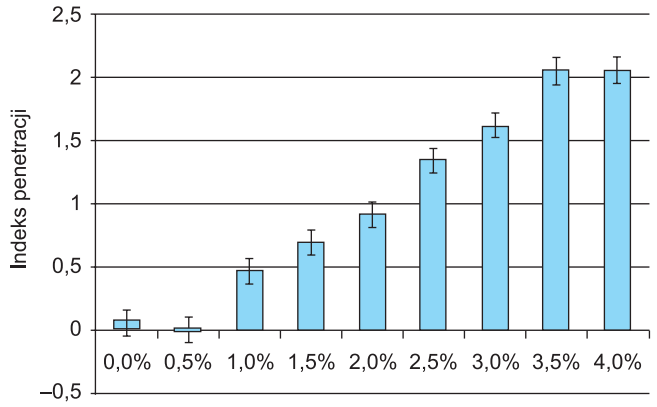
Indeks penetracji

Na wstępie badań reologicznych ocenie poddano ilościowy wpływ dodatku wosku syntetycznego do asfaltu 35/50 na indeks penetracji zmodyfikowanego lepiszcza. Zmianę indeksu penetracji wyrażającego wrażliwość termiczną asfaltu w funkcji penetracji określono zgodnie z PN-EN 12591 za pomocą wzoru:

$$PI = \frac{20 \cdot T_{PiK} + 500 \cdot \lg P - 1952}{T_{PiK} - 50 \cdot \lg P + 120} \qquad (1)$$

w którym:
T_{PiK} – temperatura mięknienia asfaltu w °C,
P – penetracja asfaltu w 25°C.

Wpływ zawartości wosku syntetycznego na zmianę indeksu penetracji, modyfikowanego asfaltu 35/50, przedstawiono na rysunku 3.



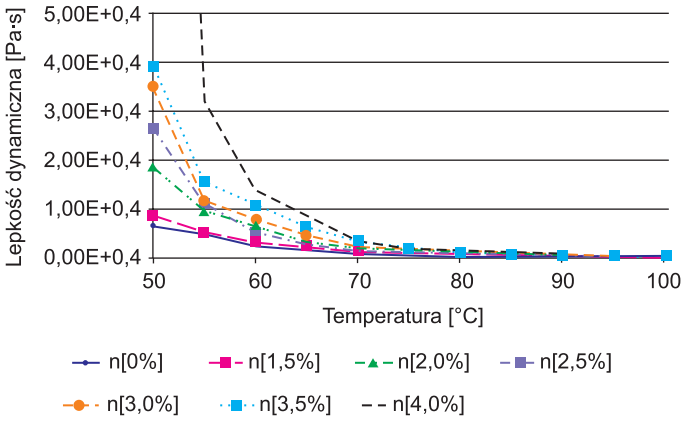
Rys. 3. Wpływ zawartości wosku syntetycznego na indeks penetracji asfaltu 35/50

Analiza statystyczna wyników badań pozwala stwierdzić, że wosk syntetyczny wraz ze wzrostem jego zawartości, wpływa istotnie na zmianę wybranych cech reologicznych asfaltu. Przy zawartości wosku syntetycznego w granicach do 0,5%(m/m) w asfalcie 35/50, wpływ wosku syntetycznego jest nieistotny statystycznie. Przy dalszym zwiększaniu jego koncentracji można dostrzec dynamiczną zmianę wartości penetracji oraz temperatury mięknienia ocenianego lepiszcza asfaltowego. Zastosowanie wosku syntetycznego w ilości od 2 do 2,5%(m/m) gwarantuje stosunkowo korzystne utwardzenie asfaltu oraz uzyskanie temperatury mięknienia wyższej od temperatury eksploatacyjnej wynoszącej około 60°C.

Na usztywnienie asfaltu (wzrost IP) mają wpływ powstałe kryształy wosków syntetycznych oraz zawartość asfaltenów, przy danym poziomie żywic, w modyfikowanym asfalcie [10]. Modyfikacja asfaltu 35/50 w ilości od 2,0%(m/m) do 3,5%(m/m) gwarantuje uzyskanie lepiszcza asfaltowego o wartości indeksu penetracji IP pomiędzy +1 i +2, co wskazuje na istnienie rezerwy elastyczności, w zakresach niskiej temperatury, przy małej wrażliwości termicznej. Braku negatywnego wpływu wosku syntetycznego w ilości 3%(m/m) w zakresach niskiej i średniej temperatury potwierdzone zostało również w innych badaniach [1]. Należy także zwrócić uwagę na pewne wyhamowanie procesu usztywnienia asfaltu wyrażone miarą indeksu penetracji przy zawartości 3,5 – 4,0%(m/m) wosku syntetycznego. Może mieć to związek z przesyceniem roztworu asfaltu woskiem syntetycznym i obniżeniem dynamiki wpływu.

Lepkość dynamiczna lepiszczy w funkcji temperatury

Lepkość dynamiczna jest jedną z podstawowych charakterystyk reologicznych pozwalających na ocenę zachowania się lepiszcza asfaltowego w zmiennych zakresach temperatury technologicznej wykonywania i eksploatacji nawierzchni. Wyraża ona tarcie wewnętrzne występujące w wyniku istnienia sił kohezji między składnikami grupowymi, przy przesuwaniu jednej warstewki asfaltu względem drugiej [2]. Do badań wykorzystano lepkościomierz obrotowy typu „Rheotest 2", z układem cylindrów współosiowych typu H2. Wszystkie lepkości asfaltów zostały pomierzone przy szybkości ścinania wynoszącej 1 s^{-1}. Pomiar lepkości był realizowany w zakresie temperaturowym od 50°C do 140°C, przy zmianie, co 5°C. Wyniki badań lepkości dynamicznej asfaltu modyfikowanego przedstawiono na rysunku 4.

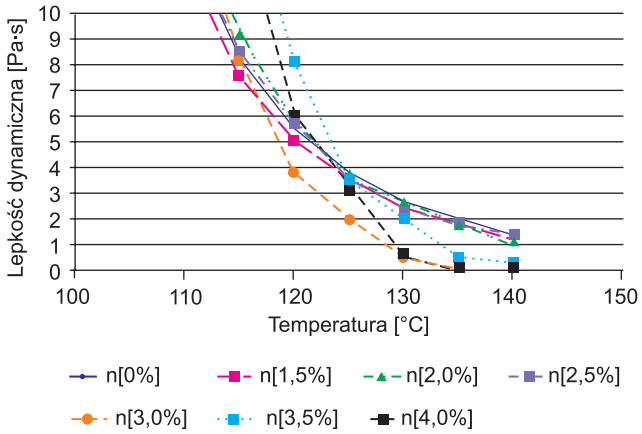


Rys. 4. Wpływ zawartości wosku syntetycznego na lepkość dynamiczną asfaltu 35/50 w zakresie temperatury od 50 do 100°C

Wyniki badań wskazują, że w miarę wzrostu zawartości wosku syntetycznego występuje duże zróżnicowanie w wynikach pomiaru lepkości dynamicznej w zakresach średniej i prawdopodobnie niskiej temperatury. Znaczące zróżnicowanie zakrzywienia wykresu lepkości dynamicznych można zauważyć już w przedziale temperatury pomiędzy 80°C a 90°C. Fakt ten jest związany z przemianą fazową wosków syntetycznych, które w miarę obniżania temperatury krystalizują, usztywniając strukturę lepiszcza referencyjnego. Taka sytuacja zapewne zwiększy odporność na powstawanie kolein w warstwach wierzchnich nawierzchni asfaltowej. W konsekwencji wzrostu temperatury lepkość asfaltu modyfikowanego gwałtownie maleje do poziomu lepkości asfaltu referencyjnego (35/50). Jednak w związku ze wzrostem temperatury można dostrzec drugi efekt obecności wosku syntetycznego.

Zauważalne jest upłynnienie lepiszcza w temperaturze od 115°C, które jest charakterystyczne dla temperatury topnienia kryształów węglowodorów alifatycznych rozpraszających fazę asfaltu.

Z uwagi na trudność w przedstawieniu w odpowiedniej skali całego spektrum zależności lepkości dynamicznej modyfikowanego asfaltu 35/50 od temperatury, na rysunku 5 przedstawiono uzyskane charakterystyki badawcze tylko w przedziale od 100°C do 140°C.

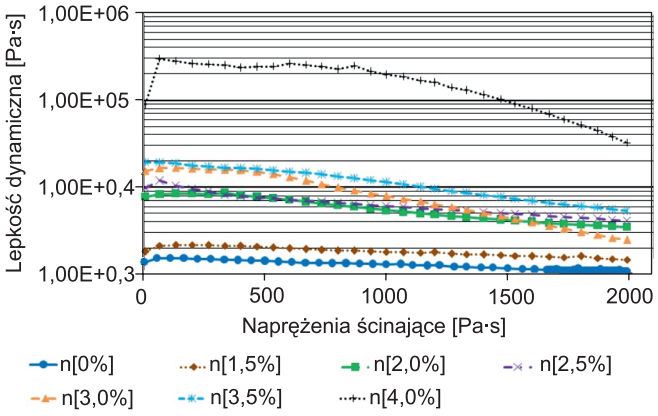


Rys. 5. Wpływ wosku syntetycznego na lepkość dynamiczną asfaltu 35/50 w zakresie temperatury od 100 do 140°C

Dynamika szybkiego spadku lepkości asfaltu wraz ze wzrostem temperatury rośnie w zależności od zawartości dodatku wosku syntetycznego do asfaltu. Widoczny efekt gwałtownej utraty lepkości modyfikowanego asfaltu 35/50, poprzez jego szybkie upłynnienie przy zawartości wosku syntetycznego od 3%(m/m), będzie miał niewątpliwie istotny wpływ na ilość energii niezbędnej do właściwego otoczenia kruszywa oraz zmniejszy energię potrzebną do pompowania zmodyfikowanego lepiszcza. Efekt upłynniania lepiszcza również zaobserwowano w pracy [5].

Lepkość dynamiczna lepiszcza w funkcji naprężeń ścinających

Asfalty w zakresach temperatury eksploatacyjnej powinny zachowywać się jak ciała nienewtonowskie reologicznie niestabilne [3]. Zatem w takich zakresach temperatury lepkość asfaltu będzie zależała m.in. od wielkości naprężeń ścinających. Fakt usztywnienia asfaltu przez wosk syntetyczny powinien mieć wyraz w ukształtowaniu wykresu i widoczną granicę początku niszczenia struktury modyfikowanego lepiszcza. Wyniki wpływu wosku na zmiany struktury asfaltu w temperaturze 60°C w skali półlogarytmicznej przedstawiono na rysunku 6. Należy zwrócić uwagę, że w temperaturze 60°C, bez względu na poziom naprężeń ścinających, poziom lepkości strukturalnej, jak również lepkości zerowego ścinania zwiększa się w miarę wzrostu zawartości wosku syntetycznego. Przy zawartości wosku w asfalcie około 1,5% masy lepiszcza wzrost lepkości strukturalnej jest niewielki, ale już przy zawartości ok. 2,0 %(m/m) wzrost ten następuje bardzo szybko. Przy zawartości wosku syntetycznego większej niż 3,0%(m/m), zauważalnie zakres naprężeń ścinających, w których lepkość od początku wykresu jest w przybliżeniu stała, jest coraz większy. W tej sytuacji należy się spodziewać zwiększenia odporności na powstawanie kolein nawierzchni asfaltowej oraz dużej ilości energii potrzebnej do zniszczenia struktury asfaltu. Dodatkowym elementem, który można dostrzec w wyniku analizy zależności przedstawionych na rysunku 6 jest fakt, iż przy końcowych wartościach naprężeń ścinających, poziom lepkości lepiszcza z modyfikatorem utrzymuje nadal poziom lepkości wyższy od lepkości asfaltu referencyjnego, co prawdopodobnie ograniczy szybkość wzrostu koleiny w procesie cyklicznego obciążenia.

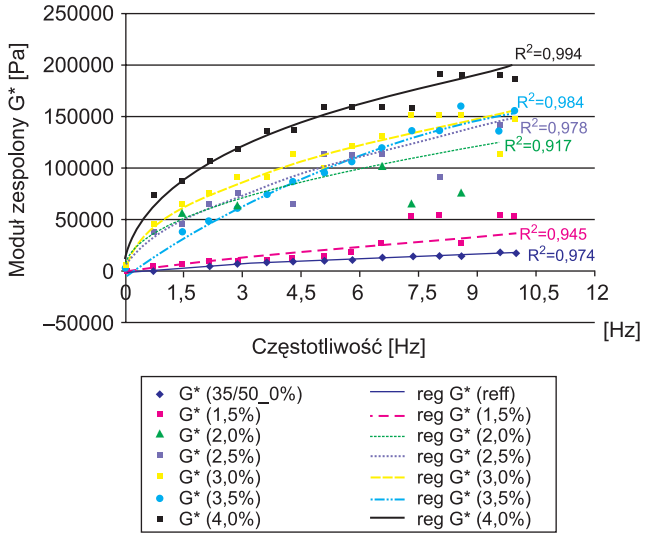


Rys. 6. Wpływ wosku syntetycznego na zmiany lepkości dynamicznej asfaltu 35/50 w funkcji naprężeń ścinających w temperaturze 60°C

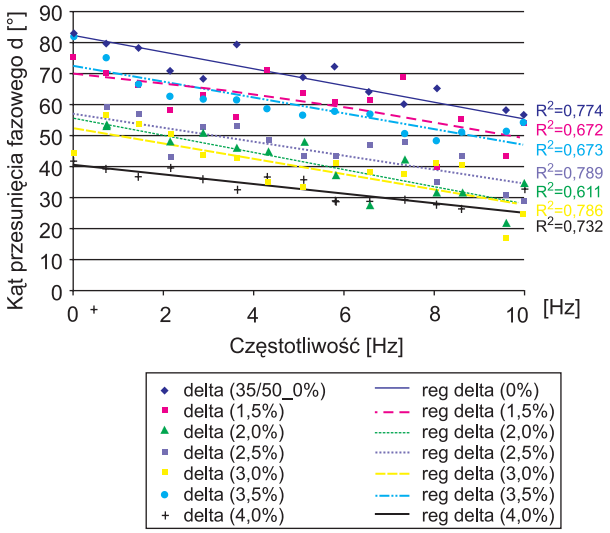
Moduł zespolony oraz kąt przesunięcia fazowego lepiszcza modyfikowanego

Moduł zespolony G^* oraz kąt przesunięcia fazowego δ charakteryzują lepkie i sprężyste zachowanie materiału [8]. Parametr G^* charakteryzuje całkowitą odporność materiału na deformacje na wskutek powtarzalnego ścinania. Składa się z części sprężystej oraz lepkiej, przy czym miarą ich wzajemnego stosunku jest kąt przesunięcia fazowego δ. Wpływ zawartości wosku syntetycznego na wartości modułu zespolonego modyfikowanego asfaltu 35/50, badany w temperaturze 60°C, przedstawiono na rysunku 7.

Wyniki badań wskazują, że w miarę wzrostu częstotliwości obciążenia następuje wzrost modułu zespolonego asfaltu modyfikowanego (rys. 7). Jednak bez względu na temperaturę, wosk syntetyczny zwiększa poziom modułu zespolonego modyfikowanego asfaltu, przy każdym wariancie zawartości modyfikatora. Wszystkie modyfikowane lepiszcza wraz z asfaltem referencyjnym mają wartość (część sprężysta) $G^*/\sin(\delta) > 1000$ Pa przy częstotliwości 1,56 Hz, odpowiadającej standardowym warunkom obciążenia nawierzchni ruchem pojazdów o prędkości 60 km/h wg SHRP. W porównaniu do asfaltu referencyjnego poziom modułu przy modyfikacji 3,0%(m/m) charakteryzuje się siedmiokrotnym wzrostem. W tej sytuacji należy się spodziewać znacznego wzrostu odporności na koleinowanie, w standardowych warunkach ruchu oraz dużej odporności w warunkach niskich prędkości wyrażonej przez czas obciążenia 0,5 Hz (38 km/h), gdzie przy modyfikacji 1,5%(m/m) moduł rzeczywisty jest nadal



Rys. 7. Zależność modułu zespolonego G modyfikowanego asfaltu 35/50 od zawartości wosku syntetycznego w temperaturze 60°C*



Rys. 8. Zależność kąta przesunięcia fazowego asfaltu 35/50, w temperaturze 60°C, od zawartości wosku syntetycznego

większy od 1000 Pa. Taki poziom sztywności asfaltu gwarantuje niską podatność lepiszcza na odkształcenia trwałe, zgodnie z założeniami *SHRP* [8].

Zależność kąta przesunięcia fazowego, w temperaturze 60°C, od zawartości wosku syntetycznego, przedstawiono na rysunku 8.

Analiza wyników badań przedstawionych na rysunku 8 w odniesieniu do kąta przesunięcia fazowego δ asfaltu ujawnia, w miarę wzrostu zawartości wosku syntetycznego, tendencję lepiszcza do zmiany charakteru lepko-sprężystego na sprężysty w temperaturze 60°C. Przy zawartości $\geq$ od 2,5%(m/m) wosku syntetycznego można zauważyć duże obniżenie wartości kąta przesunięcia fazowego modyfikowanego asfaltu 35/50. W związku z tym, w miarę wzrostu częstotliwości obciążenia, pełzanie betonu asfaltowego będzie niższe. Należy zaznaczyć, że w odniesieniu do przedziału częstotliwości od 0,05 do 1,5 Hz poziom kąta przesunięcia fazowego, w każdym wariancie modyfikacji, średnio zmniejszał się o 10%, co wskazuje na coraz bardziej sprężysty charakter pracy tego rodzaju lepiszcza w betonie asfaltowym.

Podsumowanie

Dokonując analizy wyników badań asfaltu 35/50 z woskiem syntetycznym można sformułować następujące wnioski:

1. Asfalt 35/50 modyfikowany woskiem syntetycznym (produkowanych metodą Fischera – Tropscha) w ilości ponad 1,0%(m/m) charakteryzuje się wyższą temperaturą mięknienia, mniejszą penetracją oraz większym indeksem penetracji w stosunku do asfaltu referencyjnego. Natomiast zwiększenie zawartości wosku syntetycznego ponad 3,0%(m/m) w asfalcie 35/50 powoduje niekorzystny wzrost temperatury łamliwości modyfikowanego lepiszcza,

2. Wraz ze wzrostem zawartości wosku syntetycznego w modyfikowanym asfalcie, wrasta poziom lepkości strukturalnej oraz odpowiadająca jej wielkość naprężeń ścinających w temperaturze 60°C, zwiększając odporność betonu asfaltowego na powstawanie kolein,

3. Wzrost zawartości wosku syntetycznego wpływa istotnie statystycznie na upłynnienie modyfikowanego asfaltu 35/50, w temperaturze powyżej 115°C, w stosunku do asfaltu bez tego modyfikatora,

4. Wosk syntetyczny dozowany w ilości 2,0%(m/m) w stosunku do asfaltu 35/50 powoduje poprawę jego charakterystyk sprężystych wyrażonych modułem zespolonym *G** oraz kątem przesunięcia fazowego δ,

5. Wosk syntetyczny w każdym wariancie dozowania do asfaltu 35/50 poprawia odporność na deformacje trwałe nawierzchni asfaltowej przy ruchu pojazdów o małych prędkościach.

Bibliografia

[1] Edwards Y., Tasdemir Y., Isacsson U. 2006. *Effect of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperature*, Cold Regions Science and Technology 45, p. 31-41

[2] Gaweł, I.; Kalabińska, M.; Piłat, J.: *Asfalt drogowy,* WKŁ, Warszawa, 2001, s. 255

[3] Grabowski W., Słowik M.: *Research of rheological properties of polymer modified binders*, Foundation s of Civil and Environmental Engineering No. 3, Politechnika Poznańska, 2002

[4] Grubbs F. E., February 1969. *Procedures for detecting outlying observation in samples*, Technometrics, Vol.1/11, p. 1-21

[5] Hurley G, Prowell B.: *Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt*. NCAT report 05-06, Auburn, 2005

[6] Iwański, M.; Mazurek, G.: Asphalt Concrete with Low-Viscosity Modifier, In *Proc. of the 2nd International Conference on Transport Infrastructures*, Sao Paulo, Brazil, 4-6 August 2010, p. 167-176

[7] Judycki J, Jaskuła P.: Korelacja pomiędzy cechami eksploatacyjnymi betonu asfaltowego a cechami asfaltu. *I Międzynarodowa Konferencja Naukowa-Techniczna* „Nowoczesne Technologie w Budownictwie Drogowym'', Poznań, 2001, s. 366-377

[8] Sybilski D. *Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce.* IBDiM 50, 2000, s. 168

[9] Vaitkus, A.; Cygas, D.; Laurinavicius, A.; Perveneckas, Z.: *Analysis and Evaluation of Possibilities for the Use of Warm Mix Asphalt in Lithuania*, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4(2), 2009, p. 80–86

[10] Xiaohu Lu, M. Langton, P.: *Wax morphology in bitumen*. Olofsson Journal of Materials Science 40, 2005, p. 1893-1900 ■