

- [8] M. Iwański, P. Buczyński, *Wpływ pyłów mineralnych na moduł sztywności podbudowy z asfaltem spienionym*, Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynierii Środowiska zeszyt 59 (nr 3/2012/IV), 2012, s. 221-228
- [9] W. Klonecki, *Statystyka dla inżynierów*, PWN, Warszawa, Wrocław, 1999, s. 283
- [10] G. Martinez-Arguelles, F. Giustozzi, M. Crispiono, W. Flintsch G., *Investigating physical and reological properties of foamed bitumen*, Construction and Building Materials 72 (2014), s. 423-433
- [11] A. Modarres, P. Ayar, *Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement*, International Journal of Pavement Engineering, 2014
- [12] D.G. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition, John Wiley and Sons, 2001, s. 607
- [13] A.M. Neville, *Właściwości betonu*, V edycja, Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków 2012
- [14] Simon J. Blott, Debra J. Croft, Kenneth Pye, Samantha E. Saye, Helen E. Wilson, *Particle size analysis by laser diffraction*, The Geological Society of London 2004
- [15] A. Sreekrishnavilasam, S. Rahardja, R. Kmetz, M. Santagata, *Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust*, Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, s. 318-327
- [16] StatSoft Polska, *Zastosowania statystyki i data mining w badaniach naukowych* – materiały z seminarium XI.2013
- [17] Wirtgen GmbH, 2012. *Wirtgen cold recycling technology*. 1st ed. Windhagen: Wirtgen GmbH
- [18] J. Zawadzki, J. Matras, T. Mechowski, D. Sybilski, *Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)*, Zeszyt 61, IBDiM, Warszawa 1999



GRZEGORZ MAZUREK

Politechnika
Świętokrzyska
gmazurek@tu.kielce.pl

Ocena reologicznych zmian w strukturze asfaltu spowodowanych dodatkiem wosku syntetycznego F-T

Jednym z najbardziej istotnych wyzwań, jakie musi rozwiązać dzisiejsze społeczeństwo, jest efektywność i ekonomiczność w zarządzaniu energią pochodzącą z paliw ze źródeł nieodnawialnych. Jednym z rozwiązań długofalowych może być stosowanie mniej energochłonnych technologii produkcji i wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA (ang. *Warm Mix Asphalt*) [1, 19]. Tego typu technologie wymagają dodatkowych zabiegów lub modyfikatorów, które umożliwiają obniżenie lepkości asfaltu przy zadanej temperaturze technologicznej. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie wosku syntetycznego Fischera-Tropscha (F-T) [20]. Wosk F-T to dodatek organiczny stosowany w celu poprawy urabialności oraz obniżenia temperatury produkcji i zagęszczenia mieszanek mineralno-asfaltowych. Po wystygnięciu nawierzchni, na skutek procesu krystalizacji związków wosku, następuje wzrost sztywności asfaltu oraz wzrost odporności na deformacje plastyczne całego kompozytu mineralno-asfaltowego. W literaturze technicznej jest mało informacji na temat mechanizmów wywołujących wzrost sztywności asfaltu modyfikowanego woskiem syntetycznym, skali oddziaływań krystalizacji wosku oraz związanych z tym konsekwencjami zmian w strukturze samego asfaltu. W związku z tym w artykule zamieszczono wnioski z badań wynikające z obecności wosków syntetycznych w asfaltach o różnym stanie reologicznym.

Podstawowe parametry asfaltów

Do badań użyto dwóch rodzajów asfaltów o różnej penetracji, tzn. asfalt 35/50 oraz 160/220. Asfalt 160/220 nie jest

stosowany jako lepiszcze do warstw konstrukcyjnych. W przyjętym zakresie badań jego obecność miała na celu pokazanie trendu, jaki można zaobserwować w efekcie modyfikacji asfaltów miękkich woskiem syntetycznym. Ponadto zastosowanie zaproponowanego zestawu asfaltów miało służyć określeniu, czy stan reologiczny asfaltu wyjściowego wpływa na szybkość zmian w strukturze asfaltu po dodaniu wosku syntetycznego. Do badań wykorzystano wosk syntetyczny wytworzony w procesie syntezy Fischera-Tropscha (F-T), o średniej liczbie atomów w cząsteczce – oscylującej wokół 100. Stężenie wosku syntetycznego w przypadku asfaltów 35/50 i 160/220 wynosiło: 0% (referencyjny), 3% oraz 6% w stosunku do masy asfaltu. Próbkę asfaltu przygotowaną według [1] pozostawiono na okres 24 h między innymi w tym celu, aby wytworzyła się stała faza w formie krystalitów wosku syntetycznego F-T. Rezultaty wyników badań przedstawiono w tabeli 1.

Wyniki wykonanego zakresu badań wskazują, że podstawowe normowe parametry reologiczne obydwu użytych asfaltów zmieniają się w odmienny sposób po dodaniu do nich takiej samej ilości wosku syntetycznego F-T. Poddane badaniu asfalty stan żelu, czyli indeks penetracji $IP > 2$ [18], został osiągnięty przy dodatku wosku syntetycznego wynoszącym 3%. Wzrost wartości indeksu penetracji nastąpił bardzo szybko w przypadku asfaltu 160/220, co może dawać powody do obaw. Tak dynamiczny wzrost może powodować dwojaki skutek, tzn. może wskazywać na podwyższony poziom granicy plastyczności, po przekroczeniu której znacznie spadnie, szybciej niż w asfalcie 35/50, lepkość dynamiczna do bardzo niskiej wartości. Drugim skutkiem, który może wywołać poziom przyrostu indeksu penetracji, jest obniżenie ciągliwości asfaltu, szczególnie w niskiej temperaturze. Badania podstawowe (tabela 1) nie są do końca w stanie rozstrzy-

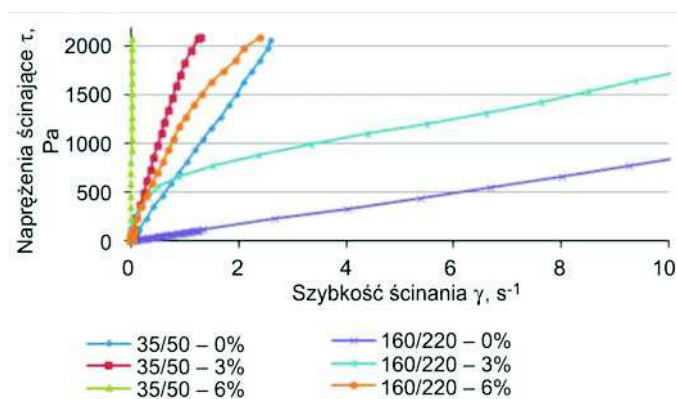
Tabela 1. Podstawowe parametry asfaltów 35/50 oraz 160/220

Parametr	Asfalt 35/50			Asfalt 160/220		
	0% F-T	3% F-T	6% F-T	0% F-T	3% F-T	6% F-T
Penetracja – Pen [0,1mm] PN-EN 1426	37	25	18	167	88	69
Temperatura mięknięcia – T_{PIK} [°C]; PN-EN 1427	55	84	95	39	72	91
Temperatura tamiwości wg Fraassa – $T_{FRAASSA}$ [°C]; PN-EN 12593	-13	-7	-6	-16	-11	-10
Indeks penetracji – IP [-]	-0,7	3,2	3,8	-1,3	4,9	6,6
Zmiana indeksu penetracji	-	+3,9	+4,5	-	+6,2	+7,9

gnąć tego typu wrażliwości, dlatego do dalszej analizy zastosowano bardziej zaawansowane badania reologiczne.

Wpływ ilości wosku syntetycznego F-T na przebieg krzywych płynięcia asfaltów

Pomiar zmian lepkości w funkcji naprężeń ścinających przy obciążeniu statycznym może dostarczyć wielu istotnych informacji na temat struktury lepiscza oraz jej podatności na ścinanie. Efekt szybkiego wzrostu odkształceń ma bezpośrednio przełożenie na odporność na koleinowanie betonu asfaltowego [3]. Na dowód przytoczonych argumentów zostały podane wykresy typowych krzywych asfaltów 35/50 oraz 160/220, oznaczone w temperaturze 60°C przy zastosowaniu układu cylindrów współosiowych (typ H2) określonym w PN-EN 13702-2. Wyniki przedstawiono na rysunku nr 1.



Rys. 1. Krzywe płynięcia asfaltów 35/50 oraz 160/220 w temperaturze 60°C

Uzyskane wyniki wskazują, że bardzo niewielkie naprężenia wywołują płynięcie asfaltu 160/220, spowodowane drastyczną destrukcją struktury asfaltu, przejawiającą się osiągnięciem przez asfalt lepkości granicznej w drugim zakresie płynięcia Newtonowskiego [2,3,18]. Wzrost lepkości dynamicznej w przypadku obydwu rodzajów asfaltów, przy małych prędkościach ścinania, można przypisać obecności kryształitów wosku w asfalcie. Sukcesywny wzrost zawartości wosku syntetycznego F-T w asfalcie powoduje wzrost nachylenia krzywych płynięcia (rys. 1). Budowa koloidalna danego lepiscza asfaltowego ma tutaj kluczowe znaczenie, ponie-

waż asfalt 160/220 ma strukturę koloidalną zolu, natomiast asfalt 35/50 żel-zolu. Asfalt zawierający duże skupiska micel asfaltenowych i grup polarnych (np. 35/50) w większym stopniu będzie wykazywał większą interakcję z krystalicznymi formami wosku syntetycznego w porównaniu do asfaltu o większej zawartości frakcji olejowych (np. 160/220) [4]. Wypadkową konsekwencją jest wyższy poziom lepkości w zakresie naprężeń odpowiadających lepkości struktury naruszonej. Wynika z tego, że wosk syntetyczny może poprawić odporność na deformacje plastyczne nawierzchni wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej z użyciem asfaltu 35/50 a także z asfaltem 160/220, poddanej długotrwałemu obciążeniu od ruchu pojazdów. Krzywe płynięcia asfaltów zostały ustalone w przypadku zakresu naprężeń ścinających od 0 do 2300 Pa (rys. 2–4).

Analizując rezultaty badań przedstawione na wykresach 2-4 należy zwrócić uwagę, że zwiększający się dodatek wosku syntetycznego potęguje wzrost poziomu granicznej wartości naprężeń ścinających po przekroczeniu których następuje uplastycznienie badanego asfaltu. Do określenia jej przybliżonego poziomu wykorzystano model Bingham'a [2]. Model ten zakłada, że po przekroczeniu granicy plastyczności następuje ustalone płynięcie asfaltu. Jest to narzędzie pomocnicze, mające na celu identyfikację granicy plastyczności badanych asfaltów. W tym celu wykorzystano model segmentowej regresji linowej w postaci:

$$\tau = \begin{cases} b_0 + a_0 \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} \leq c \\ b_1 + a_1 \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} > c \end{cases} \quad (1)$$

w którym:

τ – naprężenia styczne [Pa],

$\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [s⁻¹],

a_0, a_1, b_0, b_1 – parametry eksperymentalne (opis w tekście),

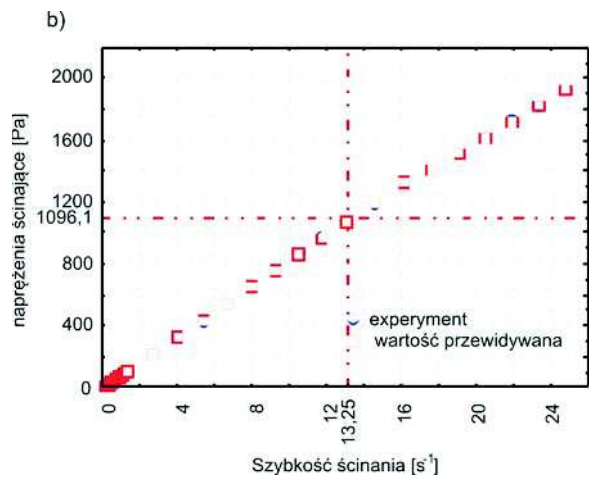
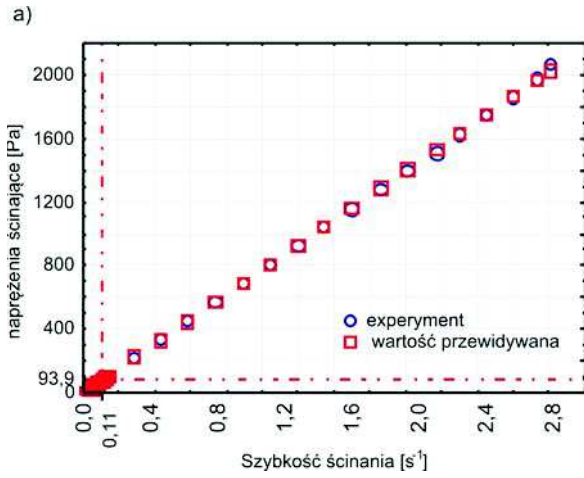
c – estymowany parametr punktu przelamania.

Charakterystyczny punkt załamania regresji określono estymując parametr 'c' (przecięcie linii referencyjnych na wykresach) metodą najmniejszych kwadratów (1) i maksymalizacji współczynnika determinacji w przypadku obu prostych, który w całej analizie był większy niż 0,96. Ekstrapolacja wartości parametru b_1 (przecięcie z osią OY – naprężenia ścinające) określa przybliżoną poszukiwaną wartość granicy plastyczności według modelu Bingham'a. Natomiast parametry a_0 oraz a_1 określają lepkość dynamiczną przed i po naruszeniu struktury kompozytu asfaltowego. Rezultaty estymacji parametrów regresji oraz jej schemat przedstawiono w tabeli 2.

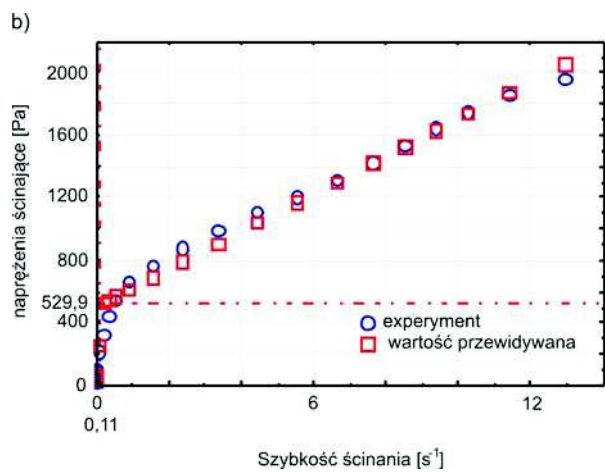
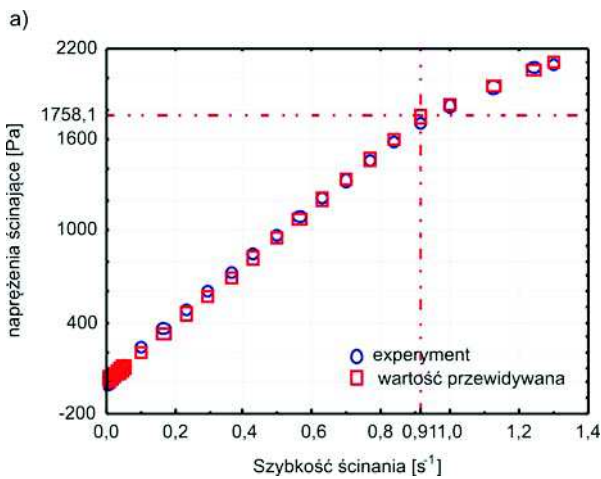
Zestawiając wyniki estymacji regresji segmentowej zaprezentowane w formie tabelarycznej (tabela 2) oraz graficznej (rysunki 2-4) można stwierdzić, że obecność wosku syntetycznego F-T znacznie zmienia przebieg krzywych płynięcia stwierdzonych w poddanych analizie asfaltach. W przypadku asfaltów 35/50 oraz 160/220 (referencyjnych) różnica pomiędzy nachyleniem prostych wyrażona parametrami a_0 i a_1 jest bardzo niewielka. W związku z tym, przy pewnym stop-

niu uogólnienia, możliwe jest opisanie ich przebiegu płynięcia parametrami jednej prostej. Może to sugerować, że oba asfalty osiągną stan ustalonego płynięcia w temperaturze

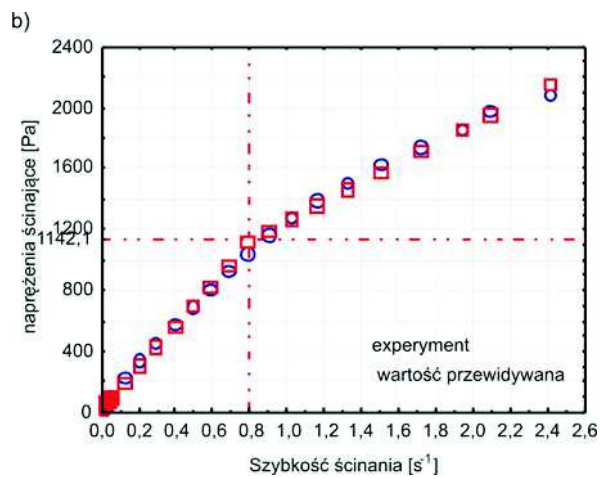
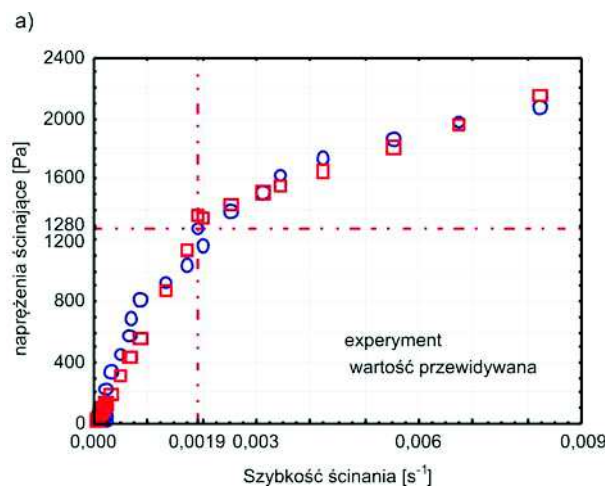
60°C bez wyraźnego progu naprężeń ścinających rozpoczynających etap uplastycznienia asfaltu. Potwierdza to niewielka wartość parametru b_1 .



Rys. 2. Krzywe płynięcia asfaltu 35/50 (a) oraz 160/220 (b) (referencyjne) bez dodatku wosku syntetycznego F-T; w temperaturze 60°C



Rys. 3. Krzywe płynięcia asfaltu 35/50 (a) oraz 160/220 (b) z dodatkiem 3% wosku syntetycznego F-T w temperaturze 60°C

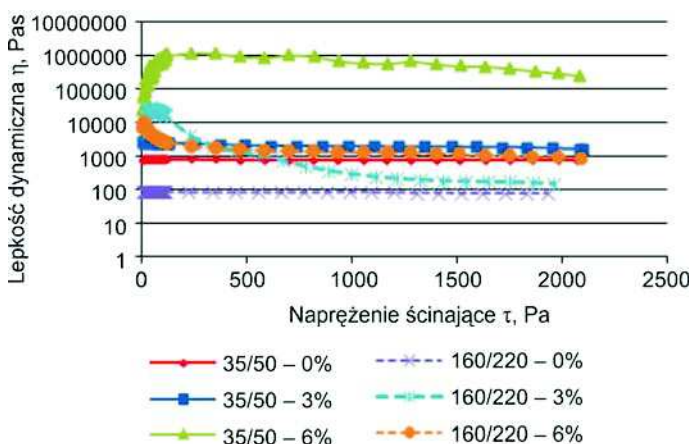


Rys. 4. Krzywe płynięcia asfaltu 35/50 (a) oraz 160/220 (b) z dodatkiem 6% wosku syntetycznego F-T w temperaturze 60°C

Tabela 2. Parametry estymacji regresji segmentowej

Rodzaj mieszaniny (rodzaj asfaltu – ilość wosku F-T)	Funkcja segmentowa w modelu Bingham			
	Współczynniki regresji			
	b_0	a_0 (przybliżona lepkość struktury nienaruszonej)	b_1 (przybliżona granica plastyczności)	a_1 (przybliżona lepkość struktury naruszonej)
35/50 – 0%	1,751870	858,2188	10,73270	774,5941
35/50 – 3%	19,06981	1906,832	909,8224	930,1852
35/50 – 6%	-1,80174	675049,3	1133,727	125075,5
160/220 – 0%	1,080646	82,63468	132,7775	72,69629
160/220 – 3%	44,79695	4202,247	515,8909	119,4637
160/220 – 6%	36,17051	1373,262	626,1273	639,4488

Badane rodzaje asfaltów 35/50 oraz 160/220 z dodatkiem wosku syntetycznego w ilości 3% ujawniły różnicę w odczytach parametrów a_0 i a_1 . Jednak istotnym faktem jest to, że zwiększa się dystans pomiędzy wartościami a_0 i a_1 . To zjawisko sygnalizuje postępujący efekt naruszenia struktury asfaltu modyfikowanego woskiem syntetycznym pod wpływem naprężeń ścinających. W asfalcie 35/50 współczynnik nachylenia prostej a_0 ma nieco mniejszą wartość niż jego odpowiednik w asfalcie 160/220. Obecna zależność sugeruje nieco wyższy poziom lepkości asfaltu 160/220 modyfi-



Rys. 5. Wykres lepkości dynamicznej w funkcji naprężeń ścinających w temperaturze 60°C

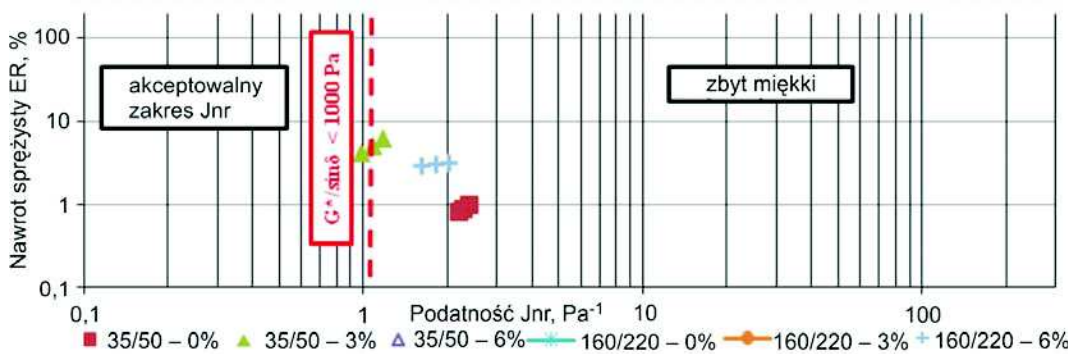
kowanego woskiem F-T w przypadku lepkości struktury nienaruszonej. Jednak po przekroczeniu wartości granicznej naprężenia (opisanej parametrem b_1) następuje znaczny spadek wartości parametru a_1 w asfalcie 160/220, podczas gdy przy zastosowaniu asfaltu 35/50 zmniejszenie lepkości dynamicznej, opisanej parametrem a_2 jest dużo mniej istotne. Efekt nagłej utraty integralności struktury przez wariant zastosowania 3% wosku syntetycznego F-T do asfaltu 160/220 może doprowadzić do szybkiego wzrostu deformacji w trakcie koleinowania mma, o czym świadczy poziom parametru a_1 . Z tego powodu zastosowanie wosku syntetycznego wydaje się być bardziej uzasadnione do asfaltów z większą ilością frakcji polarnych, czyli w tym przypadku asfaltu 35/50.

Kolejnym etapem badań było zwiększenie dodatku wosku syntetycznego do 6%. W tym stanie duża ilość krystalitów wosku syntetycznego spowodowała, że w przypadku obu badanych asfaltów wyraźnie została zaznaczona granica plastyczności, czyli wartość naprężeń ścinających, poniżej których asfalt ma charakterystykę zbliżoną do ciała stałego. W przypadku asfaltu 35/50 granica plastyczności jest około 3-krotnie większa niż w asfalcie 160/220. Wysoki dodatek wosku syntetycznego również w asfalcie 35/50 spotęgował duże zróżnicowanie w odczytach pomiędzy lepkością w stanie nienaruszonym i naruszonym. Różnica lepkości wyrażona jako iloraz a_0/a_1 w przypadku obu asfaltów jest podobna, natomiast lepkość dynamiczna po naruszeniu struktury w asfalcie 35/50-6% jest 200 razy wyższa niż w przypadku asfaltu 160/220-6%. Tym samym tak zmodyfikowany asfalt 35/50 będzie miał wpływ na poprawę odporności na koleinowanie. Porównanie asfaltu 35/50-0% (referencyjny) i asfaltu 160/220 modyfikowanego 6% woskiem syntetycznym wskazuje na zbliżone poziomy współczynników lepkości dynamicznej a_1 . Jednak stosunek współczynników a_0/a_1 w przypadku asfaltu 35/50 + 0% wynosi około 2, natomiast w przypadku asfaltu 160/220 + 6% wynosi około 4. Z tego powodu z ostrożnością należy podchodzić do stosowania wosku syntetycznego jako sposobu modyfikacji sztywności asfaltów miękkich. Dotyczy to modyfikacji woskiem syntetycznym asfaltów typu zol, co teoretycznie wyraża asfalt 160/220 + 6%. Na rysunku 5 przedstawiono krzywe zmiany lepkości dynamicznej w funkcji naprężeń ścinających.

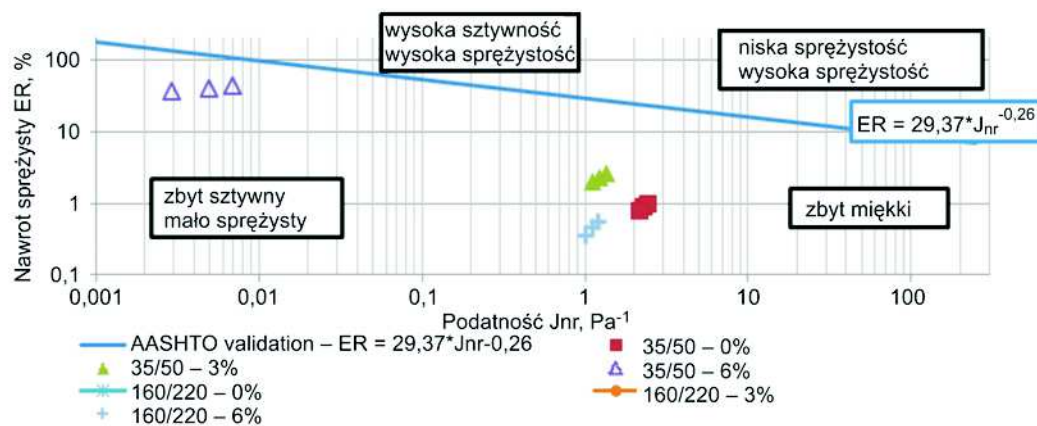
Efekt nagłego spadku lepkości dynamicznej w asfaltach miękkich potwierdzają wnioski innych badaczy [5,6]. Brak frakcji polarnych w asfalcie 160/220, pełniących rolę stabilizatorów krystalitów wosku syntetycznego, doprowadza do dużej agregacji krystalitów wosku syntetycznego i tym samym może wzrosnąć niestabilność struktury mieszaniny wosku i asfaltu [13].

Badania dynamiczne asfaltów z dodatkiem wosku syntetycznego

Tradycyjne badania oscylacyjne DSR wg metody SHRP [7] przy częstotliwości 1,59 Hz mają pewną wadę, szczególnie przy ocenie asfaltów modyfikowanych [15, 16, 17, 21]. Badanie jest wykonane w zakresie liniowej lepkości sprężystości (LVE), jednak wg [8] tworzenie się kolein w nawierzchni jest



Rys. 6. Ocena parametrów wg metodyki MSCR w przypadku naprężenia 100 Pa (LVE) w temperaturze 60°C



Rys. 7. Ocena parametrów wg metodyki MSCR w przypadku naprężenia 3200 Pa w temperaturze 60°C

związane z pracą nawierzchni z danym asfaltem w zakresie nieliniowej lepkośćsprężystości. Z tego powodu dokonano weryfikacji podatności badanych lepiszczy z dodatkiem wosku syntetycznego w aspekcie nowoczesnej i odpowiednio opisanej metodyki MSCR [10,11,21] (*ang. Multi-StressCreepRecovery test*), zgodnie z AASHTO TP70-09 [9]. Za pomocą testu pełzania przy obciążeniu cyklicznym można określić wielkość podatności nieodwracalnej J_{nr} , czyli tej samej, która odnosi się do parametru WTS_{AIR} przy badaniu koleinowania nawierzchni asfaltowej. Ponadto metodyka ta w jednym badaniu określa poziom nawrotu sprężystego ER , tym samym kohezję struktury badanego lepiszcza. Badania metodą MSCR wykonano w przypadku dwóch zakresów naprężeń, mianowicie 100 Pa oraz 3200 Pa. Pierwszy zakres reprezentuje zachowanie asfaltu w zakresie zbliżonej do liniowej lepkośćsprężystości. Poziom naprężenia ścinającego 3200 Pa odzwierciedla warunki silnego obciążenia nawierzchni ruchem pojazdów.

Biorąc pod uwagę fakt, że istnieje duża zgodność pomiędzy $1/J$ (podatność pełzania) i $G^*/\sin\delta$, szczególnie w przypadku asfaltów niemodyfikowanych (o niewielkim nawrocie sprężystym), przy pomocy testu MSCR można ocenić minimalną sztywność asfaltu zwykłego, jaka wynika z badań oscylacyjnych DSR. W związku z tym wartość podatności J_{nr} przy 100 Pa mniejsza niż 1 kPa^{-1} spełnia, z pewnym przybliżeniem, wymagania metodyki SHRP [11]. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunku 6.

Pionowa linia przerywana na wykresie symbolizuje przybliżoną wartość podatności (w przypadku podobnego czasu obciążenia), odpowiadającą parametrowi koleinowania wg

SHRP będącym ilorazem $G^*/\sin\delta = 1000 \text{ Pa}$. Należy zwrócić uwagę, że asfalt 35/50 z dodatkiem 3% wosku syntetycznego uzyskał wartość podatności około 1 kPa^{-1} . Przy czym jego poziom nawrotu sprężystego jest o około 8% większy od asfaltu referencyjnego 35/50. W przypadku asfaltu 160/220 z dodatkiem 6% wosku syntetycznego jego parametry uległy zmianie na korzyść wzrostu sztywności i nawrotu sprężystego do poziomu asfaltu 35/50 (referencyjnego). Asfalt 35/50 - 6%, w tym badaniu, wykazuje właściwości ciała stałego. Natomiast pozostałe kombinacje asfaltu 160/220 z dodatkiem wosku syntetycznego mniejszego lub równego 3% nie uzyskały satysfakcjonującej sztywności, natomiast poziom nawrotu sprężystego wskazuje na utratę kohezji.

Kolejnym etapem była ocena zachowania badanych asfaltów 35/50 i 160/220 w zakresie nieliniowej lepkośćsprężystości, w zakresie której asfalt i wykonana nawierzchnia z jego udziałem wykazuje duże odkształcenia (koleiny). W związku z tym zostało zastosowane naprężenie ścinające równe 3200 Pa (rys. 7).

Krzywa $ER = f(J_{nr})$ reprezentuje jakość modyfikacji asfaltu polimerem w aspekcie jego wykorzystania. Należy zwrócić uwagę, że asfalty z grupy penetracji 35/50 bez względu na ilość wosku syntetycznego wykazują dużą stabilność w zakresie zmian podatności względem naprężeń ścinających. Ten fakt sugeruje, że mieszanka wykonana z ich udziałem będzie bardziej odporna na koleinowanie. Natomiast dla zakresu naprężeń ($\tau = 3200 \text{ Pa}$) podatność asfaltu 160/220-6% wzrosła do poziomu w którym asfalt zachowuje się jak ciecz Newtonowska w zakresie dużych naprężeń (zniszczenie struktury). Taki rodzaj mieszaniny uwidocznili postępująca

utrąte kohezji w porównaniu do wyników z zastosowaniem naprężenia 100 Pa. Również w przypadku asfaltu 35/50–6% efekt naruszenia struktury jest zauważalny, jednak nadal asfalt ten wykazuje właściwości podobne do ciała sprężysto-krucho. Zestawiając wyniki MSCR w przypadku dwóch zakresów naprężeń należy zwrócić uwagę, że struktura mieszaniny asfaltu 160/220 z dużą ilością wosku syntetycznego pomimo początkowej małej podatności szybko ulega destrukcji. W konsekwencji nastąpi szybki przyrost deformacji plastycznych. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że w asfalcie miękkim następuje silna agregacja krystalitów wosku syntetycznego, co w rezultacie doprowadza do nieciągłości mieszaniny asfaltu z woskiem syntetycznym. W efekcie końcowym może to doprowadzić do szybkiego przejścia asfaltu 160/220 z zachowania liniowo lepkosprężystego do nieliniowo lepkosprężystego, o czym wspomnieli autor [14].

Podsumowanie

Na podstawie wykonanych badań sformułowano następujące wnioski:

- badania podstawowych cech reologicznych asfaltu wskazują na znaczny przyrost indeksu penetracji w przypadku asfaltu miękkiego 160/220 w porównaniu do asfaltu 35/50,
- krzywe płynięcia ujawniły ograniczenie uplastycznienia we wszystkich rodzajach badanych asfaltów przy wzroście dodatku wosku syntetycznego,
- asfalt 160/220 wraz ze wzrostem dodatku wosku syntetycznego, pomimo silnego wzrostu lepkości struktury nienaruszonej, bardzo szybko przeszedł w stan cieczy newtonowskiej; ponadto okazał się bardzo podatny na wzrost naprężeń ścinających,
- mieszanina asfaltu 35/50 z dodatkiem wosku syntetycznego okazała się mniej podatna na zmianę naprężeń ścinających,
- brak frakcji polarnych ma wpływ na poziom agregacji krystalitów wosku. W związku tym należy być ostrożnym przy wyborze do modyfikacji woskiem syntetycznym asfaltów miękkich,
- wyniki badań wskazują, że do modyfikacji asfaltu dodatkiem wosku syntetycznego bardziej odpowiednie są asfalty o stanie reologicznym żel-zol, obecne w nich komponenty asfaltenów i żywic pełnią rolę stabilizatorów skupisk krystalitów wosku syntetycznego F-T,
- badania MSCR potwierdziły korzystny wpływ wosku syntetycznego na ograniczenie podatności asfaltu 35/50. Natomiast asfalt 160/220 z największą ilością dodatku wosku syntetycznego, pomimo początkowej niskiej podatności, może szybko utracić kohezję i istotnie zmniejszyć sztywność do krytycznie niskiej wartości. Może mieć to negatywny wpływ na trwałość nawierzchni wykonanej z asfaltów typu zol modyfikowanych woskiem syntetycznym,
- asfalt 35/50 z dodatkiem 6% wosku syntetycznego uzyskał właściwości podobne do ciała sprężysto-krucho. Z jednej strony będzie korzystnie oddziaływał na zapobieganie deformacjom trwałym, natomiast mieszanka mineralno-asfaltowa wykonana z jego udziałem może okazać się mało odporna na działanie niskiej temperatury.

Bibliografia

- [1] Hugo M.R.D. Silva, Joel R.M. Oliveira, Joana Peralta, Salah E. Zoorob, Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents, Construction and Building Materials 24 (2010), s. 1621–1631
- [2] G. Schramm, *Practical Approach to Rheology and Rheometry*, HAAKE GmbH, Karlsruhe 1994
- [3] B. Stefańczyk, P. Mieczkowski, *Mieszanki mineralno-asfaltowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2008, s. 320
- [4] P. Michalica, I.B. Kazatchkov, J. Stastna, L. Zanzotto, Relationship between chemical and rheological properties of two asphalts of different origins, Fuel 7, s. 3247-3253, 2008
- [5] Y. Edwards, Y. Tasdemir, U. Isacsson, Rheological effect of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 - low temperature performance, Fuel 85, s. 989-997
- [6] S. Sharmin, A. Bhasin, Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder, Construction and Building Materials, Volume 72, 15 December 2014, s. 293–300
- [7] D. Sybilski, Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce, IBDiM 50, 2000, 168 s
- [8] H.U. Bahia, *Modeling of Asphalt Concrete*, McGraw-Hill, 11-64 (2004)
- [9] AASHTO TP70 (2009), *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C
- [10] K. Błażejowski, J. Olszanki, H. Peciakowski, *Poradnik Asfaltowy*, Orlen Asfalt, 2014
- [11] S. Prashant, M. Yusuf, A. Nolan, K. Dahm, R. Dusseau, L. McCarthy, Characterization of creep and recovery curve of polymer modified binder, Construction and Building Materials Volume 34, September 2012, s. 504–511
- [12] Strategic Highway Research Program. Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE). The product of the SHRP Asphalt Research Program SHRP-A-410
- [13] L. Xiaohu, M. Langton, P. Redelius, Wax morphology in bitumen, Journal of Materials science 40, str. 1893-1900, 2005
- [14] T.L.J. Wasage, J. Stastna, L. Zanzotto, Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test, International Journal of Pavement Engineering, 2011, Vol 12 (6), s. 561-568
- [15] D.A. Anderson and T.W. Kennedy, Development of SHRP binder specification. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies, (62) 1993 s. 481–501
- [16] H.U. Bahia, 2001. Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design, Report 459, NCHRP, National Academy Press, Washington, DC
- [17] J. D'Angelo, R. Dongre, Superpave binder specifications and their performance relationship to modified binders, Proceedings of Canadian Technical Asphalt Association, XLVII, 2003, s. 91–103
- [18] I. Gawel, M. Kalabińska, J. Piłat, *Asfalt drogowy*, WKŁ, Warszawa 2001
- [19] Y. Tasdemir, High temperature properties of wax modified binders and asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 23 (2009), s. 3220-3224
- [20] M.C. Rubio, G. Martinez, Baena, F. Moreno, Warm mix asphalt: an overview, Journal of Cleaner Production, 24 (2012), s. 76-84
- [21] M. Iwański, G. Mazurek, Rheological characteristics of synthetic wax-modified asphalt binders, Polimery, Volume 57, Issue 9, 2012, s. 661-664
- [22] PN-EN 13702-2 Asfalty I lepszczca asfaltowe – Oznaczenie lepkości dynamicznej asfaltów modyfikowanych – Część 2: Metoda cylindrów współosiowych