



MARCIN GAJEWSKI

IBDiM
mgajewski@ibdim.edu.pl



DARIUSZ SYBILSKI

IBDiM
d.sybilski@ibdim.edu.pl



WOJCIECH BANKOWSKI

IBDiM
wbankowski@ibdim.edu.pl



ANDRZEJ WRÓBEL

IBDiM
awrobel@ibdim.edu.pl



KRZYSZTOF MIRSKI

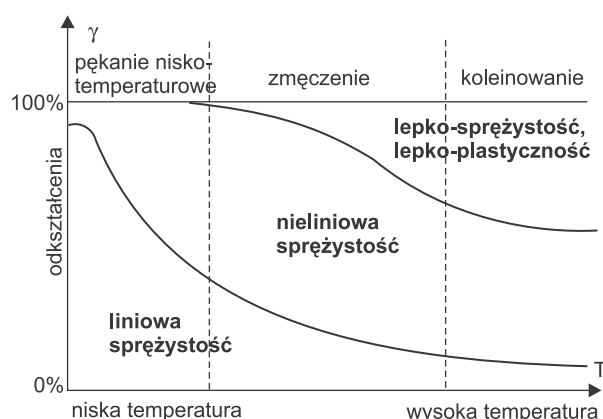
IBDiM
kmirski@ibdim.edu.pl

Ocena odporności na deformacje trwale mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie zaproponowanego parametru funkcjonalnego lepiscza.

Część 1. Badania lepisczy

Konstrukcje drogowe są eksploatowane coraz intensywniej poprzez zwiększanie obciążenia oraz zwiększony udziału ruchu ciężkiego, co w połączeniu z oddziaływaniem czynników środowiskowych wywołuje ich przyspieszoną degradację. Zwiększenie odporności na uszkodzenia oraz optymalizacja konstrukcji drogi i materiałów, z których jest ona wykonana, mają kluczowy wpływ na minimalizację kosztów wykonania i utrzymania dróg. Oczywiście uszkodzenia nawierzchni mogą być powodowane nie tylko przez wymienione czynniki, ale również z winy wadliwego projektu lub wykonania, jednakże są to zagadnienia niemożliwe do rozwiązania w laboratorium. W odniesieniu do podatnych asfaltowych nawierzchni drogowych można wyróżnić trzy podstawowe mechanizmy degradacji i zniszczenia: pękanie niskotemperaturowe, zmęczenie oraz koleinowanie (rys. 1). Na rysunku 1 widać, że każdy z mechanizmów zniszczenia może być analizowany z użyciem trzech modeli konstytutywnych (fizycznych), tj. liniowej i nieliniowej sprężystości, lepko-sprężystości i lepko-plastyczności w zależności od poziomu ekstremalnych odkształceń i temperatury [1].

W niniejszym artykule analizowane jest zjawisko powstawania deformacji trwałych, które postępuje w sposób przyspieszony w podwyższonej temperaturze i prowadzi do powstawania kolein. Na podstawie analizy szeroko prezentowanych w literaturze wyników prac dotyczących zagadnień powstawania kolein w nawierzchniach drogowych [1, 2, 3, 4, 5], można



Rys. 1. Typowe mechanizmy zniszczenia i modelowanie konstytutywne materiałów bitumicznych w funkcji temperatury i wielkości odkształceń – schemat poglądowy [1]

stwierdzić, że podstawowe czynniki destrukcyjne można podzielić na te związane z: kruszywem, lepisczem, mieszaną mineralno-asfaltową (mma), warunkami środowiskowymi, ruchem, konstrukcją i stanem aktualnym drogi. Celem niniejszego artykułu jest przeanalizowanie odporności na deformacje trwale modyfikowanych i niemodyfikowanych lepisczy asfaltowych, wyrażonej poprzez zaproponowany parametr funkcjonalny, gdyż jest to główny czynnik mający wpływ na deformacje plastyczne mma.

Wskazanie parametru charakteryzującego lepiscze, który pozwalałby oszacować odporność na deformacje trwale powstałej mieszanki mineralno-asfaltowej jest niezwykle trudne, a zaproponowane przez innych rozwiązania [2, 6] są aktualnie weryfikowane przez wielu badaczy. Zaproponowane przez autorów własne kryterium odporności na koleinowanie, to współczynnik deformacji wynikający z podzielenia dwóch charakterystycznych odkształceń postaciowych (ściśniętych) otrzymywanych w badaniach powtarzalnego pełzania i długotrwałej relaksacji przeprowadzonych w reometrze dynamicznego ściśnięcia (DSR). Zaprezentowane tutaj wyniki badań doświadczalnych pochodzą z testów przeprowadzonych na wybranych lepisczach asfaltowych: 35/50, 50/70, 30B i 80B.

Metody oceny odporności lepischer na deformacje trwałe

W ramach wykonanych badań przeprowadzono analizę: lepkości zerowego ścinania oraz współczynnika uzyskiwanego w badaniu pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP). Do badań wybrano 2 asfalty drogowe: 35/50 i 50/70 oraz dwa modyfikowane: 30B i 80B. Dodatkowo w standardowych badaniach wyznaczono penetrację w temperaturze 25°C, temperaturę mięknięcia wg PiK oraz łamliwości wg Fraassa.

Lepkość zerowego ścinania

Lepkość zerowego ścinania (*Zero Shear Viscosity – ZSV*), która może zostać wyznaczona na podstawie badań reologicznych [3], [4], jest w danej temperaturze wyznaczana stałą materiałową. Do jej wyznaczenia zastosowano reometr typu DSR. Procedura wyznaczenia ZSV może opierać się na teście obrotowego ścinania, przy badaniu oscylacyjnym lub badaniu pełzania. W celu wyznaczenia ZSV konieczne jest zastosowanie modeli konstytutywnych (fizycznych), gdyż ZSV jest wielkością graniczną przy $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ lub $\omega \rightarrow 0$, co oznacza, że nie jest możliwa do wyznaczenia bezpośrednio w czasie badania, ale musi być wyznaczona później, jako graniczna wartość przy założonym modelu konstytutywnym. W literaturze można spotkać dużo modeli konstytutywnych charakteryzujących $\eta(\omega)$, tj. lepkość jako funkcję częstości kołowej (w radianach na sekundę), albo $\eta(\dot{\gamma})$, tj. lepkość jako funkcję prędkości odkształcenia [7], [4]. Zaprezentowane w niniejszym artykule wyniki wykorzystują modele: Carreau-Yasudy i Crossa.

Model konstytutywny Carreau-Yasudy zapisuje się równaniem:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}}, \quad (1)$$

w którym:

η_0 ma interpretację lepkości zerowego ścinania,

η_{∞} lepkości przy $t \rightarrow \infty$,

λ jest stałą o wymiarze czasu (odwrotność ma interpretację krytycznej prędkości ścinania w punkcie, w którym lepkość zaczyna maleć),

a i n dodatkowe parametry określające charakter zależności.

We wzorze (1) przyjęto $\eta = |\eta^*| = |\eta' - i\eta''|$.

W modelu konstytutywnym Crossa równanie ma postać:

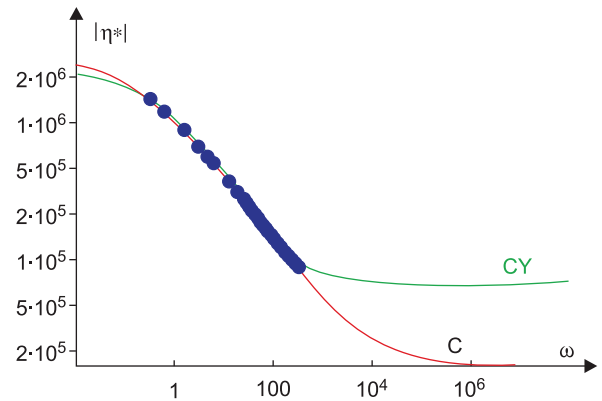
$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + \lambda \dot{\gamma}^m} \quad (2)$$

i występują w nim cztery stałe materiałowe: η_0 , η_{∞} , λ (czasem oznaczane: $\lambda = K = \frac{1}{\omega_b}$) i m .

Badania, w których wyznaczono lepkość w funkcji częstości kołowej w badaniu oscylacyjnego ścinania wykonano przy użyciu reometru typu MARS II. W przypadku modelu Crossa w programie RheoWin obsługującym reometr wyznaczono następujące parametry materiałowe lepischer asfaltowego 35/50 w temperaturze $T = 20$ [°C]: $\eta_0 = 3.010 \cdot E6$ [Pa], $\eta_{\infty} = 1.534 \cdot E4$ [Pa], $\lambda = K = 1/0.2548$ [s], $m = 0.5248$.

Podobnie jak w przypadku modelu Crossa, korzystając z automatycznej procedury optymalizacji programu Rheo-

Win, wyznaczono parametry do modelu Carreau-Yasudy otrzymując następujące parametry: $\eta_0 = 2.461 \cdot E6$ [Pa], $\eta_{\infty} = 6.555 \cdot 10^4$ [Pa], $\lambda = K = 0.4778$ [s], $n = 0.1503$ i $a = 0.4872$. Widać, że różnica między η_0 wyznaczonym do modelu Crossa i Carreau-Yasudy wynosi zaledwie około 18%, zaś parametr η_{∞} wyznaczony do modelu Carreau-Yasudy jest ponad czterokrotnie większy od tego wyznaczonego do modelu Crossa. Porównanie uzyskanych wyników przedstawione jest na rysunku 2.



Rys. 2. Porównanie przewidywań modelu Crossa (C) i modelu Carreau-Yasudy (CY)

Pełzanie przy obciążeniu powtarzalnym – propozycja procedury badania w USA – wobec braku odpowiedniego parametru charakteryzującego odporność lepischer drogowych i modyfikowanych [8] na deformacje trwałe, wprowadzono prosty do wykonania tzw. powtarzalny test naprężeniowego pełzania i relaksacji (ang. *Multiple Stress Creep Recovery Test – MSCR*). Na podstawie wyników tego testu można obliczyć parametr zawierający informacje o fundamentalnych właściwościach reologicznych lepischer, który ma interpretację podatności. W Instytucie Badawczym Dróg i Mostów (IBDiM) podjęto próbę wskazania innego parametru funkcjonalnego lepischer, który mógłby pozwolić na przewidywanie odporności mieszanki na koleinowanie. Zaproponowano badanie pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP), które umożliwi scharakteryzowanie własności reologicznych (sprężysto-plastycznych) lepischer. Badanie wykonuje się przy wymuszeniu naprężeniowym opisanym następującymi wzorami:

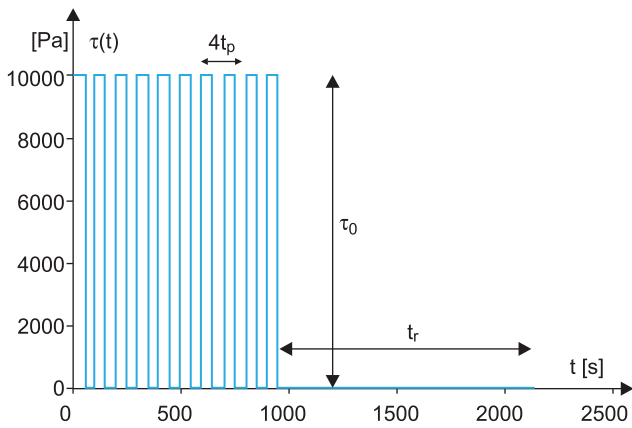
$$\tau_k(t) = \begin{cases} \tau_0, & t \in [(k-1)t_p, kt_p] \\ 0, & t \in [kt_p, (k+1)t_p] \end{cases}, \quad k \rightarrow 1, 2, \dots, 9, \quad (3)$$

przy $k = 10$

$$\tau_{10}(t) = \begin{cases} \tau_0, & t \in [9t_p, 10t_p] \\ 0, & t \in [10t_p, 10t_p + t_r] \end{cases} \quad (4)$$

Przebieg schematyczny badania przedstawiono na rysunku 3.

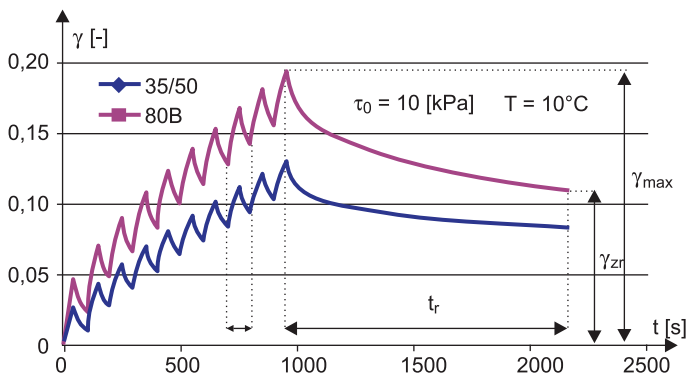
Proponowane wartości charakterystycznych czasów to: $t_p = 50$ [s] (czas pełzania i czas relaksacji w pierwszych 9 cyklach) i $t_r = 1200$ [s] (czas relaksacji w ostatnim cyklu). Początkowo, w zaproponowanym badaniu, zamiast ograniczenia na t_r przyjęto warunek na prędkość odkształceń (zerowa



Rys. 3. Schemat wymuszenia naprężeniowego przy $\tau_0 = 10[\text{kPa}]$ w proponowanym teście pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP)

prędkość z przyjętą dokładnością). Zaobserwowano jednak czasy pełnej relaksacji znacznie przekraczające 24h, dlatego ostatecznie zdecydowano się na przyjęcie stałego czasu $t_r = 1200[\text{s}]$, a wyznaczonych odkształceń postanowiono nie nazywać odkształceniem plastycznym (trwałym) tylko odkształceniem po relaksacji. Zaproponowano, aby test przeprowadzać przy następujących poziomach naprężenia: $t_0 = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0[\text{kPa}]$ itd., tak, aby objąć badaniem zakres nieliniowych właściwości lepiszcza.

Jako że przydatność proponowanego kryterium zostanie zweryfikowana przez badania koleinowania mieszanek mineralno-asfaltowych (część 2. artykułu), obecnie trudno stwierdzić, które wartości naprężenia ostatecznie zostaną wybrane oraz w której temperaturze należy przeprowadzać test; wstępnie wybrano trzy wartości temperatury: $T = 10, 30, 60 [^\circ\text{C}]$.



Rys. 4. Maksymalne odkształcenie ścienne w funkcji czasu jako odpowiedź na zadany program naprężeniowy zamieszczony na rysunku 3. Interpretacja charakterystycznych wielkości

Ponieważ ze względów praktycznych badanie najlepiej scharakteryzować jedną liczbą (parametrem), proponujemy wprowadzenie współczynnika deformacji (trwałej) w_d zdefiniowanego jako:

$$w_d = 1 - \frac{\gamma_{zr}}{\gamma_{\max}} \quad (5)$$

We wzorze tym γ_{zr} oznacza odkształcenie pozostałe po relaksacji przez $1200[\text{s}]$, zaś γ_{\max} maksymalne odkształcenie po 10 cyklach naprężenia (rys. 4). Warto zauważyć, że:

- $w_d = 1$ gdy materiał ma własności sprężyste ($\gamma_{zr} = 0$),
- $w_d = 0$ gdy materiał ma własności idealnie plastyczne ($\gamma_{zr} = \gamma_{\max}$).

Zatem, odnosząc to do zjawiska koleinowania, uznajemy za **lepsze to lepiszcze, którego wartość współczynnika w_d jest większa**. W ogólności wprowadzony w odniesieniu do lepiszczy współczynnik jest funkcją poziomu naprężenia i temperatury (tj. $w_d = w_d(\tau_0, T)$). W przyszłości po przeprowadzeniu testów koleinowania próbek mieszanki mineralno-asfaltowej zostaną wyznaczone reprezentatywne wartości τ_0 i T .

UWAGA: W aspekcie zaproponowanego parametru badanie odporności na deformacje trwałe musi zostać wykonane w temperaturze znacznie niższej od temperatury mięknięcia asfaltu, w przeciwnym wypadku wynik zawsze będzie wynosił $w_d = 0$.

Wyniki badań podstawowych, lepkości zerowego ścinania oraz współczynnika deformacji z badania POP

Do badań wybrano cztery lepiszcza asfaltowe i na wstępie prac sprawdzono ich standardowe właściwości. Otrzymane wyniki penetracji, temperatury mięknięcia i temperatury łamliwości podano w tabeli 1.

Tabela 1. Standardowe właściwości asfaltów – wyniki badań

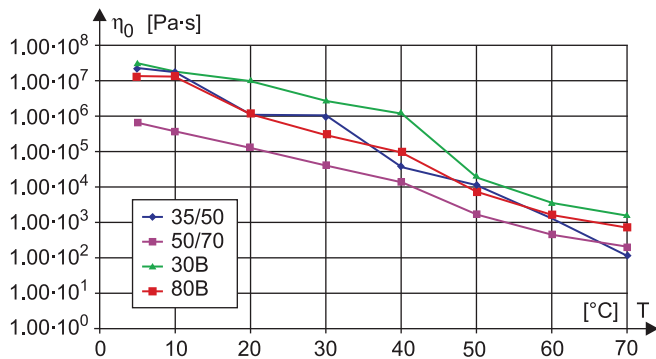
Właściwości	Rodzaj asfaltu			
	35/50	50/70	30B	80B
1	2	3	4	5
Penetracja w $25[^\circ\text{C}]$, 0.1 [mm]	43	67	33	62
Temperatura mięknięcia PiK, $[^\circ\text{C}]$	54,2	48	71,4	56,4
Temperatura łamliwości $[^\circ\text{C}]$	-19	-22	-23	-18

Na podstawie wielkości penetracji w $25[^\circ\text{C}]$ oraz temperatury mięknięcia, można próbować wskazać najlepsze lepiszcze, ze względu na przewidywaną odporność na koleinowanie. Ranking odporności na deformacje trwałe w świetle wyników z tabeli 1 przedstawia się następująco: 30B, 35/50, 80B i 50/70. Ranking ten powstał na podstawie porównania wyników badań penetracji w temperaturze $25[^\circ\text{C}]$ (im mniejsza penetracja, tym wyższa pozycja w rankingu). Warto podkreślić, że podobny ranking można uzyskać analizując wyniki badań dotyczących temperatury mięknięcia (im wyższa temperatura mięknięcia, tym wyższa pozycja w rankingu), w tym przypadku jednak lepiszcza 35/50 i 80B zamieniłyby się miejscami. Różnica temperatury mięknięcia w przypadku lepiszcza 35/50 i 80B nie przekracza 4%.

Badania lepkości zerowego ścinania

Lepkość zerowego ścinania została obliczona przy użyciu algorytmu optymalizacji nieliniowej standardowo zaimplementowanego w programie obsługującym reometr DSR. Zgodnie z wcześniejszym opisem przyjęto modele Crossa i Carreau-Yasudy. W ustalonej temperaturze wyznaczono wolne parametry w modelu konstytutywnym, w tym η_0 , czyli

lepkość zerowego ścinania. Wyniki przeprowadzonych badań (w tym przypadku, wartości η_0 ustalono przy użyciu modelu Carreau-Yasudy) pokazane zostały na rysunku 5.

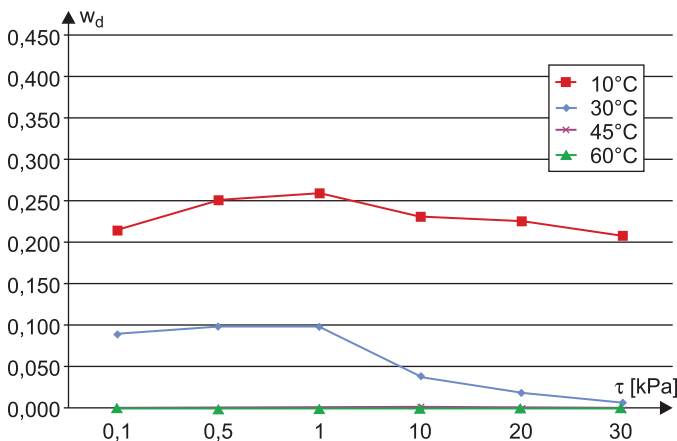


Rys. 5. Lepkości zerowego ścinania przebadanych lepiszczy asfaltowych w funkcji temperatury

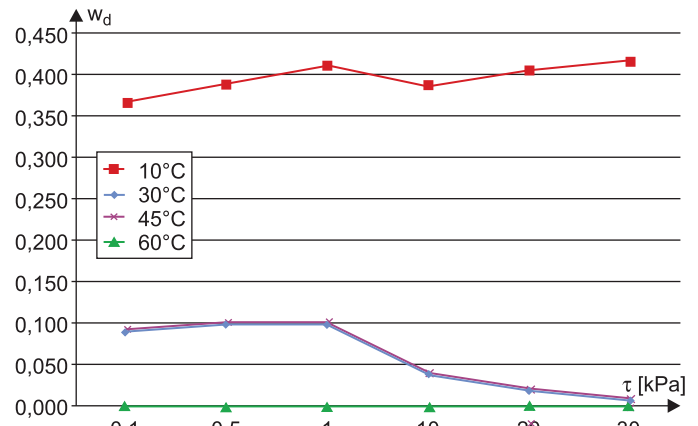
Zgodnie z przewidywaniami, lepkość zerowego ścinania wszystkich asfaltów maleje wraz ze wzrostem temperatury. Jeżeli oceniamy lepiszcza wg kryterium związanego z lepkością zerowego ścinania, to w całym zakresie najlepsze jest lepiszcze 30B. Wyniki dotyczące lepiszcza 35/50 i 80B są bardzo zbliżone, z tym że przy wyższej temperaturze (zakres: 60–70 [°C]) zdecydowanie lepsze wydaje się być lepiszcze modyfikowane. W przypadku lepiszcza 50/70 uzyskane wartości lepkości zerowego ścinania są najwyższe niemal w całym analizowanym zakresie temperatury.

Wyniki badania POP

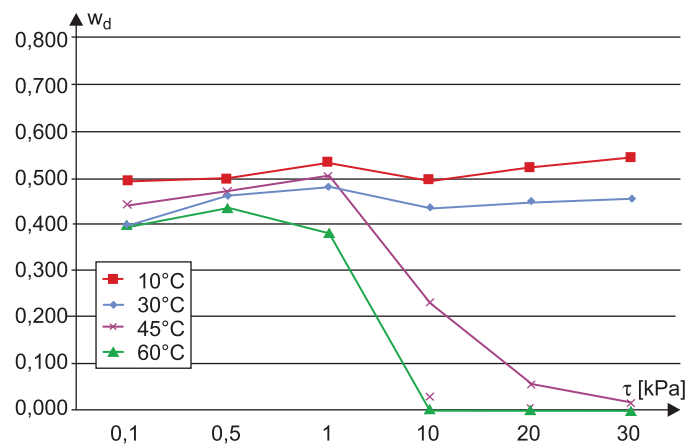
W opisywanych badaniach współczynnik deformacji w_d obliczono przy czterech wybranych wartościach temperatury: T = 10, 30, 45 i 60[°C] oraz przy sześciu poziomach naprężenia: $\tau_0 = 0.1, 0.5, 1.0, 10.0, 20.0, 30.0$ [kPa]. Uzyskane wyniki z badań poszczególnych lepiszczy przedstawione są w formie wykresów na rysunkach od 6 do 9.



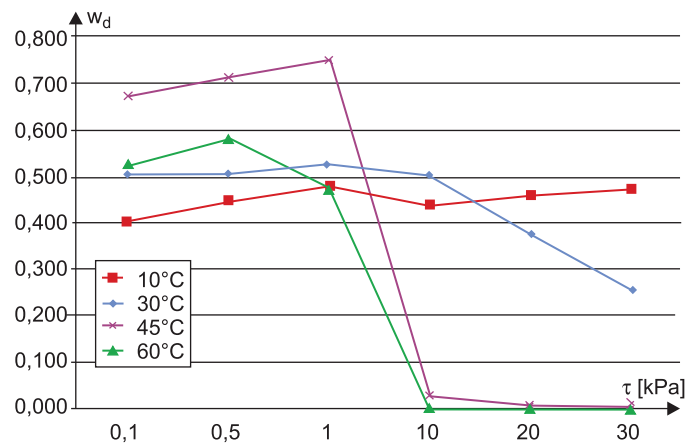
Rys. 6. Wyniki badania współczynnika w_d w zależności od poziomów naprężenia i temperatury asfaltu 50/70



Rys. 7. Wyniki badania współczynnika w_d w zależności od poziomów naprężenia i temperatury asfaltu 35/50



Rys. 8. Wyniki badania współczynnika w_d w zależności od poziomów naprężenia i temperatury asfaltu 30B



Rys. 9. Wyniki badania współczynnika w_d w zależności od poziomów naprężenia i temperatury asfaltu 80B

Analizując zaprezentowane wykresy łatwo dostrzec, że lepiszcze 30B charakteryzuje się najwyższym parametrem w_d w niższych wartościach temperatury, natomiast 80B w wyższych. Kolejność pozostałych lepiszczy, ocenianych zaproponowanym parametrem to: asfalt drogowe 35/50 oraz 50/70. Ponadto uwidacznia się podobny przebieg wykresów para-

metru w_d wszystkich lepiszcz w temperaturze $T = 10[^\circ\text{C}]$, przy wyższych wartościach temperatury zauważalna jest przewaga asfaltów modyfikowanych, ponieważ parametr w_d w zakresie naprężeń $\leq 1[\text{kPa}]$ utrzymuje się w przedziale od 0.2 do 0.6 a zatem jest wyraźnie większy od wartości bliskich 0 lub 0.1, które charakteryzują asfalty drogowe. Stąd wniosek, że badania, których wynikiem jest wartość parametru bliska 0 był przeprowadzany na substancji o własnościach zbliżonych do cieczy, a nie ciała sprężystego o własnościach lepkich. Lepiszcz modyfikowane wydają się być dużo bardziej odporne na wpływ temperatury, ale tylko w pewnym zakresie naprężeń, tj. od 0.1 do 10.0[kPa]. Można przypuszczać, że przy wyższych poziomach naprężenia mikrostruktura polimerowa SBS w wyniku znacznych deformacji ulega zniszczeniu i lepiszcz modyfikowane zachowują się jak niemodyfikowane.

Podsumowanie

Na tym etapie badań nie jest możliwe formułowanie wniosków w odniesieniu do odporności na koleinowanie mieszanek mineralno-asfaltowych, co będzie celem drugiej części artykułu. Niemniej jednak można stwierdzić, że na podstawie zaproponowanego parametru funkcjonalnego możliwe jest charakteryzowanie lepiszcz asfaltowych w szerokim zakresie odkształceń (naprężeń) i temperatury. Zastosowanie tego parametru pozwala na kompleksową ocenę lepiszcz asfaltowych drogowych i modyfikowanych, co przy zastosowaniu standardowych parametrów nie było możliwe. W ogólności funkcja $w_d(T, \tau_o)$ ma maksimum w lepiszczu:

- 80B, przy $T = 45[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, w_d jest bliskie 0.75,

- 30B, przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, w_d przekracza 0.55,
- 35/50, przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, w_d jest bliskie 0.4,
- 50/70, przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, w_d przekracza 0.4.

Wobec tego można przypuszczać, że do większości asfaltów badanie POP powinno się przeprowadzać w temperaturze $T = 10[^\circ\text{C}]$ przy naprężeniu ścinania $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$. Weryfikacji tej hipotezy można dokonać poszukując korelacji między wynikami badania POP a wynikami koleinowania przeprowadzonymi na typowych mieszankach wykonanych z zastosowaniem analizowanych lepiszcz przy założeniu optymalnej recepty.

Bibliografia

- [1] B. Gagliano, R. Blab, K. Kappl: *Models for permanent deformation for bituminous bound materials in flexible pavements*, SAMARIS – Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure, SAM-05-DE11, 2004
- [2] J. D'Angelo, R. Kluttz, R. Dongré, K. Stephens, L. Zanzotto: *Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test*, Journal of the Association Of Asphalt Paving Technologists, Vol.76, pp.123-157, 2007
- [3] T.G. Mezger: *The Rheology – Handbook, For users of rotational and oscillatory rheometers*, Vincentz Verlag, Hannover 2002
- [4] D. Sybilski: *Polimeroasfalty drogowe. Jakość funkcjonalna, metodyka i kryteria oceny*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, seria: Studia i materiały, zeszyt 45, Warszawa 1996
- [5] J.M. Ward: *Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1975
- [6] C. Nicholls (ed): *BitVal – Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests*, Report on Phase 1 of the BitVal Project, FEH-RL, 2006
- [7] H.A. Barnes, J.F. Hutton, K. Walters: *An Introduction to Rheology*, Rheology Series, 3, Elsevier, 1989
- [8] G. Polacco, J. Stastna, L. Zanzotto: *Accumulated strain in polymer-modified asphalts*, Rheol Acta, 47, pp.491-498, 2008



MARIA BOGACKA

Laboratorium Drogowe
Wojciech Bogacki
mariabogacka@
badaniatypu.pl



HALINA SARLIŃSKA

POLIMEX-MOSTOSTAL
S.A. halina.sarlińska@
polimex.pl

ITSR – wielka loteria

Odporność na wodę (ITSR) jest wymaganiem ogólnym wobec mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) typu: beton asfaltowy, BBTM, SMA i asfalt porowaty, projektowanych i produkowanych zgodnie z Normami Europejskimi. W dokumentach aplikacyjnych opracowanych w Polsce, odnoszących się do tych norm, wymaganie zostało przedstawione jako obowiązujące z dodatkowym jednym cyklem zamrażania. Z dopuszczalnych normami kategorii ITSr wybrano trzy, przypisane do mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na poszczególne warstwy konstrukcyjne:

- ITSr₇₀ – podbudowa
- ITSr₈₀ – warstwa wiążąca
- ITSr₉₀ – warstwa ścieralna

Wybór tych kategorii nie był poprzedzony w kraju żadnymi badaniami, ani w skali laboratoryjnej, ani na odcinkach doświadczalnych. Jedynym odniesieniem mogło być doświadczenie płynące z wcześniejszego wykonywania badania odporności na wodę i mróz według procedury opisanej w amerykańskiej normie AASHTO T 283 [3], która znacząco się różni od warunków badania stosowanych aktualnie.

Wymagania dotyczące ITSr zapisane w WT-2 2008 [4] były dość spójne z procedurą oznaczania tego parametru, ustaloną w Normie Europejskiej PN-EN 12697-12:2004 [1], natomiast w chwili wprowadzenia ich do praktyki krajowej laboratoria były zobowiązane do stosowania procedury zgodnej z nową wersją normy, tj. PN-EN 12697-12:2008 [2]. Nowe wydanie Wymagań Technicznych WT-2 2010 [5] zmieniło podejście do badania odporności mma na wodę i obecnie nakazuje stosowanie instrukcji badawczej stanowiącej załącznik nr 1 do WT-2-2010 [5]. Badanie wg tej instrukcji w sposób znaczący różni się od procedury opisanej w PN-EN 12697-12:2008 [2], jednak nie jest z nią niezgodne, ponieważ norma zezwala na zastosowanie dodatkowego kon-