

Marcin GAJEWSKI¹
Andrzej WRÓBEL¹
Stanisław JEMIOŁO¹
Dariusz SYBILSKI¹

WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH LEPI SZCZA NA KOLEINOWANIE MMA

Podstawowym celem tej pracy jest wskazanie parametru charakteryzującego lepiszcze, na podstawie którego możliwe byłoby przewidywanie jakości MMA wykonanych przy zastosowaniu danych lepiszczy pod względem ich odporności na deformacje trwałe. Dodatkowym celem pracy jest znalezienie zależności między wynikiem zaproponowanego testu pełzania przy powtarzalnym obciążeniu ścinającym przeprowadzanym na samym lepiszczu asfaltowym, a badaniem koleinowania przeprowadzanym na płytach wykonanych z MMA. Przedstawiono analizę uzyskanych wyników i wykazano istnienie korelacji między zaproponowanym parametrem, a głębokością koleiny. Oznacza to potencjalną możliwość zastąpienia kosztownego testu koleinowania, znacznie tańszym i prostszym testem, który można wykonać w reometrze DSR.

THE INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BINDER ON ASPHALT MIXTURE RUTTING

The main goal of this paper is to show some functional parameter for binder which could be used for quality prediction of obtained asphalt mixture in frame of rutting resistance. Additionally correlation between proposed by authors repeatable shearing creep-recovery test carried out on binder and asphalt mixture rutting test is under evaluation. The results are analyzed and correlation between proposed functional parameter and rutting depth is shown. Thanks to that it is possible to claim that expensive rutting procedure can be replaced with simple test carried out in DSR rheometer.

1. WSTĘP

Konstrukcje drogowe są obecnie poddawane coraz większym obciążeniom ruchem pojazdów. Z tego powodu optymalizacja konstrukcji drogi, a zwłaszcza materiałów z których jest ona wykonana, ma kluczowe znaczenie ze względu na minimalizację kosztów

¹Institut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, tel. + 48 22 6754215,
E-mails: mgajewski@ibdim.edu.pl; awrobel@ibdim.edu.pl; s.jemiolo@il.pw.edu.pl; d.sybilski@ibdim.edu.pl

jej wykonania i utrzymania w kontekście odporności na uszkodzenia. W przypadku podatnych nawierzchni drogowych podstawowe mechanizmy zniszczenia można podzielić na trzy grupy: koleinowanie, pękanie zmęczeniowe i pękanie niskotemperaturowe.

Na podstawie wyników badań dotyczących zjawiska powstawania kolein w nawierzchniach drogowych, por. m. in. [3,4,6,8,9], można określić podstawowe czynniki jakie mają bezpośredni wpływ na głębokość powstającej koleiny. Czynniki te można pogrupować na te związane z: kruszywem, lepiszczem, mieszanką mineralno-asfaltową (MMA), warunkami środowiskowymi, ruchem, konstrukcją i stanem aktualnym drogi. Celem niniejszego artykułu jest przeanalizowanie odporności na deformacje trwałe modyfikowanych i niemodyfikowanych lepiszczy asfaltowych jako jednego z podstawowych czynników decydujących o powstawaniu i rozwoju koleiny.

Lepiszczta asfaltowe są charakteryzowane przy użyciu standardowych metod (por. [1]), które pozwalają wyznaczyć np. penetrację, temperaturę mięknięcia, temperaturę Fraassa w określonych ustalonych warunkach, jednak szacowanie powstawania deformacji trwałych na podstawie tych konwencjonalnych testów w większości przypadków jest niezadowolające.

W ogólności można stwierdzić, że w celu uniknięcia koleinowania nawierzchni z mieszanki mineralno-asfaltowej lepiszcze powinno być jak najbardziej sztywne i sprężyste (przy założeniu, że pozostałe parametry zostały dobrane prawidłowo). Znaczna sztywność lepiszcza gwarantuje nieznaczne deformacje, zaś znaczna wartość części sprężystej zespolonego modułu sztywności skutkuje możliwością powrotu zdeformowanej pod obciążeniem nawierzchni do oryginalnej konfiguracji po zdjęciu obciążenia. Tego typu własności mechaniczne lepiszcza asfaltowego można badać w reometrze DSR.

W artykule przedstawiono propozycję niestandardowej metody oceny odporności lepiszcza na deformacje trwałe poprzez wykonanie wielokrotnego testu relaksacji i pełzania przy różnych ustalonych poziomach naprężenia. Testy te przeprowadzono w reometrze dynamicznego ścinania (DSR) w przypadku czterech rodzajów lepiszczy asfaltowych: 35/50, 50/70, 30B i 80B.

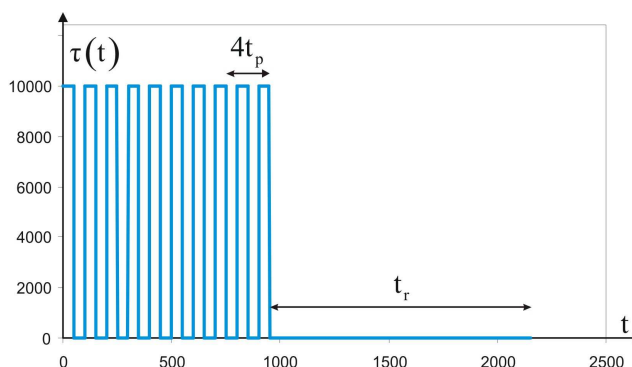
2. PROPOZYCJA METODY OCENY ODPORNOŚCI NA DEFORMACJE TRWAŁE LEPI SZCZY ASFALTOWYCH

Obszerne studium nad zagadnieniem związanym z zastąpieniem systemu oceny funkcjonalnej lepiszczy zawiera praca [3], gdzie przeprowadzono badania lepiszczy konieczne do ich oceny przy zastosowaniu kryteriów: $|G^*|/\sin(\delta)$, lepkości zerowego ścinania (ZSV), oraz MSCR (Multiple Stress Creep Recovery test). Na tej podstawie uszeregowano lepiszcza, a uzyskaną kolejność zweryfikowano na podstawie badań przeprowadzonych na mieszankach na gorąco w koleinomierzach dwóch typów. Wyniki tych porównań wskazują na przewagę (w sensie poprawności przewidywań) parametru wyznaczonego na podstawie testu MSCR w stosunku do pozostałych kryteriów. Proponowany test Pełzania przy Obciążeniu Powtarzalnym (POP) ma charakteryzować własności reologiczne i plastyczne materiału, por. [2,7]. Test ten jest przeprowadzany przy wymuszeniu naprężeniowym opisanym następującymi wzorami, por. także rys.1:

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

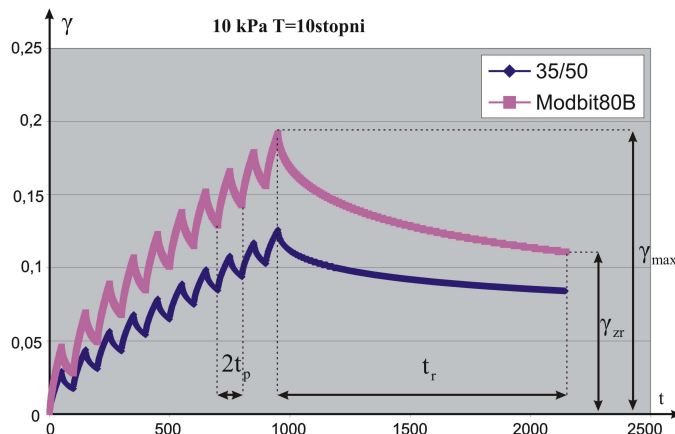
dla $k = 10$

$$\tau_{10}(t) = \begin{cases} \tau_o, & t \in [9t_p, 10t_p] \\ 0, & t \in [10t_p, 10t_p + t_r] \end{cases}. \quad (2)$$



Rys.1. Wymuszenie naprężeniowe przy $\tau_o = 10[\text{kPa}]$ w proponowanym teście pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP)

We wzorach (1) i (2) przyjęto następujące wartości charakterystycznych czasów: $t_p = 50[\text{s}]$ (czas pełzania) i $t_r = 1200[\text{s}]$ (czas relaksacji). Warto zauważyć, że pierwotnie w omawianym teście zamiast ograniczenia na t_r przyjęto warunek na prędkość odkształceń. Założono, że jeżeli prędkość odkształcenia jest zbliżona do zera (z pewną założoną dokładnością), to należy przerwać badanie. Oznaczałoby to, że materiał w pełni uległ procesowi relaksacji, a więc pozostałe odkształcenia można by interpretować jako odkształcenia trwałe. Ponieważ jednak wartości czasów do pełnej relaksacji były znaczne (przekraczające 24h i trudne do oszacowania dla różnych gatunków lepiszczy asfaltowych) to zdecydowaliśmy się na przyjęcie a priori pewnego czasu $t_r = 1200[\text{s}]$, a pozostałego odkształcenia nie nazywać odkształceniem plastycznym (trwałym) tylko odkształceniem po relaksacji, por. rys.2. Proponujemy, aby test przeprowadzać dla wartości naprężenia wynoszących: $\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0[\text{kPa}]$ itd., tak aby wejść w zakres nieliniowych właściwości lepiszcza.



Rys.2. Odkształcenie w funkcji czasu jako odpowiedź na zadany program naprężeniowy zamieszczony na rys.1. Interpretacja charakterystycznych wielkości

Jako, że przeprowadzone badanie najlepiej scharakteryzować jedną liczbą (parametrem) to proponujemy wprowadzenie pewnego współczynnika deformacji (trwałej) w_d zdefiniowanego jako:

$$w_d = 1 - \frac{\gamma_{zr}}{\gamma_{max}}, \quad (3)$$

gdzie γ_{zr} oznacza odkształcenie pozostałe po relaksacji przez 1200[s], zaś γ_{max} maksymalne odkształcenie po 10 cyklach naprężenia, por. rys. 2. Warto zauważyć, że: $w_d=1$ kiedy materiał ma **własności sprężyste** ($\gamma_{zr}=0$), zaś $w_d=0$ kiedy materiał ma **własności idealnie plastyczne** ($\gamma_{zr}=\gamma_{max}$).

W ogólności wprowadzony dla lepiszczy współczynnik jest funkcją poziomu naprężenia i temperatury (tj. $w_d = w_d(\tau_o, T)$). Należy także podkreślić, że tego typu badanie odporności na deformacje trwałe ma sens jedynie dla temperatur znacznie niższych od temperatury mięknięcia asfaltu, gdyż po jej przekroczeniu wynik zawsze będzie wynosił $w_d=0$.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. Lepiszcz

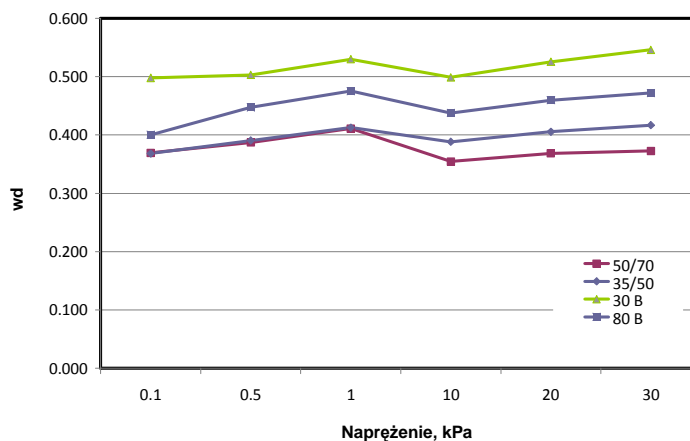
Lepiszcz do badań dobrano w taki sposób, aby porównać właściwości reologiczne asfaltów powszechnie stosowanych do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych wbudowywanych w drogi: asfalt **35/50**, asfalt **50/70**, asfalt modyfikowany **30B**, asfalt modyfikowany **80B**, wszystkie z produkcji krajowej.

Dla wybranych lepiszczy asfaltowych przeprowadzono badania: penetracji w 25[°C] wg PN-EN 1426, temperatury mięknięcia PiK wg PN-EN 1427, temperatury tamiwości wg

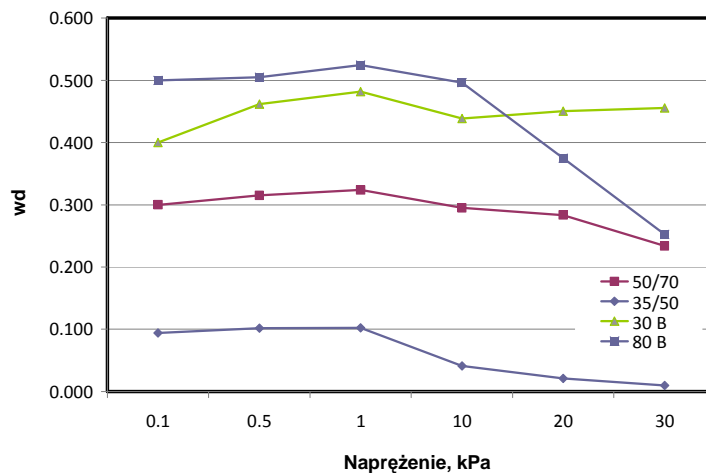
Fraassa wg PN-EN 12593, modułu zespolonego i kąta przesunięcia fazowego, lepkości zerowego ścinania, pełzania pod obciążeniem powtarzalnym, por. pkt.2. Szczegółowe omówienie ww. testów znajduje się w pracy [5]. Tu przywołane zostaną wyłącznie wybrane wyniki zaproponowanego testu POP jako istotne w kontekście poszukiwania korelacji między tymi wynikami a testem koleinowania.

W przypadku analizowanych lepiszczy badanie współczynnika deformacji (por. pkt.2) przeprowadzono dla trzech wybranych temperatur: $T=10, 30$ i $60[^\circ\text{C}]$ oraz sześciu poziomów naprężenia: $\tau_o=0.1, 0.5, 1.0, 10.0, 20.0, 30.0$ [kPa]. Uzyskane wyniki w całości zaprezentowano w pracy [5]. Przykładowo na rys.3 zamieszczono współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o , uzyskany w temperaturze $T=10[^\circ\text{C}]$. W temperaturze $T=30[^\circ\text{C}]$ widać wyraźny spadek współczynnika w_d dla lepiszczy niemodyfikowanych w całym zakresie naprężeń. Lepiszczka modyfikowane wydają się być dużo bardziej odporne na wpływ temperatury, ale tylko w pewnym zakresie naprężeń, tj. od 0.1 do 1[kPa], por. rys. 3 i 4.

Warto także zauważyć, że w wyższych temperaturach dla umiarkowanych poziomów naprężeń współczynniki deformacji w_d przyjmują wyższe wartości dla lepiszcza 80B, niż dla lepiszcza 30B. W przypadku asfaltów niemodyfikowanych w temperaturze $T=60[^\circ\text{C}]$ współczynniki deformacji w całym zakresie naprężeń są zbliżone do zera. Fakt ten jednak jest zgodny z przewidywaniami poczynionymi na podstawie temperatury mięknięcia wyznaczonej w standardowym teście, która dla lepiszcza 35/50 wynosi $54.4[^\circ\text{C}]$, zaś dla lepiszcza 50/70 tylko $49[^\circ\text{C}]$. Oznacza to, że w tych dwóch przypadkach test był przeprowadzany na substancji o własnościach zbliżonych do cieczy a nie ciała -lepkiego.



Rys. 3. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o , uzyskany w temperaturze $T=10[^\circ\text{C}]$



Rys. 4. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T = 30[^\circ\text{C}]$

Lepiszczka zmodyfikowane w wysokich temperaturach także wykazują się wyższymi wartościami współczynników deformacji, ale tylko dla umiarkowanych naprężeń. Po przekroczeniu około 10[kPa] wewnętrzna struktura stabilizowana przez modyfikator ulega dezintegracji a to powoduje, że współczynnik w_d jest bliski zeru.

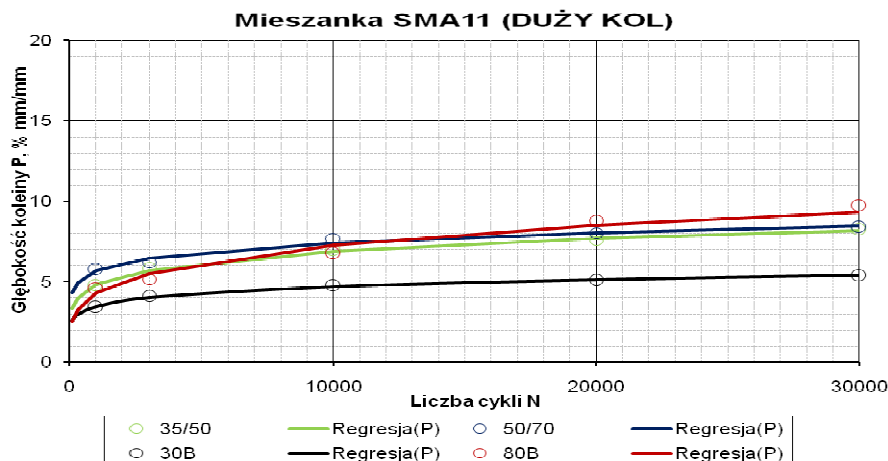
Na podstawie prezentowanych w pracy [5] i na rys. 3 i 4 wyników można zauważyć, że dla większości asfaltów funkcja $w_d(T, \tau_o)$ ma maksimum przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$. Wobec tego można przypuszczać, że dla większości asfaltów badanie POP powinno się przeprowadzać w temperaturze $T = 10[^\circ\text{C}]$ przy $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$.

3.2. Mieszanki mineralno-asfaltowe

Określanie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe przeprowadzono przy pomocy aparatu LCPC (zwanego w normie PN-EN 12697-22 aparatem dużym) oraz tzw. aparatu małego. Badanie polega na poddaniu zagęszczonej próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej wielokrotnym przejazdowi znormalizowanego koła ogumionego, w znormalizowanych warunkach temperatury, nacisku i liczby przejazdów koła po próbce. Po zakończeniu badania jest mierzona głębokość koleiny utworzonej w próbce przez koło.

Mieszanka SMA 11 została zaprojektowana wg wymagań [10] do warstwy ścieralnej kategorii ruchu KR3-KR6. Do wykonania mieszanki SMA 11 zastosowano następujące materiały składowe: Asfalty (35/50, 50/70, 30B, 80B), mączkę wapienną, granit frakcji 0/2 [mm], bazalt frakcji 2/5, 5/8, 8/11 [mm], środek adhezyjny Wetfix BE, dodatek stabilizujący ARBOCEL. Do badań przewidziano mieszankę mineralno-asfaltową SMA11, o takim samym składzie mineralnym, z taką samą zawartością lepiszcza i odpowiednio z różnymi asfaltami (35/50, 50/70, 30B, 80B).

Przykładowe wyniki testu koleinowania uzyskane przy zastosowaniu dużego koleinomierza przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 60°C w dużym koleinomierzu

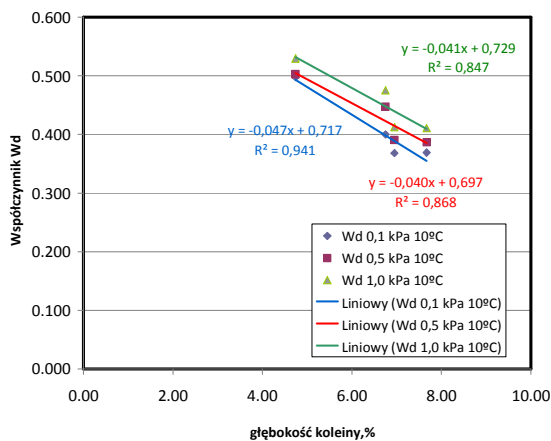
Na podstawie wykresów zamieszczonych na rys.5 bez wątplenia można uszeregować mieszanki z lepiszczem 30B, 35/50 i 50/70 (od najlepszej do najgorszej) pod względem ich odporności na koleinowanie w aparacie LCPC w całym zakresie liczby cykli. W przypadku mieszanki z lepiszczem 80B jej położenie w rankingu zmienia się w funkcji liczby cykli. Po przekroczeniu 20000 cykli koleina w płycie wykonanej z mieszanki z lepiszczem 80B jest największa.

4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW W CELU OKREŚLENIA POWIĄZAŃ MIĘDZY BADANIEM POP A BADANIEM KOLEINOWANIA

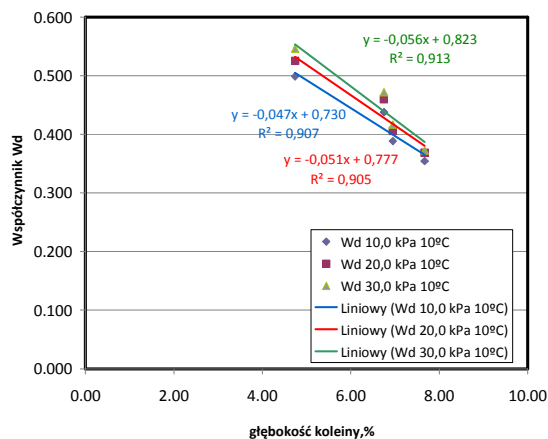
Podstawowym celem tej pracy jest wskazanie parametru charakteryzującego lepiszcze na podstawie którego możliwe byłoby przewidywanie rankingu mieszanek MMA wykonanych przy zastosowaniu danych lepiszczy pod względem ich odporności na deformacje trwałe. Dodatkowym celem jest znalezienie zależności pomiędzy wynikiem proponowanego testu pełzania pod obciążeniem powtarzalnym (POP) przeprowadzanego na samym lepiszczu asfaltowym, a badaniem koleinowania przeprowadzanym na płytach wykonanych z mieszanek mineralno asfaltowych z badanymi lepiszczami. Na tym etapie pracy wykonane zostały badania koleinowania w dużym (LCPC) i małym aparacie odpowiednio w temperaturze 60°C w dużym oraz 45°C i 60°C w małym aparacie.

Analiza związku między wynikami testu POP, a wynikami testu koleinowania w dużym koleinomierzu pozwala zauważyć, że możliwe jest znalezienie liniowego związku między parametrem w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ [kPa], $T=10^\circ\text{C}$) a głębokością koleiny po 10000 cykli

obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60° . Współczynniki korelacji wynoszą wtedy nawet w najlepszym przypadku 0.941, por. rys.6. Podobnie jest dla wyższych poziomów naprężenia w teście POP por. rys.7. Niemniej jednak, kiedy współczynnik w_d wyznaczymy w wyższych temperaturach to znalezienie jakiegokolwiek korelacji z wynikami koleinowania nie jest możliwe.



Rys.6. Związek parametru w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ [kPa], $T=10^{\circ}\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C



Rys.7. Związek parametru w_d ($\tau_o = 10, 20, 30$ [kPa], $T=10^{\circ}\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C

Warto podkreślić, że wnioski sformułowane na podstawie powyższych wykresów w odniesieniu do istnienia korelacji między współczynnikiem $w_d(T, \tau_o)$ w danej temperaturze i przy określonym poziomie naprężenia a wynikami testów koleinowania w dwu różnych aparatach i przy dwóch różnych temperaturach sformułowane dla mieszanek SMA11 nie można uogólniać na tym etapie dla innych typów i rodzajów MMA. Należy przypuszczać, że wspomniane wnioski mogą być słuszne, ale przy zachowaniu pewnych wymagań odnośnie innych istotnych ze względu na koleinowanie parametrów mieszanki (takich jak: objętość wolnych przestrzeni, udział objętościowy lepiszcza itp.). Prawdopodobnie dla pewnych przedziałów istotnych parametrów mieszanki można będzie wskazać krzywe (proste) korelacyjne, gdyż wskazanie jednej, która mogłaby obowiązywać dla wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych wydaje się niemożliwe.

Należy jednak podkreślić, że uzyskanie rankingu mieszanek ze względu na ich odporność na koleinowanie na podstawie badania POP, co było podstawowym celem tej pracy, jak najbardziej jest możliwe oczywiście pod warunkiem, że projekt mieszanki mineralno-asfaltowej jest wykonany zgodnie ze wszystkimi zasadami i wymaganiami technicznymi.

5. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieje korelacja pomiędzy parametrem w_d asfaltu a głębokością koleiny mieszanki mineralno-asfaltowej wykonanej z danym asfaltem przy założeniu tzw. optymalnej recepty. Parametr w_d jest wynikiem testów pełzania pod obciążeniem powtarzalnym wykonanych w różnych warunkach temperatury i obciążenia próbek. Badanie koleinowania zostały przeprowadzone w dwóch koleinomierzach dużym i małym odpowiednio w temp. 45°C i 60°C. Bardzo dobre korelacje uzyskano dla wyznaczonego w temperaturze 10°C i koleinowania po 10 000 cykli dla dużego koleinomierza ($R^2=0,9$) zarówno dla małych (0,1-1,0) [kPa] jak i dużych obciążeń (10,0-30,0)[kPa]. Podobnie wyglądały wyniki w małym koleinomierzu w 60°C, dla małych naprężeń ($R^2=0,7$) i dla dużych naprężeń ($R^2=0,9$). Dość dobrą korelację parametru w_d w 10°C i koleinowania uzyskano w małym koleinomierzu (MK) w 45°C ($R^2=0,8$) dla dużych obciążeń (10,0-30,0)[kPa] i ($R^2=0,65$) dla małych obciążeń (0,1-1,0)[kPa], por. szczegółowe wyniki zamieszczone w tab.1. Nie zaobserwowano natomiast zależności parametrów koleinowania i parametru w_d w temperaturze 30°C.

Tab. 1. Wartości współczynnika R^2 w zależności od warunków koleinowania i rodzaju koleinomierza

	R ² dla małych obciążeń			R ² dla dużych obciążeń		
	0,1 kPa	0,5 kPa	1,0 kPa	10,0 kPa	20,0 kPa	30,0 kPa
MK 45°C	0,45	0,65	0,65	0,81	0,82	0,83
MK 60°C	0,52	0,73	0,73	0,87	0,87	0,88
DK 60°C	0,94	0,87	0,85	0,91	0,91	0,91

Obserwując wyniki R^2 z tablicy 1 możemy zauważyć, że lepsze współczynniki korelacji parametru w_d i koleinowania uzyskujemy kiedy badania asfaltów w reometrze przeprowadzano pod większym obciążeniem. Wpływ zastosowanego aparatu w teście koleinowania nie miał większego wpływu. Gorsze wyniki uzyskano dla badań przeprowadzonych w małym koleinomierzu

Podsumowując badania doświadczalne można stwierdzić, że w przypadku analizowanych w pracy mieszanek istnieje potencjalna możliwość zastąpienia drogiego testu koleinowania, stosunkowo prostym badaniem na samym lepiszczu asfaltowym przeprowadzonym w reometrze DSR. Należy mieć również nadzieję, że możliwe jest rozszerzenie tego wniosku także na inne mieszanki po wykonaniu uprzednich badań o charakterze kalibracyjnym.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AASHTO Designation: T 315-06, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 North Capitol Street N.W., Suite 249, Washington, D.C 2001.
- [2] Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K.: An Introduction to Rheology, Rheology Series, 3, Elsevier, 1989.
- [3] D'Angelo J., Kluttz R., Dongré R., Stephens K., Zanzotto L.: 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.
- [4] Gagliano B., Blab R., Kappl K.: Models for permanent deformation for bituminous bound materials in flexible pavements, SAMARIS –Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure, SAM-05-DE11, 2004.
- [5] Gajewski M., Wróbel A., Jemioło S., Sybilski D.: Ocena wybranych lepiszczu asfaltowych pod względem ich odporności na deformacje trwałe, 13 th International Conference „Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, cd, TRANSCOMP 2009, Zakopane 2009 (Czasopismo Logistyka nr 6/2009).
- [6] Mezger T.G.: The Rheology – Handbook, For users of rotational and oscillatory rheometers, Vincentz Verlag, Hannover, 2002.
- [7] Polacco G., Stastna J., Zanzotto L.: Accumulated strain in polymer-modified asphalts, Rheol Acta, 47, pp.491-498, 2008.
- [8] Sybilski D.: Polimeroasfalty drogowe, Jakość funkcjonalna, metodyka i kryteria oceny, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, seria: Studia i materiały, zeszyt 45, Warszawa, 1996.
- [9] Ward J.M.: Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1975.
- [10] WT-2 Nawierzchnie asfaltowe „Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych”, IBDiM, 2008.