



MARCIN GAJEWSKI

IBDiM
mgajewski@ibdim.edu.pl



DARIUSZ SYBILSKI

IBDiM
d.sybilski@ibdim.edu.pl



WOJCIECH BAŃKOWSKI

IBDiM
wbankowski@ibdim.edu.pl



RENATA HORODECKA

IBDiM
rhorodecka@ibdim.edu.pl



ANDRZEJ WRÓBEL

IBDiM
awrobel@ibdim.edu.pl



KRZYSZTOF MIRSKI

IBDiM
kmirski@ibdim.edu.pl

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

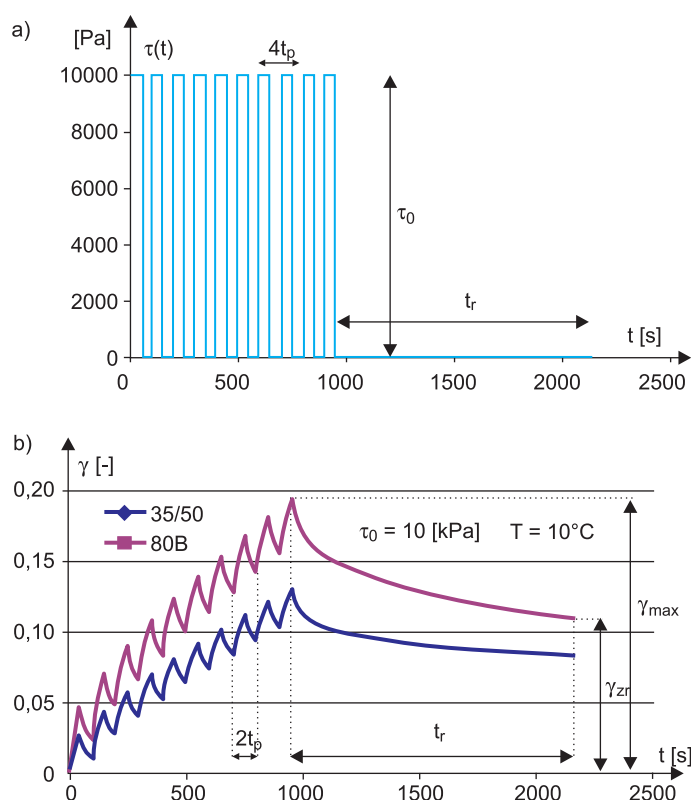
Część 2. Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

W pierwszej części artykułu przedstawiono propozycję nowego parametru funkcjonalnego w_d charakteryzującego lepiscze asfaltowe, który wyznaczyć można w teście pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP), przy wymuszonym naprężeniu jak na rys. 1a, por. także [2, 6] gdzie stosowany jest test MSCR. Badania przeprowadza się na próbkach walcowych w reometrze dynamicznego ścinania (DSR), [7]. Przykładową odpowiedź materiału na zadane wymuszenie naprężeniowe (rys. 1a) w postaci funkcji $\gamma(t)$ zaprezentowano na rys. 1b w przypadku dwóch typowych lepisczy asfaltowych: lepiscza drogowego 35/50 i modyfikowanego 80B (pozostawiono stare oznaczenia asfaltów w celu zachowania ciągłości z poprzednią częścią artykułu).

Zaproponowany w [4, 5] współczynnik deformacji (trwałej) w_d może być obliczony na podstawie przeprowadzonego badania w reometrze DSR jako:

$$w_d = 1 - \frac{\gamma_{zr}}{\gamma_{max}}$$

We wzorze tym γ_{zr} oznacza odkształcenie pozostałe po relaksacji przez 1200 [s], zaś γ_{max} maksymalne odkształcenie po 10 cyklach naprężenia (rys. 1a). Warto zauważyć, że: $w_d \rightarrow 1$, gdy dominują sprężyste właściwości materiału (tj. $\gamma_{zr} \rightarrow 0$), zaś $w_d \rightarrow 0$, gdy materiał ma właściwości idealnie plastyczne ($\gamma_{zr} = \gamma_{max}$). Przyjęto, że właściwości reologiczne lepiscza (m.in. odporność na pełzanie w szerokim zakresie wartości temperatury, granica plastyczności, itp.) mają dominujący wpływ na koleinowanie mieszanki mineralno-asfaltowej powstałej z zastosowaniem tego le-

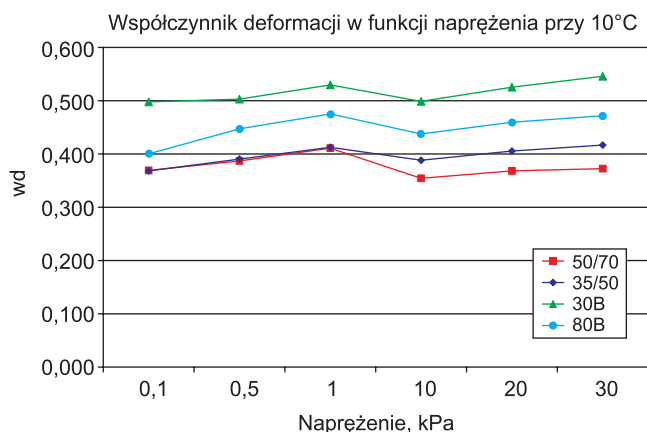


Rys. 1. a) Schemat wymuszenia naprężeniowego przy $t_0 = 10$ kPa, b) Maksymalne odkształcenie styczne w funkcji czasu jako odpowiedź na zadany program naprężeniowy zamieszczony na rys. 1a. Interpretacja charakterystycznych wielkości w proponowanym teście pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP)

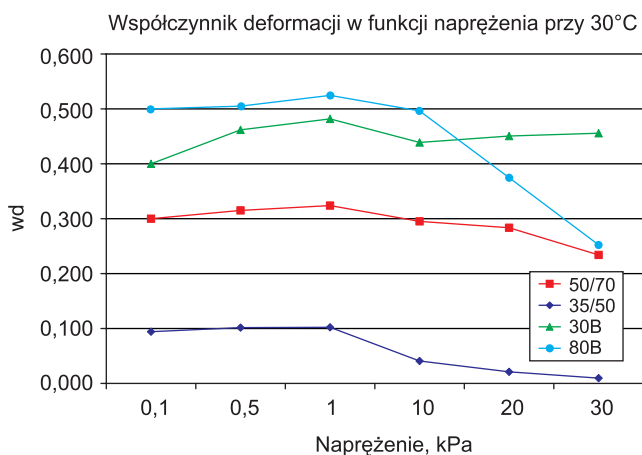
piszcza. Przeprowadzono wobec tego w [4] badania POP w przypadku czterech typowych lepisczy asfaltowych: 35/50, 50/70, 30B i 80B. W opisywanych badaniach współczynnik deformacji w_d obliczono przy czterech wybranych wartościach temperatury: $T = 10, 30, 45$ i 60°C i przy sześciu poziomach naprężenia: $\tau_0 = 0,1; 0,5; 1,0; 10,0; 20,0; 30,0$ kPa. Wprowadzony w odniesieniu do lepisczy współczynnik jest funkcją poziomu naprężenia i temperatury (tj. $w_d = w_d(\tau_0, T)$). W tym artykule zaprezentowane zostaną wyniki testów koleinowania w małym i dużym aparacie do koleinowania i posłużą one do wyznaczenia reprezentatywnych (tj. takich,

przy których korelacja wyników badania POP i koleinowania jest najlepsza) wartości τ_o i T . Przykładowe wyniki testu POP przeprowadzone w temperaturze $T= 10$ i 30°C zaprezentowano w formie wykresów na rys. 2 i 3. Niemal w całym zakresie naprężeń, ranking lepszy nie ulega zmianie, niemniej jednak w temperaturze 30°C lepiszcza modyfikowane zamieniają się miejscami przy niskich wartościach naprężenia ścinającego.

Należy podkreślić, że każdy punkt zamieszczony na wykresach (rys. 2 i 3) został wyznaczony jako średnia z minimum trzech pomiarów. Ekstremalny błąd (obliczony jako stosunek różnicy największej i najmniejszej wartości w odniesieniu do największej wartości uzyskanej z pomiaru), który został zanotowany przy najbardziej niekorzystnych warunkach temperatury i obciążenia nie przekraczał 5%.



Rys. 2. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T = 10^\circ\text{C}$



Rys. 3. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T = 30^\circ\text{C}$

Mieszanki mineralno-asfaltowe

W celu sprawdzenia wpływu lepiszcza na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na koleinowanie, zaprojektowano jedną mieszankę mineralno-asfaltową, w której zmienia się tylko lepiszcze. Mieszanka ta nie ma charakteru „doświadczalnego”, ale spełnia wszystkie wymagania technicz-

ne stawiane przed mieszanką, z której wykonuje się warstwę ścieralną na drogach o nawierzchniach obciążonych ruchem kategorii KR5 i KR6. Mieszanka SMA 11 została zaprojektowana wg wymagań WT-2 – 2008 [8] 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, kruszywo granitowe 0/2 mm, kruszywo bazaltowe 2/5, 5/8, 8/11 mm, środek adhezyjny Wetfix BE oraz 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). W rezultacie wykonano mieszanki, SMA11 35/50, SMA11 50/70, SMA11 30B, SMA11 80B, o zbliżonej zawartości wolnej przestrzeni (tab. 1). Warto zauważyć, że podobne badania powinny być przeprowadzone również w przypadku innych typowych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych.

Tabela 1. Podstawowe właściwości mieszanek SMA 11 (z różnymi asfaltami), o składzie optymalnym i zawartości asfaltu $A_m = 5,8\%$ (m/m)

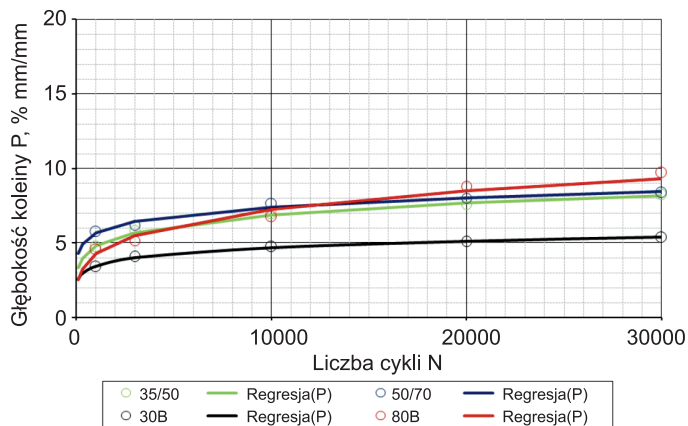
Lp.	Właściwości	SMA z różnymi asfaltami			
		SMA 11 35/50	SMA 11 50/70	SMA 11 30B	SMA 11 80B
1	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3	2,653	2,652	2,644	2,660
2	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3	2,567	2,570	2,565	2,579
3	Zawartość wolnych przestrzeni, % (v/v)	3,2	3,1	3,0	3,0

Zestawienie zbiorcze wyników badań w dużym aparacie do koleinowania (DK) w temperaturze 60°C

Określanie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe przy pomocy aparatu LCPC (zwanego w normie PN-EN 12697-22 [9] aparatem dużym) 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 na próbce przez koło i obliczana proporcjonalna (do grubości próbki), wartość koleiny.

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników badania koleinowania mieszanek SMA 11 (z różnymi asfaltami) w aparacie LCPC, w temperaturze 60°C

Liczba cykli N	Wyniki koleinowania mieszanek SMA (z różnymi asfaltami) w temperaturze 60°C w aparacie LCPC, PRD, % (mm/mm)			
	SMA 11 35/50	SMA 11 50/70	SMA 11 30B	SMA 11 80B
10000	6,9	7,7	4,7	6,8
30000	8,2	8,4	5,4	9,7



Rys. 4. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanej SMA 11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 60°C w dużym aparacie do koleinowania

Na podstawie wykresów zamieszczonych na rys. 4 można uszeregować mieszanki SMA 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. Wynik tego badania jest dość zaskakujący, zwłaszcza gdy go porównamy z wynikami koleinowania w małym aparacie, gdzie ranking mieszanek z badanymi lepiszczami nie zmienia się w funkcji liczby cykli. Zagadnienie to jest ciekawe samo w sobie i powinno być przebadane w kontekście stosowania w laboratoriach drogowych tzw. małych albo dużych aparatów do koleinowania, por. [1].

Zestawienie zbiorcze wyników badań w małym aparacie do koleinowania (MK) w temperaturze 45°C i 60°C

Mały aparat do koleinowania wykorzystywany jest do oceny odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe. Badanie przeprowadza się zgodnie z normą PN-EN 12697-22 [9]. Odpowiednio obciążone koło, z gumową oponą, porusza się cyklicznie po próbce z mieszanki mi-

Tabela 3. Zbiorcze zestawienie wyników badania koleinowania mieszanek SMA 11 (z różnymi asfaltami) w małym aparacie, w temperaturze 45°C

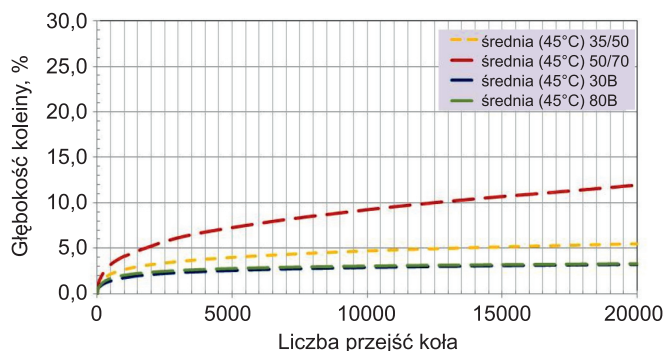
Właściwości	Wyniki badań koleinowania mieszanek SMA 11 (z różnymi asfaltami) w małym aparacie, w temperaturze 45°C			
	SMA 11 35/50	SMA 11 50/70	SMA 11 30B	SMA 11 80B
Głębokość koleiny, mm przy 10000 cykli	2,81	6,08	1,67	1,70
PRD, %	5,5	11,8	3,2	3,3
WTS(d10000-d5000), mm/1000 cykli	0,08	0,28	0,03	0,03

Tabela 4. Zbiorcze zestawienie wyników badania koleinowania mieszanek SMA 11 (z różnymi asfaltami) w małym aparacie, w temperaturze 60°C

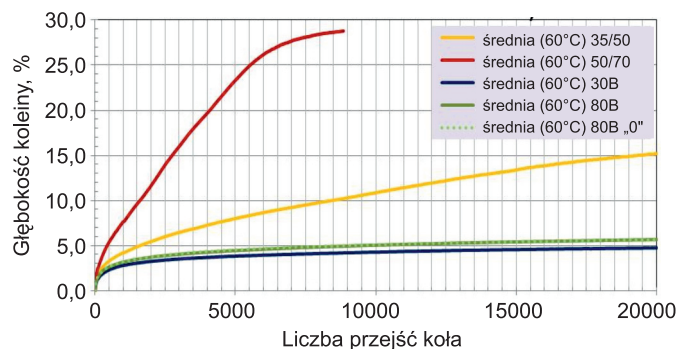
Właściwości	Wyniki badań koleinowania mieszanek SMA 11 (z różnymi asfaltami) w małym aparacie, w temperaturze 60°C				
	SMA 11 35/50	SMA 11 50/70*	SMA 11 30B	SMA 11 80B (52 mm)	SMA 11 80B (40 mm)
Głębokość koleiny, mm przy 10000 cykli	7,92	15	2,49	2,91	2,27
PRD, %	15,2	28,8	4,8	5,6	5,7
WTS (d10000-d5000), mm/1000 cykli	0,45	0,55	0,05	0,06	0,05

* Wyniki podano przy uzyskanej liczbie cykli 8850

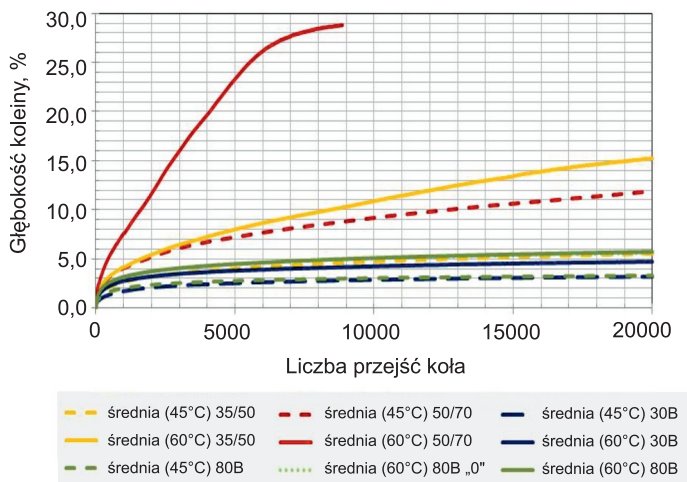
neralno-asfaltowej z określoną prędkością. W komorze utrzymywana jest zadana temperatura (np. 45°C lub 60°C). Próbkę poddane badaniom mogą być przygotowane w zagęszczarce walcowej i mieć kształt płyty o wymiarach 260 na 320 mm oraz grubości od 30 do 120 mm, ewentualnie mogą być odwierconymi rdzeniami o średnicy 200 mm. Podczas typowego badania koło dociskane jest do próbki z siłą 700 ± 10 N, a przyrost koleiny jest stale monitorowany, za pomocą elektromagnetycznego czujnika w 35 punktach z dokładnością do 0,01 mm. Badanie przeprowadza się jednocześnie na dwóch próbkach.



Rys. 5. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA 11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 45°C w małym aparacie do koleinowania



Rys. 6. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA 11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 60°C w małym aparacie do koleinowania



Rys. 7. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA 11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 45°C i 60°C w małym aparacie do koleinowania

Analiza wykresów głębokości koleiny w funkcji liczby cykli, zamieszczonych na rys. 5–7, uzyskanych w tzw. małym aparacie do koleinowania, pozwala uszeregować mieszanki SMA 11 z badanymi lepiszczami w następującym rankingu: 30B, 80B, 35/50, 50/70 niezależnie od liczby cykli i temperatury badania. W stosunku do badań przeprowadzonych w dużym aparacie do koleinowania widoczne są cztery zasadnicze różnice:

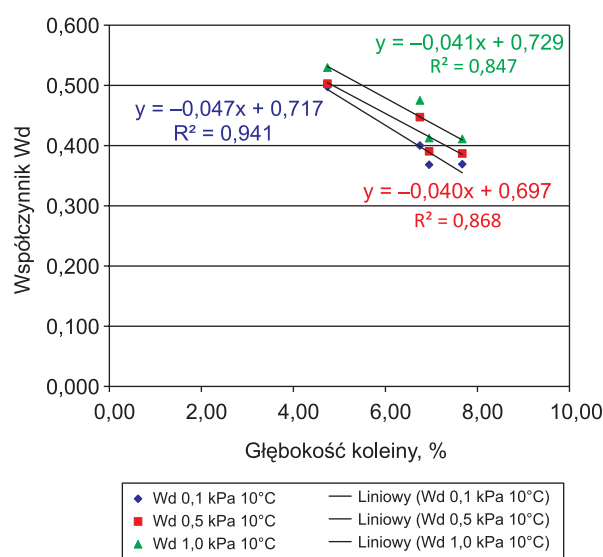
- mieszanka SMA 11 z lepiszczem 80B jest mniej podatna na koleinowanie niż mieszanka z lepiszczem 35/50 zarówno w temperaturze 45°C, jak i 60°C,
- w przypadku badań prowadzonych w małym aparacie używano stałe uszeregowanie mieszanek niezależnie od liczby cykli (por. rys. 7),
- zaobserwowano bardzo małą różnicę między mieszanką SMA 11 z lepiszczem 80B i 30B w temperaturze 45°C,
- zaobserwowano bardzo małą odporność na koleinowanie mieszanki z lepiszczem 50/70 w temperaturze 60°C, w przypadku której nie udało się osiągnąć nawet 10000 cykli.

Analiza wyników uzyskanych w celu określenia powiązań między badaniem POP a badaniem koleinowania

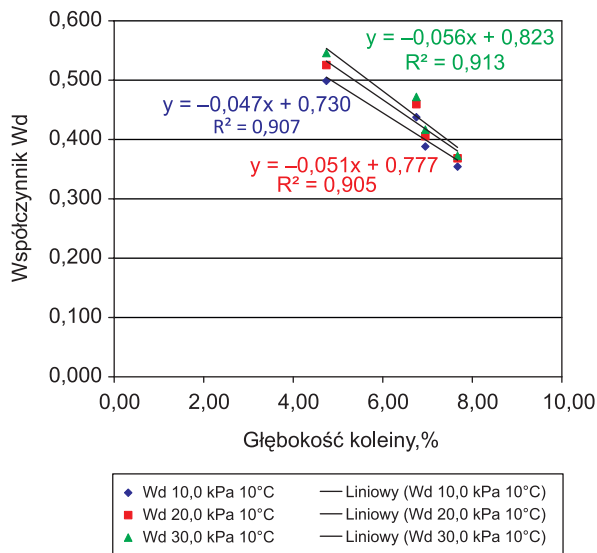
Podstawowym celem pracy, wykonanej w IBDiM, było wskazanie parametru charakteryzującego lepiszczę, na podstawie którego możliwe byłoby przewidywanie rankingu mieszanek mma wykonanych przy zastosowaniu danych lepiszczy pod względem ich odporności na deformacje trwałe, por. także [8]. Z porównania wyników koleinowania mieszanek SMA 11 z różnymi asfaltami z wynikami parametru w_d (rys. 2 i 3) można zauważyć, że istnieje korelacja pomiędzy tymi wynikami. W trakcie realizacji badań pojawił się jednak dodatkowy cel, którego realizacja wydaje się o wiele trudniejsza. Tym 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. Podobny cel realizowano w przypadku testu MSCR [2, 6] w pracy [8]. 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. Przygotowano receptę na mieszankę SMA 11 do warstwy ścieralnej dróg obciążonych ruchem kategorii KR5 i KR6, w której jedyną zmienną był rodzaj użytego lepiszczka. Poszukując najlepszej korelacji między wynikami badania POP, przy różnych poziomach naprężenia i różnych wartościach temperatury oraz badaniami koleinowania, przeprowadzonymi w dwóch różnych urządzeniach i przy dwóch ustalonych wartościach temperatury, zastosowano zarówno modele liniowe, jak i potęgowe. Przy pewnych wartościach parametrów korelacje te są dość dobre, a przy innych nie występują wcale. Niemniej jednak, analiza związku między wynikami testu POP a wynikami testu koleinowania w dużym aparacie pozwala zauważyć, że możliwe jest znalezienie liniowego związku między parametrem $w_d(\tau_o = 0,1; 0,5; 1,0 \text{ kPa}, T = 10^\circ\text{C})$ a głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w dużym aparacie przy temperaturze 60°C. Wniosek ten jednak należałoby zweryfikować uwzględniając większą liczbę badań, co umożliwiłoby statystyczną obróbkę wyników. Współczynniki korelacji obliczone na podstawie przeprowadzonych badań wynoszą w najlepszym przypadku nawet 0,941 (por. rys. 8). Podobnie jest przy wyższych poziomach naprężenia w teście POP (por. rys. 9). Jednakże, kiedy współczynnik w_d zostanie wyznaczony przy wyższych wartościach temperatury, to znalezienie jakiegokolwiek korelacji z wynikami koleinowania nie jest możliwe.

Warto podkreślić, że wnioski sformułowane na podstawie wykresów 8 i 9 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 dwóch różnych aparatach i przy dwóch różnych wartościach temperatury, sformułowane w odniesieniu do miesza-



Rys. 8. Zależność parametru $w_d(\tau_o = 0,1; 0,5; 1,0; T = 10^\circ\text{C})$ z głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w dużym aparacie do koleinowania, w temperaturze 60°C



Rys. 9. Zależność parametru w_d ($\tau_0 = 10, 20, 30, T = 10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w dużym aparacie do koleinowania, w temperaturze 60°C

nek SMA 11 nie mogą być uogólniane, na tym etapie, do 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: zawartość wolnych przestrzeni, udział objętościowy lepiszcza itp.). Prawdopodobnie do pewnych przedziałów istotnych parametrów mma można będzie wskazać krzywe (proste) korelacyjne, gdyż wyznaczenie jednej, która mogłaby obowiązywać do wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych wydaje się niemożliwe.

Podsumowanie

W przeprowadzonej w IBDiM pracy (omówionej w [4] i niniejszym artykule) poszukiwano parametru funkcjonalnego do lepiszcza asfaltowego, który pozwoliłby na przewidywanie odporności mma na deformacje trwałe. Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieje korelacja pomiędzy parametrem w_d asfaltu a głębokością koleiny w zagęszczonej mieszance mineralno-asfaltowej wykonanej z danym asfaltem przy wykorzystaniu recepty spełniającej postawione w [8] wymagania dotyczące warstwy ścieralnej z SMA 11, obciążonej kategorią ruchu KR3-KR6. Parametr w_d jest wynikiem testów pełzania pod obciążeniem powtarzalnym, wykonanych w różnych warunkach temperatury i obciążenia próbek. Badania koleinowania zostały przeprowadzone w dwóch aparatach do koleinowania (dużym i małym) odpowiednio w temperaturze 45°C i 60°C . Bardzo dobre korelacje uzyskano dla w_d wyznaczonego w temperaturze 10°C i koleinowania po 10 000 cykli w dużym aparacie do koleinowania ($R^2 = 0,9$), zarówno przy małych (0,1–1,0) kPa, jak i dużych obciążeniach (10,0–30,0) kPa. Podobnie wyglądały wyniki w małym aparacie do koleinowania w 60°C , przy małych naprężeniach ($R^2 = 0,7$) i przy dużych naprężeniach ($R^2 = 0,9$). Dość dobrą korelację parametru w_d w 10°C i koleinowania uzyskano

w małym aparacie do koleinowania (MK) w 45°C ($R^2 = 0,8$) przy dużych obciążeniach (10,0–30,0) kPa i ($R^2 = 0,65$) przy małych obciążeniach (0,1–1,0) kPa; (por. szczegółowe wyniki zamieszczone w tab.5). Nie zaobserwowano natomiast zależności parametrów koleinowania i parametru w_d w temperaturze 30°C .

Tabela 5. Wartości współczynnika R^2 do zależności w_d od warunków koleinowania i rodzaju aparatu do koleinowania

Typ aparatu do koleinowania i temperatura pomiaru	R^2 przy małych obciążeniach			R^2 przy dużych obciążeniach		
	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

Wyniki R^2 podane w tabeli 5. wskazują, że lepsze współczynniki korelacji parametru w_d i koleinowania uzyskano przy badaniu asfaltów w reometrze pod większym obciążeniem. Wpływ zastosowanego aparatu w teście koleinowania nie miał dużego wpływu, ale jednak stwierdzono gorszą korelację w_d z wynikami badań uzyskanymi w małym aparacie do koleinowania [1]. Podsumowując, można stwierdzić, że w przypadku analizowanych w pracy mieszanek mineralno-asfaltowych (SMA 11) istnieje potencjalna możliwość wykorzystania stosunkowo prostego badania na samym lepiszczu asfaltowym w fazie wstępnej ich projektowania. Ostateczna weryfikacja odporności na deformacje trwałe zaprojektowanej mieszanki mineralno-asfaltowej powinna być jednak przeprowadzona przy wykorzystaniu testu koleinowania.

Bibliografia

- [1] D. Bodin, J.R. Grenfell, A.C. Collop: *Comparison of Small and Large Scale Wheel Tracking Devices*, „Road Materials and Pavement Design”, 10: sup1, str. 295-325, 2009
- [2] J. D'Angelo, R. Klutz, 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, str. 123-157, 2007
- [3] J.A. D'Angelo: *The Relationship of the MSCR Test to Rutting*, *Road Materials and Pavement Design*, 10:sup1, str. 61-80, 2009
- [4] M. Gajewski, D. Sybilski, W. Bańkowski, A. Wróbel, K. Mirski: *Ocena odporności na deformacje trwałe mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie zaproponowanego parametru funkcjonalnego lepiszcza. Część 1. Badania lepiszczy*. „Drogownictwo” 9/2012, str. 253-259
- [5] M. Gajewski, D. Sybilski, W. Bańkowski: *The influence of binder rheological properties on asphalt mixture permanent deformation*, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, zaakceptowany do druku
- [6] J. Król, K. Matraszek: *Właściwości wysokotemperaturowe lepiszczy asfaltowych w badaniu cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCR)*, „Drogownictwo” 10/2012, str. 321-324
- [7] T. G. Mezger: *The Rheology – Handbook, For users of rotational and oscillatory rheometers*, Vincentz Verlag, Hannover, 2002
- [8] Wymagania Techniczne - Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych, WT-2 2008
- [9] PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 22: Koleinowanie ■