



PIOTR JASKUŁA

piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl



MARCIN STIENS

marcin.stiens@pg.gda.pl



CEZARY SZYDŁOWSKI

cezary.szydowski@wilis.pg.gda.pl

Politechnika Gdańska

Wpływ zbrojenia polimerowymi włóknami rozproszonymi na wybrane właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych

W ostatnich latach na znaczeniu zyskują różne sposoby polepszania właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Jednym z takich sposobów jest zastosowanie rozproszonych włókien stanowiących rodzaj zbrojenia. Idea wprowadzenia do składu mieszanki mineralno-asfaltowej zbrojenia rozproszonego została zaczerpnięta z tożsamej technologii stosowanej z powodzeniem w betonach cementowych. Znane są aplikacje różnego typu włókien, w szczególności włókien syntetycznych (szklanych, karbonowych, polimerowych) oraz włókien pochodzenia naturalnego (konopie, juta, sizal, len) [1]. Głównym zadaniem włókien stosowanych w mieszankach mineralno-asfaltowych jest zwiększenie wytrzymałości, co może przekładać się na zwiększenie energii koniecznej do zniszczenia tego materiału [2]. W wyniku tego

rodzaju rozwiązania mieszanki mineralno-asfaltowej z włóknami zbrojącymi charakteryzują się zwiększoną odpornością na deformacje trwałe i zwiększoną wytrzymałością na rozciąganie [3], co jest szczególnie ważne w aspekcie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania niskotemperaturowe.

Pomysł stosowania włókien zbrojących w mieszankach mineralno-asfaltowych nie jest nowy. W 1984 r. Button i Hunter [4] opublikowali raport na temat stosowania włókien syntetycznych w mieszankach mineralno-asfaltowych. Przebadano dziesięć różnych rodzajów włókien, zarówno syntetycznych, jak i naturalnych w zakresie badań parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych tzn. stabilności wg Marshalla, modułu sztywności, wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, zmęczenia, pełzania i odporności na działanie wody. Przeprowadzone zostały również badania i obserwacje terenowe. Zaobserwowano niewielką ogólną poprawę parametrów użytkowych, np. wzrost odporności na działanie wody. Biorąc pod uwagę wzrost kosztów budowy związany z wprowadzaniem włókien przy wytwarzaniu mma, tego rodzaju rozwiązanie okazało się być wątpliwe pod wzglę-

dem ekonomicznym. W międzyczasie jednak zostało wykonanych wiele badań z zastosowaniem włókien rozproszonych w mieszankach mineralno-asfaltowych [3, 5, 6].

W ostatnim czasie obiektem badań stała się mieszanka włókien aramidowo-poliolifenowych. Opracowana w 1982 r. [7] mieszanka początkowo miała stanowić dodatek zwiększający trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych. Obecnie oferowane na rynku włókna zostały szerzej zaprezentowane w 2008 r. i od tego czasu są przedmiotem badań w kilku programach badawczych.

Włókna aramidowo-poliolifenowe zostały szczegółowo przebadane przez Kalousch i współpracowników [8]. Mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem włókien szczegółowo przebadano w teście trójosiowego ściskania, weryfikowano odporność na deformacje trwałe w teście pełzania dynamicznego, moduł dynamiczny, trwałość zmęczeniową, odporność na spękania termiczne oraz na propagację pęknięcia. Przebadano mieszanki z dwiema zawartościami włókien zbrojących – 0,45 kg i 0,9 kg na tonę gotowej mieszanki. Mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem włókien charakteryzowały się korzystniejszymi parametrami w porównaniu do mieszanek referencyjnych. Istotny wpływ na poprawę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych ma zawartość włókien. W przypadku modułu dynamicznego mieszanki z mniejszą zawartością włókien charakteryzowały się większym modułem sztywności aniżeli mieszanka referencyjna, podczas gdy dodatek 0,9 kg włókien powodował zmniejszenie sztywności mieszanki. Wytrzymałość na zginanie również zależna była od zawartości włókien – podobnie jak w przypadku modułu. Może to nasuwać wniosek, że dla określonych cech mieszanek mineralno-asfaltowych istnieje optymalna zawartość włókien, której nie można przekraczać. Kalousch stwierdził ponadto, że dzięki zastosowaniu włókien w mieszankach mineralno-asfaltowych możliwe jest zmniejszenie dotychczasowych grubości warstw asfaltowych w konstrukcjach nawierzchni [9, 10]. Stemphar i współpracownicy [11] opisali zastosowanie włókien aramidowych w asfalcie porowatym stosowanym na nawierzchniach lotniskowych. Według zrealizowanych badań, mieszanka mineralno-asfaltowa z dodatkiem włókien zbrojących charakteryzowała się zwiększonym modułem sztywności, szczególnie w wysokich temperaturach i pomimo zwiększonych kosztów początkowych w ocenie ogólnej zastosowanie włókien zostało uznane za opłacalne z uwagi na wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni [11].

Cel badań

Przedmiotem zrealizowanych przez Politechnikę Gdańską badań była ocena wpływu dodatku włókien polimero- wych na wybrane właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych do warstwy wiążącej i warstwy ścieralnej. Program badań został ukierunkowany w taki sposób, aby możliwe było stwierdzenie ewentualnych różnic pomiędzy mieszankami z dodatkiem włókien, a mieszankami referencyjnymi. W badaniach główny nacisk położono na parametry charakteryzujące zachowanie się nawierzchni w niskiej i wysokiej temperaturze.

Badane materiały

Badaniom poddano trzy mieszanki mineralno-asfaltowe zaprojektowane według wymagań WT:2-2014 [12] i normy PN-EN 13108-1 [13] tzn. beton asfaltowy do warstwy ścieralnej AC 11 S KR3÷4 z asfaltem 50/70 (5,6% wagowo), beton asfaltowy do warstwy wiążącej AC 16 W KR3÷7 z asfaltem 35/50 i asfaltem modyfikowanym PmB 25/55-60. W obu podanych przypadkach zawartość asfaltu wynosiła 4,6% wagowo w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Z uwagi na poznawczy charakter badań zdecydowano się nie stosować środka adhezyjnego, aby nie zaburzyć ewentualnego wpływu włókien na parametry mieszanek.

W badaniach stosowano mieszankę włókien aramidowo-poliolifenyowych przeznaczonych do typowych mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, w przypadku których temperatura wytwarzania i zagęszczania zawiera się między 121°C a 190°C. Dostępne są również włókna dedykowane do mieszanek wytwarzanych w technologii na ciepło oraz na zimno. Stosowane włókna miały długość 19 mm. Widok włókien zaprezentowano na fotografiach 1a -1c.

Zgodnie z zaleceniami producenta włókna dozowano do gorącego kruszywa w ilości 0,05% w stosunku wagowym (0,5 kg włókien na tonę mieszanki mineralno-asfaltowej), jeszcze przed zadozowaniem asfaltu.

Przygotowanie próbek

Mieszanki mineralno-asfaltowe zostały przygotowane w laboratorium zgodnie z zapisami normy PN-EN 12697-35 [25]. Przed zagęszczaniem luźną mieszankę mineralno-as-

faltową poddano procesowi starzenia krótkoterminowego zgodnie z procedurą podaną w załączniku 2 do wymagań WT:2-2014 [12].

W zależności od przeznaczenia próbek zastosowano cztery różne metody zagęszczania. Próbkę do badania cech objętościowych zagęszczano w ubijaku Marshalla zgodnie z normą PN-EN 12697-30 [26]. Próbkę do oceny odporności na propagację pęknięcia zagęszczano w prasie żyratorowej zgodnie z normą PN-EN 12697-31 [27] do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $98 \div 100\%$. Próbkę do oceny odporności na spękania niskotemperaturowe w badaniu zginania ze stałą prędkością deformacji zagęszczano w zagęszczarce walcowej zgodnie z normą PN-EN 12697-33 [28] do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $98 \div 100\%$.

Próbki zagęszczano w temperaturze 135°C w przypadku asfaltu 35/50 i 50/70 oraz w temperaturze 145°C w przypadku asfaltu PmB 25/55-60.

Podczas mieszania laboratoryjnego, jak i podczas zagęszczania próbek, nie zaobserwowano trudności związanych z dodatkiem włókien aramidowo-poliolifenyowych. Można było stwierdzić, że we wszystkich przypadkach dodatek włókien powodował mniejszą segregację mieszanek. Rozproszenie włókien podczas mieszania laboratoryjnego było nieco mniejsze, niż podczas mieszania odbywającego się w wytwórni, co można również zaobserwować na rysunku 1b i 1c. Podczas przygotowywania mieszanek w laboratorium konieczne okazało się odpowiednie wydłużenie procesu mieszania w mieszarce mechanicznej, co pozwoliło uzyskać rozproszenie włókien bliskie uzyskiwanemu w wytwórni.

Metody badań

Odporność na spękania niskotemperaturowe została oceniona na podstawie dwóch metod badawczych. Wykonano badania zginania belek prostokątnych ze stałą prędkością deformacji w temperaturze -20°C według metody opracowanej na Politechnice Gdańskiej przez Judyckiego [16, 17, 18]. Przedmiotowe badanie polega na zginaniu belki o wymiarach $50 \times 50 \times 300$ mm w schemacie trypunktowego zginania ze stałą prędkością przemieszczenia pionowego wynoszącą 1,25 mm/min. W trakcie badania rejestrowana jest siła oraz przemieszczenie poziome pomiędzy uchwytami zamocowanymi na spodzie próbki, w środku rozpiętości. Na podstawie zarejestrowanych danych obliczono następujące parametry:



Fot. 1. (a) Widok luźnych włókien (strona lewa), (b) włókna w mma mieszanej w laboratorium (środek), (c) włókna w mma mieszanej w wytwórni (strona prawa), (fot. Ł. Mejlun)

- ϵ_{ult} , odkształcenie graniczne przy pęknięciu,
- R_{rz} , wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu,
- S , moduł sztywności.

Brak jest oficjalnych wymagań, które dotyczą ocenianych parametrów. Ogólnie, z punktu widzenia oceny odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania niskotemperaturowe, lepszym materiałem jest materiał charakteryzujący się większym odkształceniem granicznym, wyższą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu oraz niższym modułem sztywności. Niższa sztywność ogranicza powstawanie naprężeń termicznych, natomiast wyższa wytrzymałość na rozciąganie zwiększa odporność na pęknięcie warstw asfaltowych.

Drugą metodą oceny odporności badanych betonów asfaltowych na spękania niskotemperaturowe było określenie parametrów mechaniki pęknięcia w teście zginania próbki półwałcowej według normy PN-EN 12697-44 [19]. Metoda badawcza opisana w normie została zmodyfikowana na Politechnice Gdańskiej na podstawie literatury [20, 21, 22, 23]. Metoda normowa bazuje na określeniu krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} , który jest wyznaczany na podstawie maksymalnej siły zarejestrowanej przy zniszczeniu próbki. W celu lepszej oceny badanych mieszanek pod kątem odporności na pęknięcie wyznaczono dodatkowo całą J , która charakteryzuje prędkość uwalniania energii podczas propagacji pęknięcia. Badana półwałcowa próbka poddawana jest zginaniu w schemacie trypunktowym, ze stałą prędkością przemieszczenia 1 mm/min. Rejestrowana jest siła oraz przemieszczenie pionowe. Badanie zostało przeprowadzone w temperaturze -20°C dla trzech głębokości nacięcia na spodzie próbki półwałcowej inicjującego spękanie: 10 mm, 20 mm i 30 mm.

Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} został obliczony na podstawie maksymalnej siły zarejestrowanej podczas badania. Energia odkształcenia do zniszczenia U została obliczona jako pole pod wykresem $F(d)$ do wartości siły maksymalnej. Na podstawie równania regresji liniowej wyznaczonego z zależności energii U od głębokości nacięcia a wyznaczono wartość dU/da jako zmianę energii w stosunku do zmiany głębokości nacięcia. W Polsce jedno z pierwszych zastosowań niniejszej procedury badawczej opisali Szydłowski i Judycki [30].

Wpływ dodatku włókien zbrojących na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych oceniano również na podstawie badania modułu dynamicznego, zgodnie z amerykańskimi wytycznymi, przedstawionymi w publikacji NCHRP 9–29 [24]. Badanie zostało przeprowadzone w celu wyznaczenia krzywej wiodącej modułu sztywności. Dla każdej mieszanki przebadano próbki w trzech temperaturach i dziewięciu częstotliwościach z zakresu od 25 Hz do 0,01 Hz. Metoda została opisana m.in. przez Jaczewskiego i Mejluna [29].

Badanie modułu dynamicznego bazuje na haversinusoidalnym obciążeniu próbki cylindrycznej przez siłę osiową oraz na pomiarze przemieszczeń na trzech czujkach umieszczonych na poboczniczy próbki.

Krzywe wiodące modułu sztywności badanych materiałów zostały wyznaczone zgodnie z procedurą przedstawioną w raporcie NCHRP 9–29 PP 02 [24]. Równanie (1)

uwzględnia zastosowanie współczynnika przesunięcia wyznaczonego przy pomocy równania Arrheniusa.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left[\log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \right]}} \quad (1)$$

w którym:

$|E^*|$ – moduł dynamiczny, psi;

Max – moduł maksymalny, psi;

f – częstotliwość, Hz;

T_R – temperatura referencyjna, K;

T – temperatura badania, K;

δ, β, γ – parametry dopasowania;

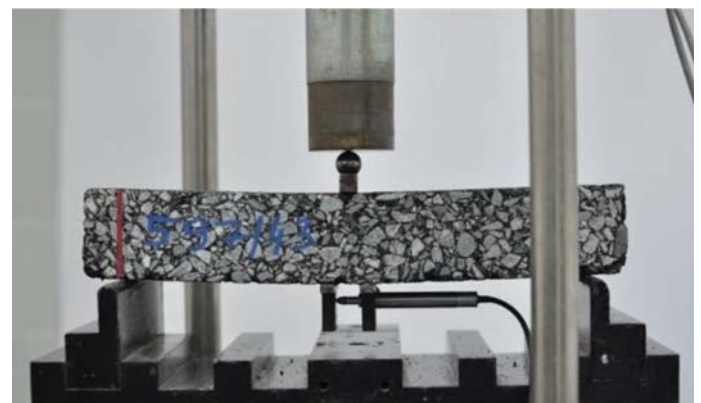
ΔE_a – energia aktywacji (traktowana jako parametr dopasowania).

Temperatura referencyjna wynosiła $+20^{\circ}\text{C}$.

Do wyznaczenia częstotliwości zredukowanej przy wyznaczaniu krzywej wiodącej wykorzystano wzór Arrheniusa podany w punkcie 10.1.2 wytycznych NCHRP 9–29: PP 02. Wzór ma następującą postać (oznaczenia jak we wzorze 1):

$$\log f_r = \log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2)$$

Na fotografii 2 przedstawiono widok próbek podczas badań odporności na spękania niskotemperaturowe, natomiast na fot. 3 zaprezentowano próbkę podczas badania modułu dynamicznego w urządzeniu SPT.



Fot. 2. Widok próbek podczas badania zginania w niskiej temperaturze: (a) próbka belkowa, (b) próbka półwałcowa



Fot. 3. Widok próbki podczas badania modułu dynamicznego

Wyniki badań laboratoryjnych

Podstawowe cechy objętościowe, odporność na działanie wody według PN-EN 12697-12 [14] i załącznika 1 do WT:2-2014 [12] oraz odporność na koleinowanie według PN-EN 12-697-22 [15] zamieszczono w tabeli 1, zarówno dla mieszanek z dodatkiem włókien, jak i mieszanek referencyjnych.

Badanie zginania belki prostopadłościowej

Wyniki badań odporności na spękania niskotemperaturowe zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 1. Podstawowe cechy badanych betonów asfaltowych

Parametr	AC11S 50/70	AC11S 50/70 FF	AC 16 W 35/50	AC 16 W 35/50 FF	AC 16 W PmB 25/55-60	AC 16 W PmB 25/55-60 FF
Zawartość asfaltu, %	5,6	5,6	4,6	4,6	4,6	4,6
Zawartość włókien, %	0,0	0,05	0,0	0,05	0,0	0,05
Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla [%]	2,6	2,8	5,5	6,2	6,8	7,0
Wolne przestrzenie wypełnione lepiszczem VFB [%]	83,4	82,8	65,8	62,6	60,5	59,7
Wolne przestrzenie w mieszance mineralnej VMA [%]	15,9	16,0	16,0	16,7	17,1	17,3
Odporność na działanie wody, ITSR [%]	91	100	64	71	90	88
Odporność na koleinowanie, metoda B w powietrzu, 60°C, 10 000 cykli	13,6	12,1	4,3	4,5	3,3	2,9
WTS _{AIR1} [mm/1000 cykli]	0,23	0,20	0,05	0,07	0,03	0,04
PRD _{AIR1} [%]						

Tabela 2. Wyniki badania odporności na spękania niskotemperaturowe, zginanie belek prostopadłościowych w temperaturze -20°C (średnie z 5 próbek)

Parametr		AC11S 50/70	AC11S 50/70 FF	AC 16 W 35/50	AC 16 W 35/50 FF	AC 16 W PmB 25/55-60	AC 16 W PmB 25/55-60 FF
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, R _{tz} [MPa]	X _{sr}	8,10	8,36	6,29	6,32	6,51	7,00
	S	0,303	0,272	0,196	0,158	0,381	0,545
Odształcenie graniczne, ε _{ult} [%o]	X _{sr}	0,687	0,741	0,471	0,515	0,661	0,710
	S	0,032	0,126	0,048	0,065	0,093	0,100
Moduł sztywności, S [GPa]	X _{sr}	12,50	11,54	13,74	12,10	10,02	10,16
	S	0,415	1,793	0,899	1,363	1,336	1,917

X_{sr} – średnia, S – odchylenie standardowe

Parametry mechaniki pęknięcia

Na rysunku 1 przedstawiono zależność pomiędzy energią odkształcenia U a głębokością nacięcia a . Przedstawiono również równania regresji liniowej, na podstawie których wyznaczono wartość całki J . Całka J została wyznaczona z równania (3), w którym B oznacza grubość badanej próbki:

$$J_c = -\left(\frac{1}{B}\right) \frac{dU}{da} \quad (3)$$

Zestawienie wyników badań parametrów mechaniki pęknięcia zilustrowano na rysunku 2.

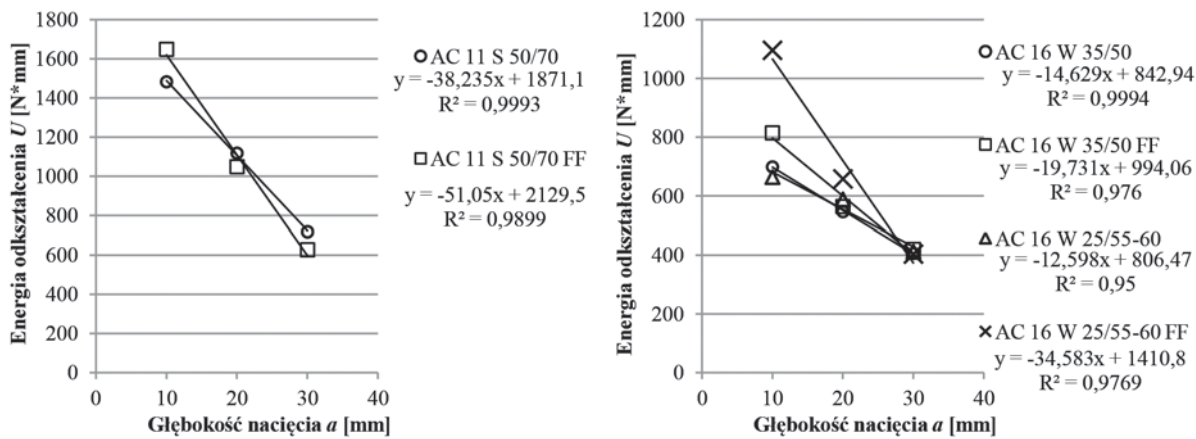
Badanie modułu dynamicznego

Krzywe wiodące modułu sztywności badanych betonów asfaltowych przedstawiono na rysunku 3.

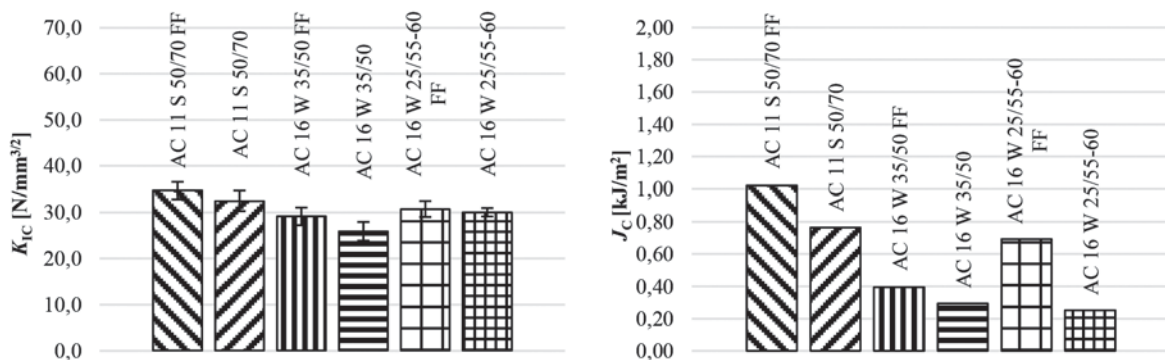
Analiza wyników badań i wnioski

Dodatek włókien polimerowych (aramidowo-poliolifenywnych) poprawił właściwości badanych betonów asfaltowych w zakresie odporności na spękania niskotemperaturowe. W szczególności pozytywny efekt dodatku włókien zaobserwowano w przypadku betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej z asfaltem 50/70. Pozytywny wpływ w przypadku warstwy wiążącej z asfaltem modyfikowanym PmB 25/55-60 oraz asfaltu 35/50 nie był tak widoczny.

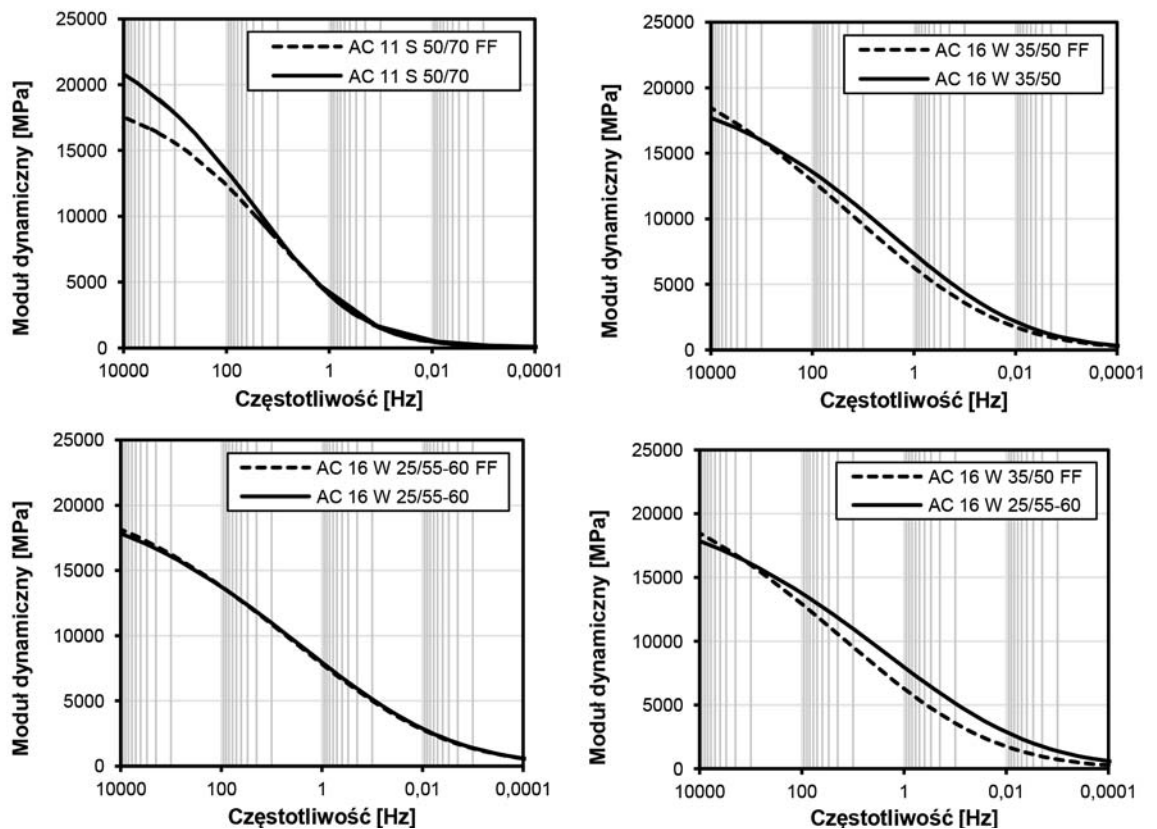
Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie badanych włókien w mieszankach mineralno-asfaltowych może poprawić ich odporność, w szczególności w aspekcie odporności na spękania niskotemperaturowe. We wszystkich badanych betonach asfaltowych zaobserwowano wzrost odporności na rozciąganie przy zginaniu, odkształcenia granicznego oraz obniżenie modułu sztywności w temperaturze -20°C. Badane betony asfaltowe z dodatkiem włókien rozproszonych charakteryzowały się wyższą energią pęknięcia w porów-



Rys. 1. Zależność między energią odkształcenia U a głębokością nacięcia a



Rys. 2. Odporność na pęknięcie K_{1c} (dla głębokości nacięcia 10 mm) oraz całka J badanych betonów asfaltowych



Rys. 3. Krzywe wiążące moduły sztywności badanych betonów asfaltowych, temperatura referencyjna +20°C

naniu do mieszanek referencyjnych. Podobny trend zaobserwowano analizując współczynnik intensywności naprężeń, jednak w tym przypadku różnice nie były tak znaczące.

Analiza krzywych wiodących modułu sztywności badanych betonów asfaltowych do warstwy ścieralnej z dodatkami włókien rozproszonych potwierdziła zdolność do poprawy właściwości niskotemperaturowych. Wartości modułu sztywności w przypadku wysokich częstotliwości są wyraźnie niższe, niż w przypadku mieszanki referencyjnej bez dodatku włókien. Moduł dynamiczny w przypadku betonu asfaltowego do warstwy wiążącej z asfaltem 35/50 jest nieznacznie wyższy dla mieszanki z dodatkiem włókien. W przypadku betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym PmB 25/55-60 nie zaobserwowano różnic pomiędzy mieszanką z dodatkiem włókien a mieszanką referencyjną. Stwierdzono natomiast, że moduł dynamiczny betonu asfaltowego do warstwy wiążącej z asfaltem 35/50 z dodatkiem włókien jest niższy, niż moduł dla betonu asfaltowego z asfaltem 25/55-60 bez dodatku włókien. Zachowanie wszystkich trzech badanych betonów asfaltowych z dodatkiem włókien w zakresie niskich częstotliwości jest zbliżone do zachowania mieszanek referencyjnych, co może wskazywać na brak wyraźnej poprawy odporności na deformacje trwałe w wysokiej temperaturze. Znajduje to również potwierdzenie w wynikach normowych badań odporności na koleinowanie, w ramach których mieszanki z włóknami osiągnęły praktycznie taki sam poziom w stosunku do mieszanek bez włókien, tzn. nie uzyskano znaczącej poprawy.

Temat dotyczący stosowania włókien rozproszonych stanowi bardzo istotne i perespektywiczne zagadnienie. Z tego powodu w Katedrze Inżynierii Drogowej i Transportowej Politechniki Gdańskiej planowane jest w najbliższym czasie kontynuowanie badań mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowych.

Bibliografia

- [1] O. S. Abiola, W. K. Kupolati, E. R. Sadiku, and J. M. Ndambuki, "Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 305–312, 2014.
- [2] A. Mahrez, M. R. Karim, and H. Y. Katman, "Prospect of Using Glass Fibre Reinforced Bituminous Mixes," *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.*, vol. 5, no. October, pp. 794–807, 2003.
- [3] M. A. Cleven, "Investigation of the Properties of Carbon Fibre Modified Asphalt Mixtures," Michigan Technological University, 2000.
- [4] J. W. Button and T. G. Hunter, "Synthetic Fibres in Asphalt Paving Mixtures," Austin, Texas, 1984.
- [5] C. A. Toney, "Fibre Reinforced Asphalt Concrete Pavements - City of Tacoma," Olympia, 1987.
- [6] R. Edgar, "Ten Year Performance of Asphalt Additive Test Sections: Lava Butte Fremont Highway Junction Section," Washington, D.C., 1998.
- [7] J. Sturtevant, "Forta-Fi - Fibre Reinforcement for Asphalt." NW Pavement Management Conference, p. 44, 2012.
- [8] K. E. Kaloush, K. P. Biligiri, W. A. Zeiada, M. C. Rodezno, S. Dwivedi, J. X. Reed, and C. Cary, "Evaluation of FORTA Fibre-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests - Evergreen Drive , Tempe , Arizona," Tempe, 2008.
- [9] K. E. Kaloush, K. P. Biligiri, W. A. Zeiada, M. C. Rodezno, and J. X. Reed, "Evaluation of Fibre-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests," *J. Test. Eval.*, vol. 38, no. 4, p. 102442, 2010.
- [10] K. E. Kaloush and W. A. Zeiada, "Fibre-Reinforced Asphalt Concrete Mixtures Structural Numbers and Pavement Design Considerations," Tempe, 2012.
- [11] J. J. Stempihar, M. I. Souliman, and K. E. Kaloush, "Use of Fibre Reinforced Asphalt Concrete as a Sustainable Paving Material for Airfields," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2266, pp. 60–68, 2012.
- [12] General Directorate for National Roads and Motorways, "WT-2 Asphalt pavement for national roads. Asphalt mixtures. Technical requirement." 2010.
- [13] PN-EN 13108-1, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Wymagania, Część 1: Beton asfaltowy.
- [14] PN-EN 12697-12, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę.
- [15] PN-EN 12697-22, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 22: Koleinowanie
- [16] J. Judycki, "Zależność wytrzymałości betonu asfaltowego poddanego zginaniu od prędkości wywoływanych odkształceń," *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, pp. 39–56, 1976.
- [17] J. Judycki, "Bending test of asphaltic mixtures under static loading," in *Fourth International RILEM Symposium Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control*, 1990, pp. 20–27.
- [18] J. Judycki, M. Pszczoła, and P. Jaskuła, "Modyfikacja metody zginania belek z mieszanek mineralno-asfaltowych i ocena ich parametrów reologicznych," in *VII Międzynarodowa Konferencja, Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe*, 2001, pp. 91–100.
- [19] PN-EN 12697-44 Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 44: Propagacja pęknięcia w badaniu zginania próbki półwałcowej.
- [20] M. Arabani and B. Ferdowsi, "Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures," *Int. J. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 47–58, 2009.
- [21] I. Artamendi and H. A. Khalid, "A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 7, no. Supplement 1, pp. 163–180, 2006.
- [22] B. Birgisson, A. Montepara, and E. Romeo, "Influence of Mixture Properties on Fracture Mechanisms in Asphalt Mixtures," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 11, no. Supplement 1, pp. 61–88, 2010.
- [23] M. Marasteanu, A. Zofka, M. Turos, X. Li, R. Velasquez, X. Li, W. G. Buttler, G. Paulino, A. Braham, E. V. Dave, J. Ojo, H. U. Bahia, R. Christopher, Williams, J. Bausano, A. Gallistel, and J. McGraw, "Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements," Minnesota, 2007.
- [24] R. Bonaquist, NCHRP Report 614: Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. 2008.
- [25] PN-EN 12697-35, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 35: Mieszanie laboratoryjne.
- [26] PN-EN 12697-30, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie.
- [27] PN-EN 12697-31, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 31: Próbki przygotowane w prasie żyrotorowej.
- [28] PN-EN 12697-33, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem walującym.
- [29] Jaczewski M., Mejlun Ł., *Wyznaczanie parametrów lepko-sprężystego modelu Burgersa mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pod obciążeniem dynamicznym*, *Drogownictwo* nr 11/2013, pp. 344-348.
- [30] Szydłowski C., Judycki J., *Badania odporności na pękanie mieszanek mineralno-asfaltowych na próbkach półwałcowych*, *Drogownictwo* nr 10/2015, pp. 348-353.

Niniejszy artykuł powstał na podstawie publikacji i posteru przedstawionego w dniu 26 maja 2016 roku na 12 Międzynarodowej Konferencji „Modern Building Materials, Structures and Techniques” która odbyła się w Wilnie, na Litwie.