

DARIUSZ SYBILSKI¹⁾

OCENA WŁAŚCIWOŚCI NISKOTEMPERATUROWYCH LEPISZCZY ASFALTOWYCH I MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych w niskiej temperaturze. Zastosowano nowoczesne, funkcjonalne metody pomiarowe lepiszczy (reometr zginanej belki BBR, rozciąganie bezpośrednie DTT) i mieszanek (odporność na pękanie niskotemperaturowe TSRST, zespolony moduł sztywności). Badania wykazały zalety elastomeroasfaltów w porównaniu z asfaltami zwykłymi oraz mieszanek mastyksu grysowego SMA w porównaniu z betonem asfaltowym. Opracowano zalecenia doboru lepiszczy do warunków klimatycznych na terenie Polski. Podano też wskazania dotyczące wyboru mieszanek mineralno-asfaltowych do warstw ścieralnych.

¹⁾ prof. dr hab. inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie

1. WPROWADZENIE

Projektowanie nawierzchni i dobór materiałów drogowych w polskich warunkach klimatycznych wymaga uwzględnienia dwóch skrajności klimatycznych: wysokiej i niskiej temperatury. Pękanie niskotemperaturowe nie było dotychczas często obserwowane na naszych drogach. Przykłady były zauważalne przede wszystkim w regionie północno-wschodnim, będącym polskim biegunem zimna. Podstawowym problemem ostatnich lat w Polsce były deformacje trwałe nawierzchni asfaltowych, wybudowanych w ubiegłych latach i nie dostosowanych do zwiększonego obciążenia ruchem drogowym, zwłaszcza przy jednoczesnym wzroście temperatury w ostatnich latach.

W celu przeciwdziałania powstawaniu deformacji nawierzchni asfaltowych opracowano w IBDiM metodę pomiarową i zalecenia doboru materiałów zwiększających odporność betonu asfaltowego na deformacje trwałe [1]. Zalecenia te i metodyka badawcza zostały zaakceptowane przez GDDP i szybko upowszechniły się, stając się standardem w specyfikacjach kontraktowych.

Równolegle wdrażano nową technologię mieszanki mastyksowo-grysowej SMA. Koncept tej mieszanki powstał w Niemczech w celu zwiększenia odporności na deformacje nawierzchni asfaltowej i upowszechnił się w świecie jako alternatywa betonu asfaltowego.

Wdrożenie betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na koleinowanie opóźniło niestety upowszechnienie stosowania mieszanki SMA. Nowe narzędzie w postaci metody badania pełzania, jako kryterium oceny właściwości mieszanki w wysokiej temperaturze, umożliwiło poprawę odporności na deformacje. Uzyskano to prostymi metodami w projektowaniu betonu asfaltowego: zmniejszenia zawartości asfaltu i zastosowaniu gruboziarnistych mieszanek. Nie towarzyszyła temu jednak ocena innych ważnych właściwości funkcjonalnych mieszanki: zmęczenia i odporności niskotemperaturowej. Brak było odpowiednich ku temu narzędzi. Efektem było zwiększenie sztywności betonu asfaltowego, przy osłabieniu odporności na pękanie, tak zmęczeniowe, jak i niskotemperaturowe.

W IBDiM wykonano w latach 2001-2003 na zlecenie GDDKiA (wcześniej GDDP) badania właściwości zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz niskotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek. W niniejszym opracowaniu podsumowano badania właściwości niskotemperaturowych wykonanych w ramach dwóch odrębnych projektów badawczych. Rezultatem tych badań są zalecenia doboru lepiszczy do warstw nawierzchni.

2. PROGRAM BADAŃ

Program badań obejmował:

- badania właściwości lepiszczy asfaltowych: oryginalnych, po starzeniu technologicznym RTFOT (ang. *Rotating Thin Film Oven Test* [2]) i eksploatacyjnym RTFOT+PAV (ang. *Pressure Aging Vessel* [3])
 - podstawowe: penetracja, temperatura mięknięcia, temperatura łamliwości,
 - funkcjonalne: odporność niskotemperaturowa w reometrze zginanej belki BBR (ang. *Bending Beam Rheometer* [4]),
- badania właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych
 - podstawowe: gęstość, zawartość wolnych przestrzeni, stabilność i odkształcenie Marshalla,
 - funkcjonalne: wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu TSRST (ang. *Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength* [5]), modułu zespolonego w funkcji temperatury i częstotliwości metodą ściskania-rozciągania.

W analizie uwzględniono trzy mieszanki mineralno-asfaltowe do warstwy ścieralnej: SMA8²⁾, BA16, BA20 oraz jedną mieszankę BA25 do podbudowy. W mieszankach zastosowano w różnym zakresie następujące lepiszcza: D50P, D70P, D50G, D50N, D50V, OLE30B, OLE80C.

Zestaw lepiszczy uwzględnionych w programie badań lepiszczy nieco różni się od zestawu lepiszczy w mieszankach, ponieważ badania były wykonane w dwóch różnych projektach i w różnym czasie. Lepiszczka użyte w obu programach pochodziły z tych samych dostaw od producentów, co zapewniło niezmienną właściwość.

Do wykonania mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano kruszywa:

- granitowe z kopalni Graniczna,
- bazaltowe z kopalni Wilków,
- mączkę wapienną z kopalni Kujawy.

3. PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI LEPISZCZY ASFALTOWYCH

W tabelicy 1 zestawiono podstawowe właściwości lepiszczy.

²⁾ przyjęto oznaczenie SMA8 według projektu normy europejskiej EN, zamiast obecnego SMA0/8

Tablica 1. Podstawowe właściwości lepiszczy
Table 1. Basic properties of binders

Właściwość	D70P	D50P	D50G	D50N	D50V	OLE 30B	OLE 80C
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	68	48	46	47	47	41	51
Temperatura mięknięcia, °C	51	56	5	55	52	64	76
Temperatura łamliwości, °C	-21	-17	-21	-17	-12	-19	-17
PI (Pen-PiK)	-0,19	0,10	-0,04	-0,17	-0,85	1,30	3,81
PP ($T_{PiK}-T_{Fraass}$), °C	72	73	77	72	64	83	93
Po RTFOT							
Zmiana masy po RTFOT	0,004	-0,002	0,022	-0,206	0,054	0,014	0,042
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	46	34	30	33	32	30	39
Temperatura mięknięcia, °C	56,5	62	61,5	61,5	57	67,5	75
Temperatura łamliwości, °C	-18	-14	-16	-15	-13	-21	-21
PI (Pen-PiK)	0,11	0,51	0,16	0,36	-0,58	1,20	2,98
PP ($T_{PiK}-T_{Fraass}$), °C	75	76	78	77	70	89	96
Spadek Pen25, %	32,4	29,2	34,8	29,8	31,9	26,8	23,5
Wzrost T_{PiK} , °C	5,5	6,0	5,7	6,5	5,0	3,5	-1,0
Po RTFOT+PAV							
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	27	21	18	19	17	22	22
Temperatura mięknięcia, °C	64	71	71	70	67	76	76
Temperatura łamliwości, °C	-14	-10	-9	-12	-6	-11	-16
PI (Pen-PiK)	0,39	1,04	0,75	0,70	0,03	1,86	1,86
PP ($T_{PiK}-T_{Fraass}$), °C	78	78	80	82	73	87	92
Spadek Pen25, %	41,3	38,2	40	42,4	46,9	26,7	43,6
Wzrost T_{PiK} , °C	7,5	9,0	9,5	8,5	10,0	8,5	1,0
Całkowity spadek Pen25, %	60,3	56,3	60,9	59,6	63,8	46,3	56,9
Całkowity wzrost T_{PiK} , °C	13,0	15,0	15,2	15,0	15,0	12,0	0,0

4. SKŁAD I PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

SMA8

Projekt mieszanki wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem na warstwę ścieralną dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Wykonano siedem wariantów mieszanki o tym samym składzie mineralnym i jednakowej zawartości lepiszcza (6,4 % m/m) z różnymi lepiszczami (tabl. 2).

Tablica 2. Podstawowe właściwości mieszanek SMA8
Table 2. Basic properties of SMA8 mixtures

	Gęstość ^{*)} , g/cm ³	Gęstość objętościowa ^{*)} , g/cm ³	Zawartość wolnych przestrzeni, % v/v	Stabilność, kN	Odkształcenie, mm
SMA8D70P	2,596	2,508	3,4	5,3	2,8
SMA8D50P	2,577	2,503	2,9	5,9	3,2
SMA8D50V	2,566	2,495	2,8	6,3	3,0
SMA8D50N	2,586	2,512	2,8	6,2	3,4
SMA8D50G	2,596	2,512	3,2	6,2	3,4
SMA8OLE30B	2,593	2,508	3,3	9,2	3,8
SMA8OLE80C	2,593	2,593	2,9	8,8	4,0
*) terminologia według zmian związanych z wdrożeniem nowych norm PN-EN					

BA16

Projekt mieszanki wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem na warstwę ścieralną dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Wykonano siedem wariantów mieszanki o tym samym składzie mineralnym i jednakowej zawartości lepiszcza (4,9 % m/m) z różnymi asfaltami (tabl. 3).

Tablica 3. Podstawowe właściwości mieszanek BA16
Table 3. Basic properties of BA16 mixtures

	Gęstość, g/cm ³	Gęstość objętościowa, g/cm ³	Zawartość wolnych przestrzeni, % v/v	Stabilność, kN	Odkształcenie, mm
BA16D70P	2,579	2,499	3,1	9,8	2,7
BA16D50P ^{*)}	2,581	2,506	2,9	11,3	2,8
BA16D50V	2,580	2,490	3,5	13,8	3,3
BA16D50N	2,590	2,512	3,0	12,2	2,9
BA16D50G	2,584	2,507	3,0	10,5	2,7
BA16OLE30B	2,574	2,485	3,5	12,5	2,9
BA16OLE80C	2,586	2,499	3,3	16,0	3,9
*) moduł sztywności pełzania statycznego tej mieszanki wyniósł 21,2 MPa					

BA20

Projekt mieszanki wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem na warstwę ścieralną dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Wykonano cztery warianty mieszanki o tym samym składzie mineralnym i jednakowej zawartości lepiszcza (4,8 % m/m) z różnymi asfaltami (tabl. 4).

Tablica 4. Podstawowe właściwości mieszanek BA20
Table 4. Basic properties of BA20 mixtures

	Gęstość, g/cm ³	Gęstość objętościowa, g/cm ³	Zawartość wolnych przestrzeni, % v/v	Stabilność, kN	Odkształcenie, mm
BA20D70P	2,566	2,485	3,1	10,0	3,0
BA20D50P ^{*)}	2,568	2,498	2,7	13,3	3,2
BA20D50RG	2,572	2,489	3,2	12,5	2,9
BA20OLE80C	2,562	2,481	3,2	14,8	3,6
*) moduł sztywności pełzania statycznego tej mieszanki wyniósł 21,2 MPa					

BA25

Projekt mieszanki wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem na warstwę podbudowy dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Wykonano trzy warianty mieszanki o tym samym składzie mineralnym i jednakowej zawartości lepiszcza (4,0 %m/m) z różnymi asfaltami (tabl. 5).

Tablica 5. Podstawowe właściwości mieszanek BA25
Table 5. Basic properties of BA25 mixtures

	Gęstość, g/cm ³	Gęstość objętościowa, g/cm ³	Zawartość wolnych przestrzeni, % v/v	Stabilność, kN	Odkształcenie, mm
BA25D50P	2,565	2,425	5,5	12,2	3,0
BA25D50V	2,563	2,449	4,4	11,3	2,5
BA25D50N	2,564	2,418	5,5	11,5	2,7

5. METODYKA BADAŃ FUNKCJONALNYCH

5.1. LEPISZCZA

Reometr zginanej belki BBR (ang. *Bending Beam Rheometer*)

Badanie BBR służy do oceny właściwości lepiszcza asfaltowego w niskiej temperaturze. Zostało ono opracowane w ramach programu SHRP w USA. Idea badania polega na pomiarze w niskiej temperaturze modułu sztywności belki wykonanej z lepiszcza asfaltowego. Schemat badania pokazano na rysunku 1, a wyznaczania parametrów mierzonych na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono reometr BBR w laboratorium IBDiM.

Reometrem BBR badane jest pełzanie przy zginaniu próbki lepiszcza pod stałym obciążeniem w niskiej temperaturze. Z badania otrzymuje się dwa parametry:

- moduł sztywności $S(t)$,
- parametr m , reprezentujący gradient zmiany sztywności w czasie obciążenia.

Wartości obu parametrów wyznacza się dla czasu obciążenia 60 s.

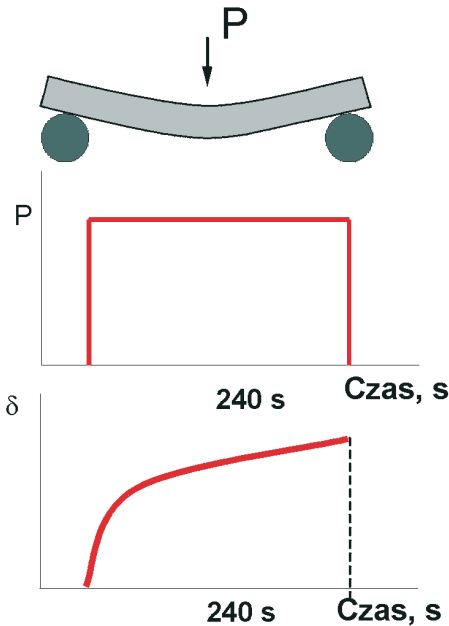
Moduł sztywności jest ilorazem maksimum naprężenia rozciągającego przy zginaniu w belce lepiszcza i maksimum odkształcenia w czasie t i obliczany jest ze wzoru:

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)}, \quad (1)$$

w którym:

- $S(t)$ – moduł sztywności pełzania w czasie t , MPa,
- P – przyłożona stała siła (0,981N), N,
- l – rozpiętość belki między punktami podparcia (102 mm), mm,
- b – szerokość belki (12,5 mm), mm,
- h – wysokość belki (6,25 mm), mm,
- $\delta(t)$ – ugięcie w czasie t , mm.

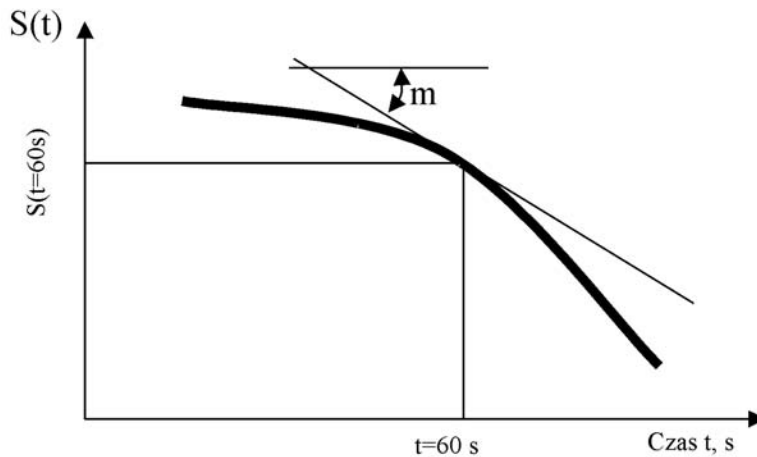
W ustalaniu rodzaju funkcjonalnego lepiszcza według Superpave wyznacza się temperaturę krytyczną, którą jest najniższą temperaturą, w której moduł sztywności $S = 300$ MPa (TES) lub parametr $m = 0,3$ (TE_m). Symbole TES i TE_m oznaczają odpowiednio temperaturę równoważną modułowi sztywności $S = 300$ MPa lub $m = 0,3$.



Rys.1. Schemat badania pełzania w reometrze BBR
Fig.1. Scheme of creep test in BBR rheometer

Badanie BBR uznaje się za dokładniejsze niż badanie temperatury łamliwości metodą Fraassa. Należy przewidywać, że metoda BBR już niedługo upowszechni się i

zastąpi badanie Fraassa. Niezawodność tej nowej metody pomiarowej zależy od wielu czynników, co ujęto m.in. w zaleceniach RILEM [6]. Jednym z ważnych aspektów badania jest procedura przygotowania i przechowywania próbek, uwzględniająca m.in. konieczność uniknięcia zjawiska fizycznego stwardnienia lepiscza (ang. *physical hardening*) [7, 8].



Rys.2. Schemat wyznaczenia wyników badania BBR
modułu sztywności S i parametru m

Fig. 2. Scheme of determination of BBR test results stiffness
modulus S and m parameter



Rys.3. Reometr BBR w laboratorium IBDiM
Fig.3. BBR rheometr at IBDiM laboratory

Odporność niskotemperaturowa TSRST

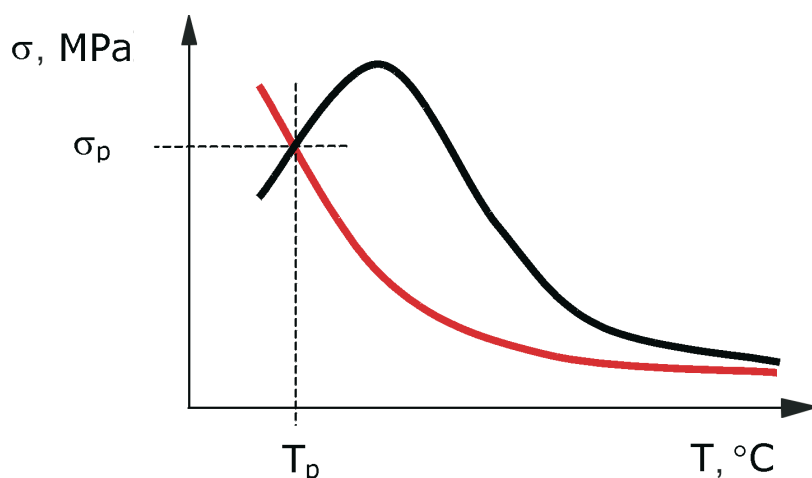
Koncepcja badania TSRST została opracowana przez Monismitha i in. [9], później zastosowana przez Fabba [10] i udoskonalona przez Aranda [11], który przeprowadził obszerne badania wpływu składu mieszanki mineralno-asfaltowej na jej odporność niskotemperaturową [12]. We współpracy z Arandem dokonano też po raz pierwszy oceny właściwości niskotemperaturowych asfaltów drogowych stosowanych w Polsce [13]. Metodyka ta została zaakceptowana w programie badawczym SHRP w USA.

Metodyka badania stosowana w IBDiM została opracowana na podstawie normy AASHTO TP 10-93. Badanie przeprowadzane jest na stanowisku pomiarowym MTS. Próbki do badań mają kształt prostopadłościenny o wymiarach $50 \times 50 \times 250$ mm. Do górnej i dolnej powierzchni czołowych próbki przyklejane są stalowe krążki, które umożliwiają zamocowanie próbki w ramie maszyny wytrzymałościowej. Do bocznych ścian próbki przyklejane są ekstensometry do pomiaru odkształceń wzdłużnych (rys. 4). Całość zamykana jest w komorze termicznej. Temperatura początkowa badania wynosi $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a następnie jest obniżana z prędkością $10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Sztywna rama maszyny wytrzymałościowej uniemożliwia odkształcenie (skurcz) próbki. Wskutek tego w próbce indukowane jest termiczne naprężenie rozciągające. Naprężenie to wzrasta aż do przekroczenia wytrzymałości próbki na pęknięcie, gdy następuje pęknięcie próbki (rys. 5).



Rys.4. Próbka przygotowana do badania niskotemperaturowego TSRST w maszynie wytrzymałościowej MTS w IBDiM

Fig.4. Sample prepared for low temperature test TSRST in testing stand MTS at IBDiM



Rys.5. Schemat przebiegu pęknięcia niskotemperaturowego nawierzchnia asfaltowej: czerwona linia - naprężenie rozciągające termiczne, czarna linia - wytrzymałość na rozciąganie mieszanki mineralno-asfaltowej, σ_p - naprężenie niszczące, T_p - temperatura niszcząca

Fig.5. Scheme of low temperature cracking of asphalt pavement: red line - thermal tensile stress, black line - asphalt mixture tensile strength, σ_p - fracture stress, T_p - fracture temperature

Podczas badania rejestrowana jest temperatura, siła rozciągająca oraz odkształcenie. Koniec badania następuje w momencie pęknięcia próbki. Wynikiem badania jest naprężenie przy zniszczeniu oraz temperatura pęknięcia.

Moduł zespolony E^*

Badanie jest przeprowadzane zgodnie z normą ASTM D 3497 79/95 [14], metodą ściskania-rozciągania osiowego (rys. 6). Wyznaczane są właściwości reologiczne mieszanki mineralno-asfaltowej w funkcji temperatury i częstotliwości obciążenia: zespolony moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego.

Obie te właściwości pozwalają na pełne scharakteryzowanie właściwości funkcjonalnych mieszanki. W zależności od zakresu temperatury i częstotliwości wyniki badania można wykorzystać do:

- oceny właściwości niskotemperaturowych,
- projektowania konstrukcji nawierzchni,
- oceny odporności na koleinowanie.

Zależność między naprężeniem a odkształceniem materiału liniowo lepkosprężystego poddanego obciążeniu sinusoidalnemu w czasie t , gdy przyłożonemu naprężeniu



Rys.6. Próbkę przygotowaną do badania modułu zespolonego E^* w maszynie wytrzymałościowej MTS w IBDiM

Fig.6. Sample prepared for complex stiffness modulus E^* test in testing stand MTS at IBDiM

$\sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ odpowiada odkształcenie $\varepsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \Phi)$, które jest przesunięte o kąt fazowy Φ wobec naprężenia, przedstawia schematycznie rysunek 7. Amplituda odkształcenia i kąta przesunięcia fazowego są funkcjami częstotliwości ω i temperatury badania Θ .

Moduł zespolony wyrażany jest równaniem³⁾:

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos \Phi + i \cdot \sin \Phi) \quad (2)$$

Moduł zespolony charakteryzowany jest dwoma składnikami - rzeczywistym E_1 oraz urojonym E_2 - wyrażanymi równaniami:

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos \Phi \quad (3)$$

$$E_2 = |E^*| \cdot \sin \Phi \quad (4)$$

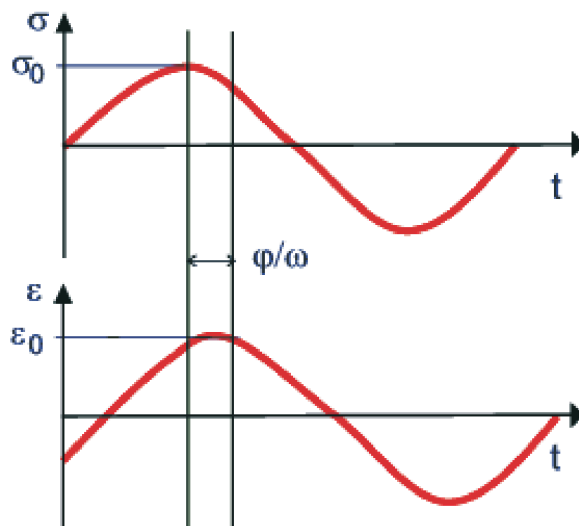
³⁾ symbole przyjęto według projektu normy europejskiej EN

Moduł zespolony i kąt przesunięcia fazowego mogą być też zapisane w postaci:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad , \quad (5)$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad . \quad (6)$$

W stosowanych obliczeniach, np. gdy zakłada się warunki liniowej sprężystości konstrukcji wielowarstwowej, wartość modułu E^* przyjmuje się równorzędnie z modułem sprężystości Younga. Materiały idealnie sprężyste osiągają kąt fazowy 0° , a moduł zespolony E^* osiąga wartość modułu Younga. W wypadku materiałów asfaltowych następuje to w niskiej temperaturze (poniżej -20°C). Moduł zespolony uzyskuje wówczas najwyższą możliwą wartość. Kąt fazowy materiałów lepkich wynosi 90° . Natomiast materiały lepkosprężyste, takie jak lepiszcza asfaltowe i mieszanki mineralno-asfaltowe w eksploatacyjnym zakresie temperatury, mają kąt fazowy od 0 do 90° .



Rys.7. Lepkosprężyste zachowanie mieszanki mineralno-asfaltowej – czas przesunięcia fazowego $t = \varphi/\omega$ pomiędzy naprężeniem σ (przyłożonym obciążeniem) a odkształceniem ε

Fig.7. Visco-elastic behaviour of asphalt mixture – time phase shift $t = \varphi/\omega$ between stress σ (load applied) and strain ε

W ramach przedstawianej pracy badania modułu i kąta przesunięcia fazowego wykonano w temperaturze -10, 0, 10, 20, 30 °C i w każdej temperaturze z częstotliwością obciążenia 0,1, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 i 40 Hz. W doborze tych warunków kierowano się zaleceniami RILEM [15].

W niniejszym opracowaniu wyniki badań modułu zespolonego i kąta fazowego analizowano jedynie pod kątem właściwości niskotemperaturowych. W tym celu wyniki badań modułu zespolonego przetworzono w celu uzyskania krzywej wiodącej, wykorzystując zasadę superpozycji czasowo-temperaturowej opracowanej przez Williamsa-Landela-Ferry'ego [16] z wykorzystaniem zasady Boltzmanna liniowej lepkościowości ośrodka, mówiącej, że kolejne obciążenia wywołują odkształcenie będące sumą odkształceń od poszczególnych obciążeń. Zasada ta nie może być stosowana, jeśli mamy do czynienia z odkształceniami trwałymi (plastycznymi).

Jeśli przyjąć, że lepszczą bitumiczne są materiałami termoplastycznymi, liniowo lepkościowymi, to wówczas ich zachowanie zależy od temperatury i czasu obciążenia, a czas i temperatura są wymienne: stan obciążenia w wysokiej temperaturze i w krótkim czasie obciążenia jest równoważny stanowi obciążenia w niskiej temperaturze i w długim czasie obciążenia. Właściwości takiego materiału wyznaczone w dowolnej temperaturze mogą być przetransponowane do innej temperatury, co na przykładzie modułu sztywności można zapisać:

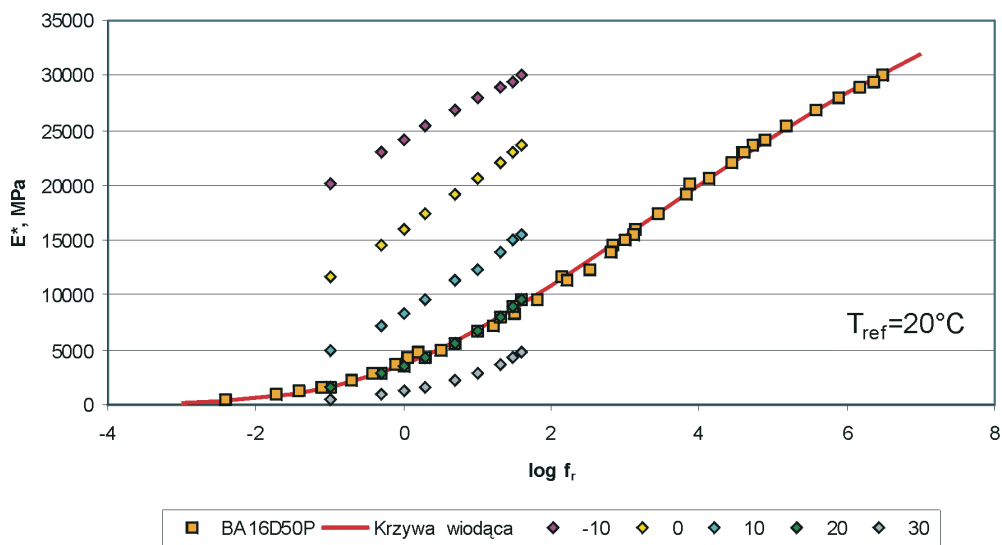
$$S(T, t) = S(T_0, t / a_T) \quad , \quad (7)$$

gdzie:

- $S(T, t)$ – moduł sztywności w temperaturze T i czasie obciążenia t ,
- $S(T_0, t / a_T)$ – moduł sztywności w temperaturze T_0 i zredukowanym czasie obciążenia t / a_T ,
- a_T – współczynnik przesunięcia temperaturowego.

Wykorzystując tę zasadę można tworzyć krzywą wiodącą (ang. *master curve*), charakteryzującą materiał w szerokim przedziale temperatury i częstotliwości. Podstawową zaletą tej metody jest możliwość wyznaczenia na podstawie krzywej wiodącej wartości modułu dla warunków obciążenia innych niż w wykonanych badaniach. Przeprowadzając zatem badania w ograniczonej liczbie wybranych warunków obciążenia, uzyskuje się możliwość interpolacji i ekstrapolacji wartości modułu w nieograniczonej liczbie warunków obciążenia.

Przykład ilustrujący tworzenie krzywej wiodącej przedstawiono na rysunku 8. Punkty pomiarowe uzyskane w poszczególnych temperaturach zostały przesunięte wzdłuż osi odciętych – częstotliwości, dzięki czemu uzyskano krzywą wiodącą w temperaturze referencyjnej – tu przyjęto 20 °C. W podanym przykładzie do wyznaczenia współczynników przesunięcia a_T wykorzystanych w równaniach przesunięcia:



Rys.8. Tworzenie krzywej wiodącej
Fig.8. Development of master curve

$$t_r = \frac{t}{a_T} \quad , \quad (8)$$

$$\log t_r = \log t - \log a_T \quad , \quad (9)$$

gdzie:

t_r – czas obciążenia w temperaturze odniesienia,

t – czas obciążenia,

a_T – współczynnik przesunięcia w funkcji temperatury,

T – temperatura,

posłużono się równaniem Arrheniusa:

$$\ln a_T = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \quad , \quad (10)$$

w którym:

δH – energia aktywacji charakterystyczna dla materiału, około 200 kJ/mol,

R – uniwersalna stała gazowa, 8,314 J/(mol·K),

T – temperatura, K,

T_s – temperatura odniesienia, K.

Równanie krzywej wiodącej wyznaczono w postaci krzywej esowej (sigmoidalnej) według ogólnego równania Witzaka i in. [17]:

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log t_r}} \quad (11)$$

lub

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log f_r}} \quad (12)$$

gdzie:

E^* – dynamiczny moduł sprężystości,

t_r – czas obciążenia w temperaturze odniesienia,

f_r – częstotliwość zredukowana,

δ – najmniejsza wartość modułu E^* ,

α – przedział zmienności modułu E^* ,

$\delta + \alpha$ – największa wartość modułu E^* ,

β, γ – parametry opisujące kształt krzywej sigmoidalnej (esowej).

Podobne równanie zaproponowali Medani, Huurman [18]. Model krzywej esowej (sigmoidalnej) opisującej każdą cechę mechaniczną lepkosprężystoplastyczną mieszanki w zależności od czasu i temperatury opisany jest następująco:

$$\log(\Psi_{mix}) = \log(\Psi_{min}) + [\log(\Psi_{max}) - \log(\Psi_{min})] \cdot S \quad (13)$$

$$S = 1 - \exp\left[-\left(\frac{10 + \log x_{fict}}{\beta}\right)^\gamma\right]$$

gdzie:

Ψ_{mix} – modelowana właściwość mieszanki, np. moduł sztywności, wytrzymałość na ściskanie,

Ψ_{\min} – najmniejsza wartość modelowanej właściwości mieszanki,

Ψ_{\max} – największa wartość modelowanej właściwości mieszanki,

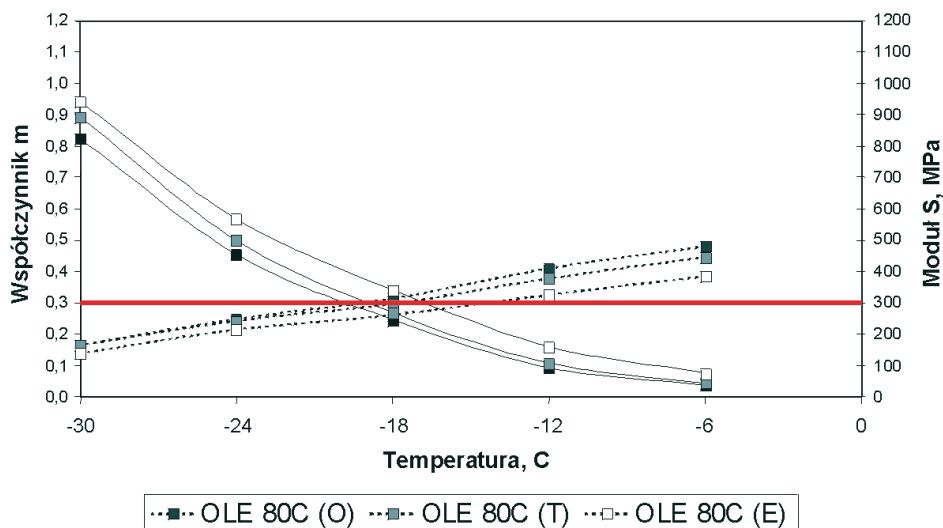
x_{fict} – zredukowana częstotliwość, naprężenie lub odkształcenie,

β, γ – parametry kształtu krzywej.

To równanie zastosowano do wyznaczenia równań krzywych wiodących poszczególnych mieszanek. Obliczenia przeprowadzono stosując podprogram Solver w Microsoft Office Excel.

6. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA

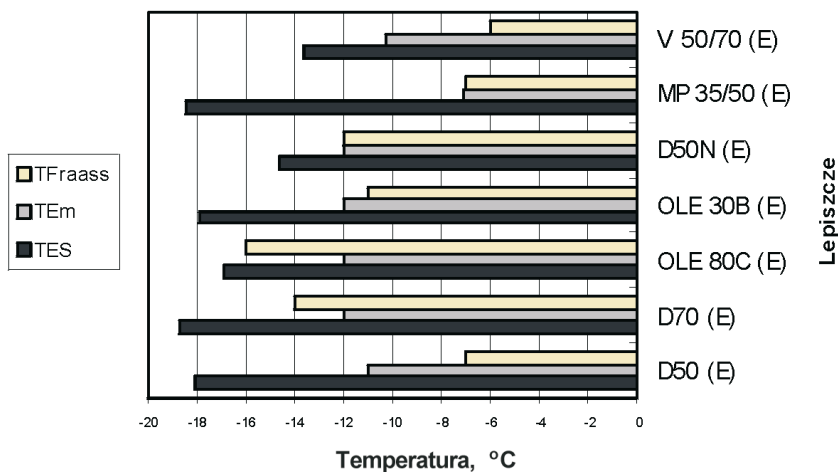
Przykład wyników badania BBR przedstawiono na rysunku 9, a porównanie wyników BBR z temperaturą łamliwości lepiszczy pokazano na rysunku 10. Pomiedzy temperaturą łamliwości a temperaturą równoważną TES lub TEM istnieje zależność (rys. 11). Wniosek ten jest zbliżony z wynikami uzyskanymi w innych laboratoriach, np. [19]. Temperatura łamliwości jest średnio o 4 °C wyższa od TES.



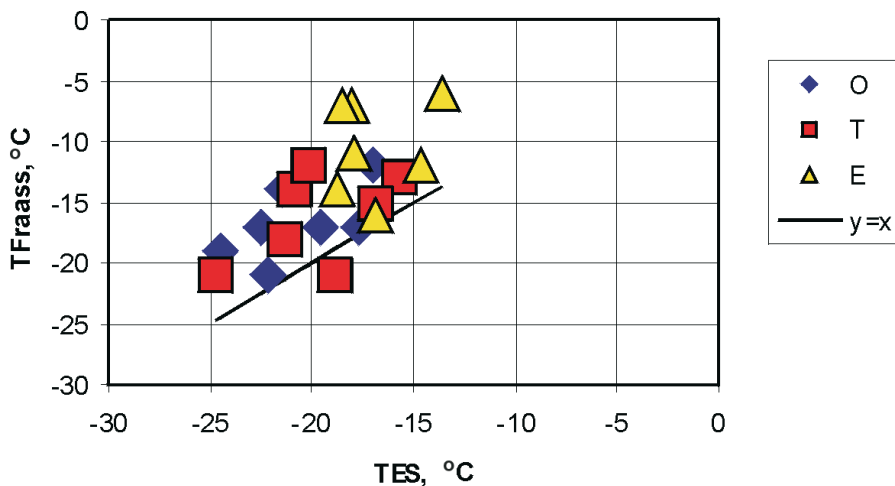
Rys.9. Wyniki BBR: zależność modułu S i współczynnika m od temperatury oraz wyznaczenie temperatury równoważnej TES(300) i TEM(0,3). O – lepiszcze oryginalne, T – lepiszcze po starzeniu RTFOT technologicznym, E – lepiszcze po starzeniu RTFOT+PAV eksploatacyjnym

Fig.9. BBR test results: relationship between the stiffness modulus S, m parameter and the temperature and determination of equivalent temperature TES(300) and TEM(0,3).

O – original binder, T – binder after RTFOT technological ageing, E – binder after RTFOT+PAV service ageing



Rys.10. Zestawienie temperatury równoważnej TES i TEm z BBR i temperatury łamliwości lepiszczy po starzeniu RTFOT+PAV eksploatacyjnym (E)
 Fig.10. Comparison of equivalent temperature TES and TEm from BBR and Fraass Breaking Point of binders after RTFOT+PAV service ageing (E)



Rys.11. Zależność temperatury łamliwości Fraassa i temperatury równoważnej modułu sztywności S=300 MPa TES BBR: O – lepiszcza oryginalne, T – po starzeniu RTFOT, E – po starzeniu RTFOT+PAV
 Fig.11. Relationship between Fraass Breaking Point and stiffness modulus S=300 MPa equivalent temperature TES BBR: O – original binder, T – after RTFOT ageing, E – after RTFOT+PAV ageing

W wypadku asfaltów zwykłych i plastomeroasfaltów ostrzejszym kryterium jest TES, natomiast w wypadku elastomeroasfaltów TEM.

Właściwości lepiszcza według badania BBR dają orientację o właściwościach mieszanki mineralno-asfaltowej, np. według badań [20] temperatura pęknięcia mieszanki mineralno-asfaltowej w badaniu TSRST jest niższa o około 5-10 °C od temperatury równoważnej modułowi $S = 300$ MPa (TES).

Tak temperatura łamliwości, jak i temperatura równoważna z badania BBR nie ujawniają wyraźnej różnicy między asfaltem zwykłym i elastomeroasfaltem, bowiem obie metody badania opierają się o tę samą zasadę: wyznaczana jest temperatura, gdy badany materiał osiągnie określony moduł sztywności: w badaniu Fraassa jest to 110 MPa [21], a w badaniu BBR 300 MPa. Różna jest jedynie metoda badania i jego dokładność.

Pełniejszą i bardziej wiarygodną charakterystykę właściwości niskotemperaturowych lepiszczy, zwłaszcza polimeroasfaltów można uzyskać z łącznych badań BBR i rozciągania DTT, np. [22 -24]. Postuluje się też stosowanie badania energii pęknięcia wzorowanego na badaniu metali [25, 26]. Jako parametr oceny odporności na pęknięcie niskotemperaturowe podaje się współczynnik energii pęknięcia, K_{IC} , który lepiej charakteryzuje lepiszcze niż parametry zaproponowane w SHRP Superpave [27].

Elastomeroasfalty wykazują właściwości niskotemperaturowe poprawione w stosunku do zwykłego asfaltu. Skuteczność poprawy zależy zarówno od asfaltu wyjściowego, jak ilości i rodzaju dodanego polimeru, np. dodatek 3 % SBS obniża temperaturę pęknięcia TSRST mieszanki mineralno-asfaltowej o 3-5 °C, natomiast dodatek 6 % o 9-11 °C. Ta różnica wynika z tego, że dodatek 6 % SBS jest już wystarczający do wytworzenia w asfalcie pełnej przestrzennej sieci elastomerowej, która staje się fazą ciągłą w lepiszczu. Zapoczątkowane w dowolnym punkcie mikro pęknięcie znacznie trudniej wówczas przekształca się w pełne, niszczące pęknięcie wskutek trudności ze sforsowaniem wiązań sieci elastomerowej [28]. Większa skuteczność modyfikacji elastomerem SBS wynika również z lepszego powinowactwa tego polimeru niż plastomerów z asfaltem. W temperaturze -20 °C obie fazy plastomeroasfaltu są w stanie szklistym, a wówczas następuje ich odspojenie. W elastomeroasfaltach dzięki lepszemu powinowactwu SBS z asfaltem zjawiska takiego nie zaobserwowano [29].

Wyniki badań TSRST zestawiono w tablicy 6 i zilustrowano rysunkami. Rysunek 12 przedstawia przykład przebiegu badania próbek mieszanki SMA8 z asfaltem D70P, rysunek 13 zbiorcze porównanie temperatury pęknięcia, a rysunek 14 naprężenia niszczącego w badaniu TSRST. Kolejne rysunki 15 i 16 przedstawiają zależności między temperaturą pęknięcia mieszanki lub naprężeniem niszczącym w badaniu TSRST a temperaturą łamliwości lub temperaturą TES BBR lepiszcza. Prezentowane na nich wartości temperatury pęknięcia TSRST są wartościami średnimi wszystkich badanych mieszanek.

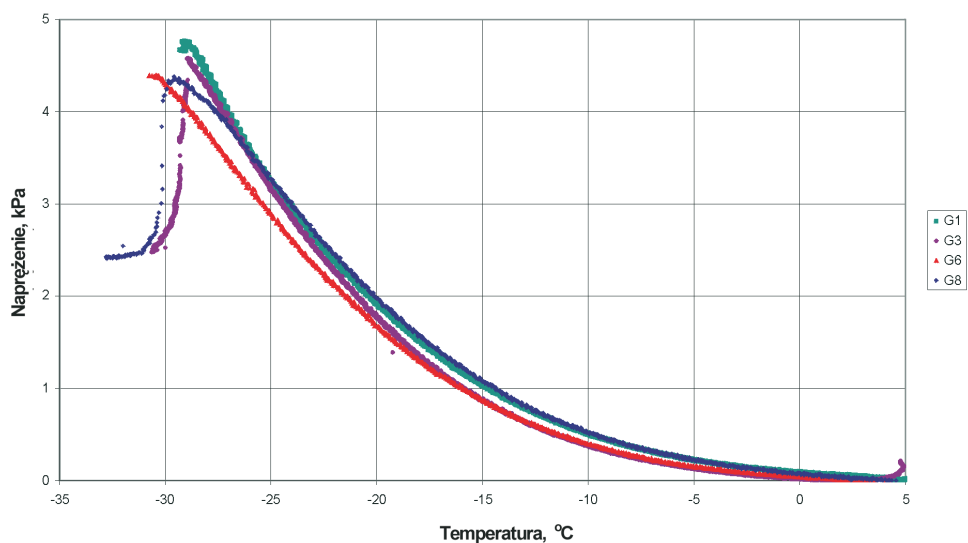
Badanie TSRST jest skomplikowane zarówno w przygotowaniu próbek, jak i w przeprowadzeniu pomiarów. Jednak przy poprawnym jego wykonaniu zapewnia uzyskanie dobrej powtarzalności wyników, co ilustrują tablica 6 i przedstawiony na rysunku 12 przykład.

Odchylenie standardowe temperatury pęknięcia wynosi od 0,4 do 2,3 °C. Przeciętnie jest to poziom błędu powtarzalności badania temperatury łamliwości lepiszcza. Należy zwrócić uwagę, że najlepszą dokładność pomiaru uzyskano w badaniu mieszanek SMA, a gorszą w wypadku betonu asfaltowego, przy tym im bardziej gruboziarnista mieszanka, tym mniejsza powtarzalność wyniku badania. Świadczy to o mniejszej jednorodności próbek, będącej następstwem segregacji wyprodukowanej mieszanki.

Tablica 6. Wyniki badania TSRST

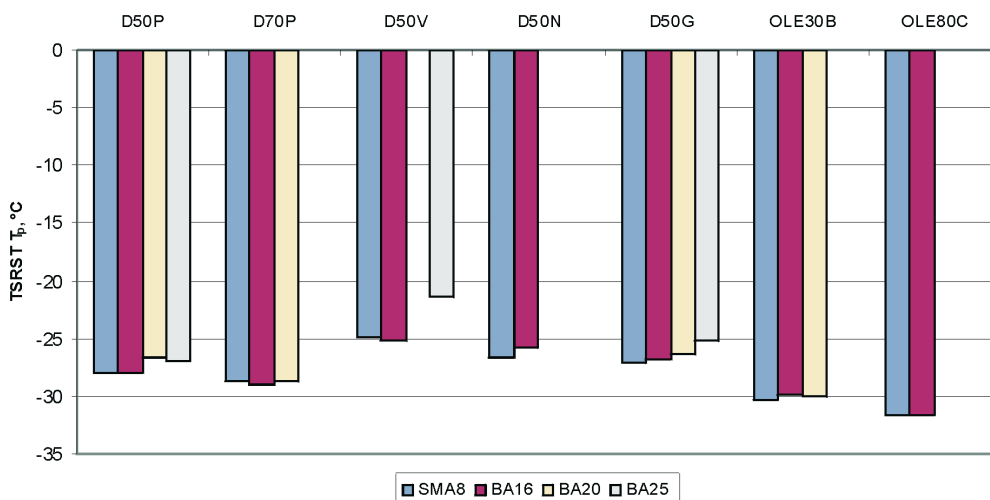
Table 6. TSRST test results

Mieszanka i lepiszcze	Temperatura pęknięcia, °C		Naprężenie niszczące, MPa	
	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe
SMA8D50P	-27,9	0,4	4558,9	162,5
SMA8D70P	-29,5	0,7	4532,9	184,8
SMA8D50V	-24,9	0,9	4108,0	341,8
SMA8D50N	-26,7	0,9	4434,6	114,2
SMA8D50G	-27,1	1,0	4334,0	382,0
SMA8OLE30B	-29,6	1,6	5012,5	326,2
SMA8OLE80C	-31,7	0,5	5683,9	632,7
BA16D50P	-27,9	0,8	4397,0	239,7
BA16D70P	-29,0	1,2	4770,2	285,9
BA16D50V	-25,2	1,0	4557,3	175,2
BA16D50N	-24,8	1,0	4411,4	592,2
BA16D50G	-27,3	1,8	4673,5	335,3
BA16OLE30B	-29,9	1,1	5509,4	131,9
BA16OLE80C	-31,6	2,2	6021,4	115,3
BA20D50P	-27,1	2,2	4300,8	117,1
BA20D70P	-28,6	1,3	4259,8	245,9
BA20D50G	-26,3	1,1	4456,0	248,7
BA20OLE30B	-30,5	2,3	4556,7	51,0
BA25D50P	-26,5	1,8	3790,1	421,9
BA25D50V	-21,3	1,0	3244,3	634,2
BA25D50N	-25,2	1,5	3656,5	285,9



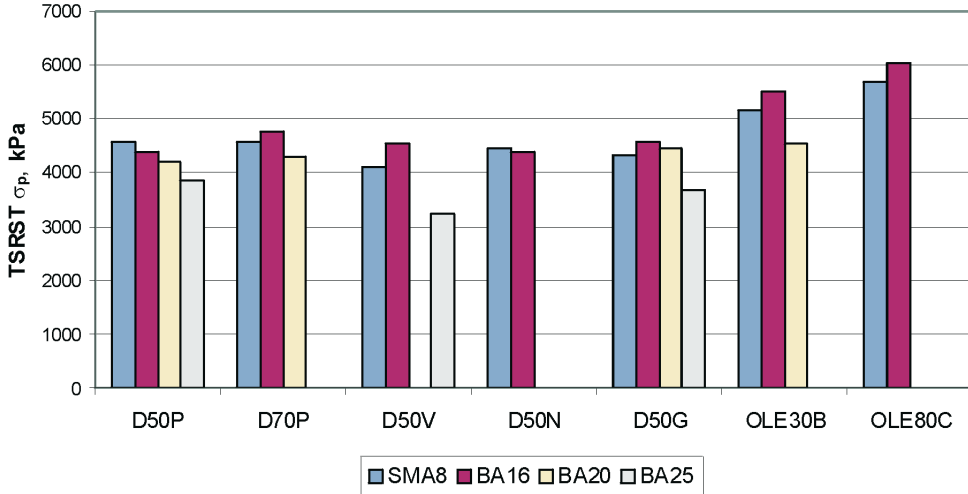
Rys.12. Wykres napężenia rozciągającego w funkcji temperatury w badaniu TSRST SMA8D50P

Fig.12. Relationship between the tensile stress and temperature in TSRST test, SMA8D50P



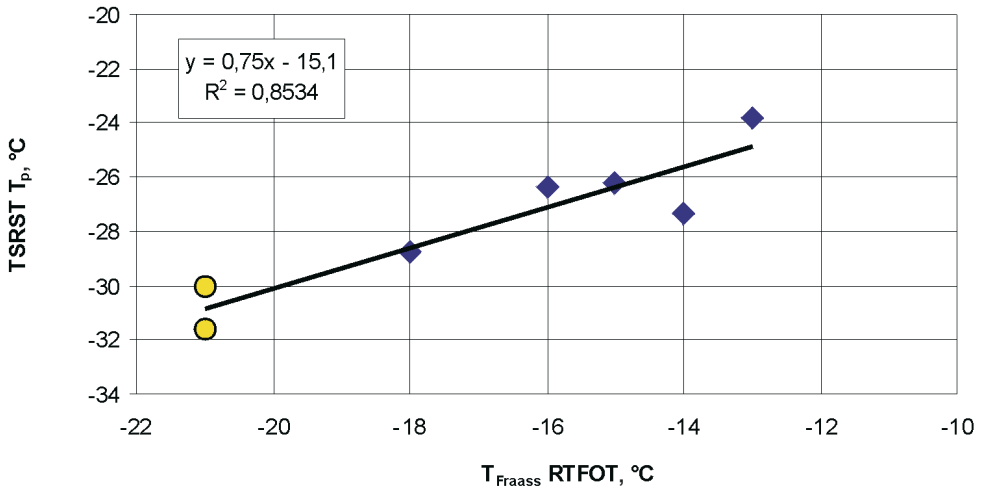
Rys.13. Temperatura pęknięcia w badaniu TSRST mieszank mineralno-asfaltowych z różnymi lepiszczami

Fig.13. Temperature of fracture in TSRST test of asphalt mixtures with various binders



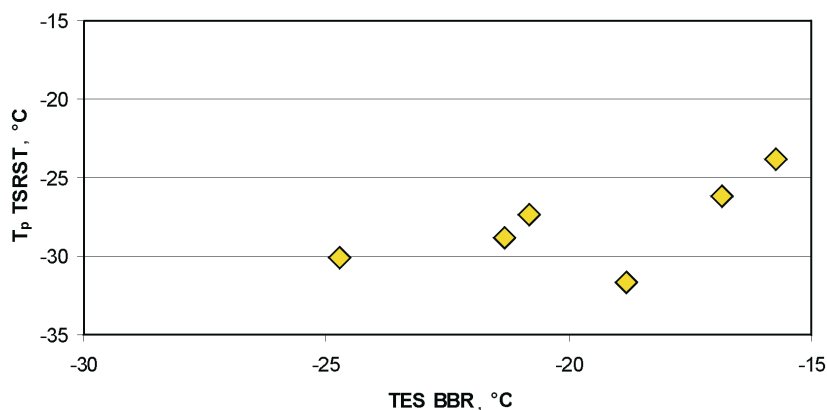
Rys.14. Naprężenie niszczące w badaniu TSRST mieszanek mineralno-asfaltowych z różnymi lepiszczami

Fig.14. Fracture stress in TSRST test of asphalt mixtures with various binders



Rys.15. Zależność temperatury pęknięcia mieszanki w badaniu TSRST i temperatury łamliwości Fraassa lepiszcza po starzeniu RTFOT

Fig.15. Temperature of fracture of asphalt mixture in TSRST test versus Fraass Breaking Point of binders after RTFOT ageing



Rys.16. Zależność temperatury pęknięcia mieszanki w badaniu TSRST i temperatury TES lepiszcza w badaniu BBR

Fig.16. Temperature of fracture of asphalt mixture in TSRST test versus TES binder temperature in BBR test

Niezależnie od typu mieszanki najniższą temperaturę pęknięcia i największe naprężenie niszczące uzyskano z elastomeroasfaltami. Lepsze parametry uzyskane z wyżej modyfikowanym OLE80C potwierdzają wpływ pełniejszego usieciowienia.

Wśród zwykłych asfaltów korzystnie wyróżniają się mieszanki z asfaltami D50P i D70P. Pozostałe wykazały gorsze właściwości niskotemperaturowe, a zwłaszcza asfalt D50V.

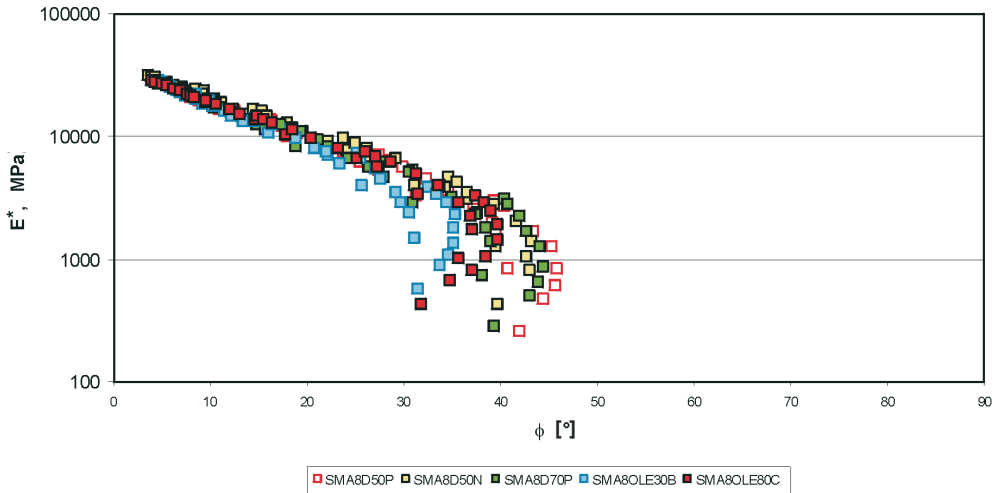
Typ mieszanki i jej skład ziarnowy w niewielkim stopniu wpływa na zmianę jej odporności niskotemperaturowej. Należy jednak zauważyć, że mieszanka SMA wykazuje nieco niższą temperaturę pęknięcia niż beton asfaltowy. Potwierdza to spostrzeżenie z badań Aranda [9], że większa zawartość asfaltu i grubsza jego błonka na kruszywie są pod tym względem korzystne. Potwierdziły to również badania mieszanek SMA i asfaltu lanego [30], w których wykazano, że grubsza błonka lepiszcza zapobiega jego starzeniu w nawierzchni, poprawiając dzięki temu odporność na pęknięcie niskotemperaturowe.

Uzyskano potwierdzenie dobrej zależności TSRST i temperatury łamliwości lepiszcza po RTFOT. Temperatura pęknięcia TSRST jest o około 10 °C niższa niż temperatura łamliwości po RTFOT.

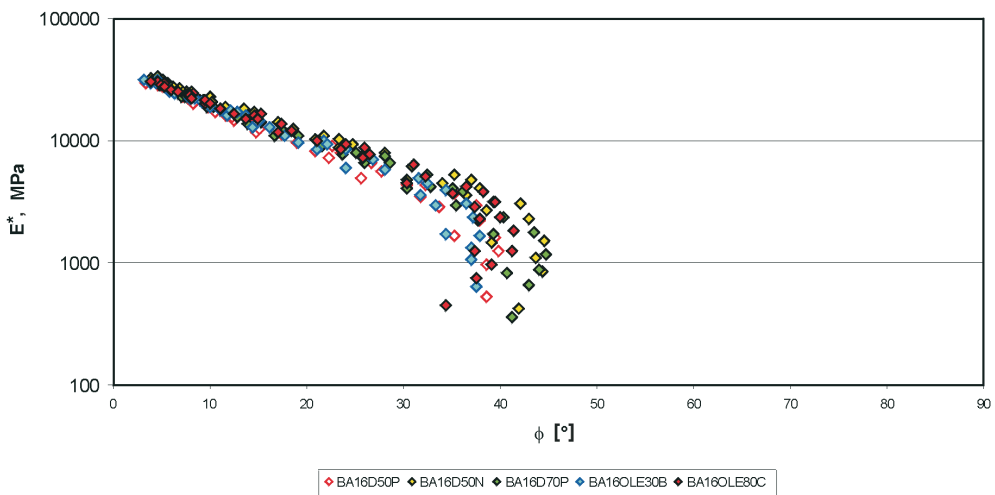
Temperatura pęknięcia TSRST mieszanek jest o około 5-8 °C niższa niż temperatura TES BBR. W zależności wyniku badania TSRST od temperatury TES BBR zwraca uwagę niezgodność w wypadku elastomeroasfaltu OLE80C – wynik TSRST jest wyraźnie lepszy niżby to wynikało z oceny na podstawie BBR. Stanowi to potwierdzenie konieczności poszukiwania wiarygodniejszej niż samo BBR metody badania

właściwości niskotemperaturowych lepiszcza, np. zastosowanie metody badania energii pękania (ang. *fracture toughness*).

Wyniki badań modułu zespolonego i kąta fazowego przedstawiono na rysunkach 17 i 18 w postaci krzywych Blacka, będących prezentacją zależności modułu od kąta.



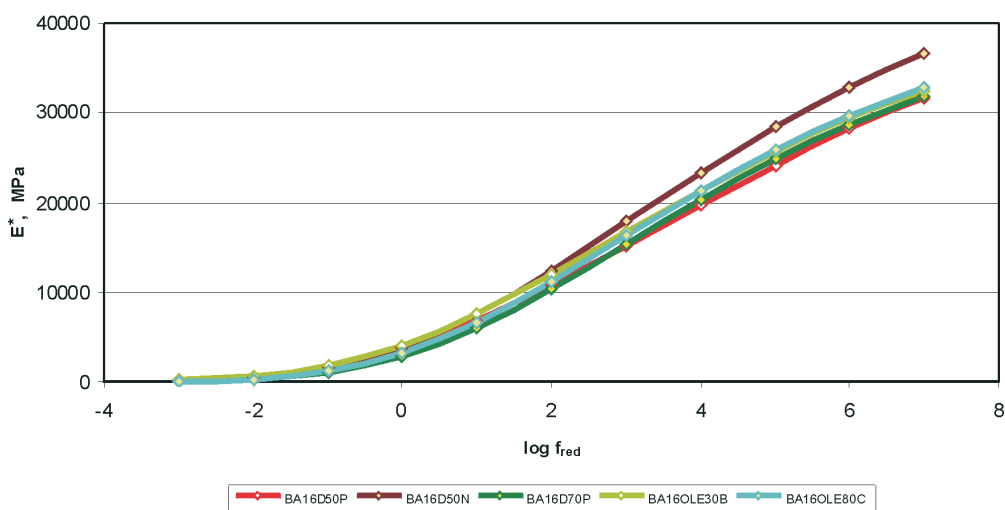
Rys.17. Wykresy Blacka mieszanek SMA8 z różnymi lepiszczami
Fig.17. Black diagram of SMA8 mixtures with various binders



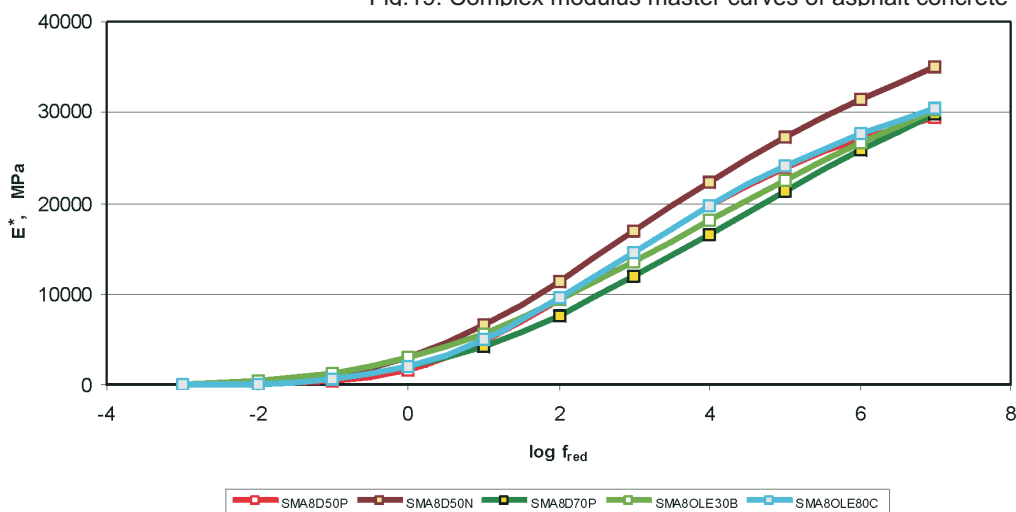
Rys.18. Wykresy Blacka mieszanek BA16 z różnymi lepiszczami
Fig.18. Black diagram of BA16 mixtures with various binders

W wykresach Blacka zwraca uwagę zbieżność krzywych w zakresie małego kąta fazowego, który odpowiada niskiej temperaturze – niezależnie od lepiszcza krzywe dążą do wartości ekstremalnej modułu zespolonego, zwanej modułem szklistości, przy której kąt fazowy przyjmuje wartość 0° . W badaniach międzylaboratoryjnych RILEM uzyskano na podstawie ekstrapolacji wyników badań wartość modułu szklistości mieszanki mineralno-asfaltowej około 30 GPa [31]. Podobne wartości uzyskano z analizy wyników badań [32].

Wykresy krzywych wiodących przedstawiono na rysunkach 19 i 20.



Rys.19. Krzywe wiodące modułu zespolonego betonu asfaltowego
Fig.19. Complex modulus master curves of asphalt concrete



Rys.20. Krzywe wiodące modułu zespolonego mieszanek SMA
Fig.20. Complex modulus master curves of SMA

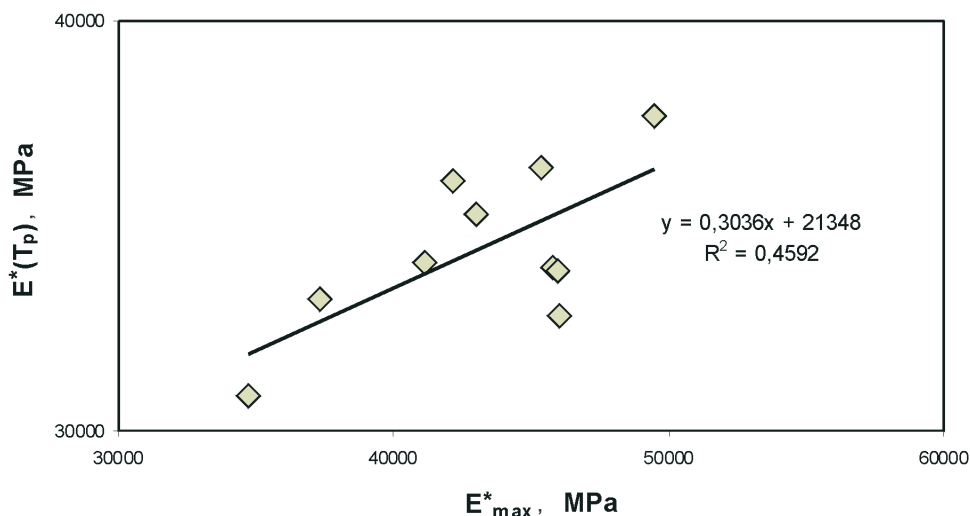
Dokładność równań regresyjnych krzywych wiodących jest wysoka, o czym świadczą wartości współczynnika determinacji R^2 . Należy zwrócić uwagę na wartości E_{\max}^* , które mieszczą się w granicach od 34 GPa do 50 GPa (tabl. 7). Jest to wyraźnie więcej niż wartość modułu szklistości obliczonego w RILEM.

Tablica 7. Parametry krzywych wiodących zespolonego modułu sztywności E^* mieszanek mineralno-asfaltowych
Table 7. Parameters of complex stiffness modulus E^* master curves of asphalt mixtures

Mieszanka	Współczynniki równania krzywej wiodącej				R^2	dH
	E_{\min}^*	E_{\max}^*	β	γ		
SMA8D50P	1,34E-82	34715	13,48	5,64	0,9966	222260
SMA8D50N	5,44E-29	45349	2,11	0,70	0,9979	216969
SMA8D70P	1,60E-19	46006	641,94	182,02	0,9988	245618
SMA8OLE30B	8,10E-14	45775	68,51	18,51	0,9987	249568
SMA8OLE80C	2,47E-52	37321	410,52	155,58	0,9983	235808
BA16D50P	9,12E-13	45974	108,74	29,65	0,9989	243723
BA16D50N	1,65E-19	49452	150,11	45,84	0,9986	223437
BA16D70P	4,73E-30	41131	273,14	91,81	0,9985	230040
BA16OLE30B	7,64E-18	42999	121,22	36,98	0,9993	246764
BA16OLE80C	8,62E-27	42184	45,04	14,92	0,9996	234335

Wykorzystując uzyskane równania krzywych wiodących, wyznaczono wartość modułu zespolonego w temperaturze pęknięcia ustalonej w badaniu TSRST. Arbitralnie przyjęto częstotliwość obciążenia 1 Hz. Wartości uzyskane wynoszą około 30 GPa. Ilustruje to rysunek 21.

Zależność przedstawiona na rysunku 21 wykazała słabą korelację o współczynniku determinacji $R^2=0,4592$, lecz współczynnik ten wzrasta do ponad 0,9, jeśli odrzucić punkty odchylone.



Rys.21. Porównanie wartości modułu zespolonego w temperaturze pęknięcia TSRST ($E^*(T_p)$) i maksymalnej z równania krzywej prowadzącej E^*_{max}

Fig.21. Comparison of complex modulus at fracture temperature TSRST ($E^*(T_p)$) and maximum complex modulus from master curve equation E^*_{max}

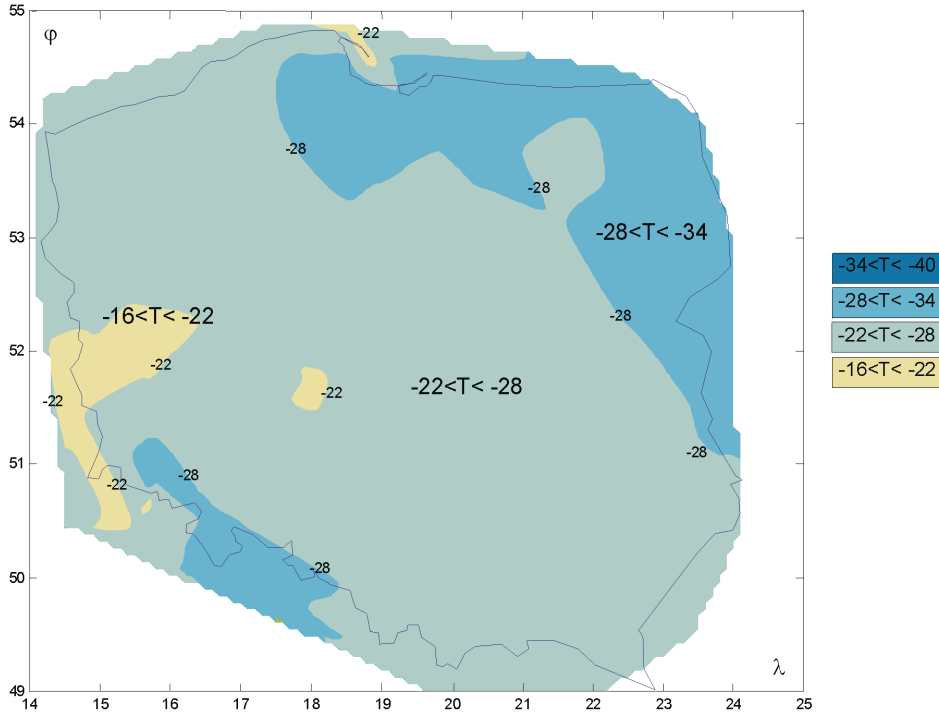
7. ZALECENIA DOBORU LEPISZCZA I MIESZANEK DO WARSTW ŚCIERALNYCH W POLSCE

Uzyskane wyniki potwierdzają zależności podawane w literaturze pomiędzy wynikami badania właściwości niskotemperaturowych lepiszczy metodą Fraassa i w reometrze zginanej belki BBR a mieszanki mineralno-asfaltowych metodą TSRST. Potwierdzenie znalazła również reguła, że właściwości niskotemperaturowe mieszanki i nawierzchni zależą przede wszystkim od lepiszcza. Skład mieszanki ma na nie znacznie mniejszy wpływ. Na tej podstawie ustalono, jakie lepiszcza należy stosować na terenie Polski, aby uzyskać nawierzchnie mało wrażliwe na pęknięcie niskotemperaturowe, a jednocześnie pamiętając o drugim ekstremum – konieczności zapewnienia odporności na koleinowanie.

Dobór lepiszcza asfaltowego w 90 % decyduje o właściwościach niskotemperaturowych nawierzchni, natomiast w około 40 % o odporności na koleinowanie [33]. Oznacza to, że opracowane na podstawie wiarygodnych danych zalecenia doboru lepiszczy ze względu na odporność na pęknięcie niskotemperaturowe pozwalają na rezygnację w projektowaniu mieszanki mineralno-asfaltowej z tego kosztownego badania. Pozostają do sprawdzenia warunki zmęczenia i koleinowania mieszanki.

We wcześniejszych pracach w IBDiM [34, 35] ustalono strefy klimatyczne Polskie pod względem wymagań dla lepiszcza asfaltowego. Dla warstwy ścieralnej przyjęto

jako głębokość reprezentatywną 20 mm. Na rysunku 22 przedstawiona jest minimalna temperatura w nawierzchni na tej głębokości.



Rys.22. Minimalna temperatura nawierzchni na głębokości 20 mm z podziałem wg Superpave
Fig.22. Minimum pavement temperature at 20 mm depth with division according to Superpave

Minimalna temperatura w warstwie ścieralnej na północno-wschodnim krańcu Polski oraz w górzystym regionie Sudetów spada do $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ (strefa wsA), a na pozostałym obszarze do $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (strefa wsB). Obszar o minimalnej temperaturze $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ został pominięty ze względu na małą powierzchnię.

Z przedstawionych tu wyników badań do wiarygodnej oceny odporności niskotemperaturowej mieszanki mineralno-asfaltowej należy przyjąć wyniki badania TSRST, które jest badaniem niszczącym. Wiarygodność tego badania została potwierdzona w licznych badaniach. W ramach projektu A-401 programu SHRP dokonano walidacji badania TSRST, opracowując zależność jego wyników w laboratorium do warunków rzeczywistych nawierzchni [36]. Na podstawie badań przeprowadzonych w Finlandii, USA i Kanadzie wyznaczono zależność pomiędzy temperaturą pęknięcia próbki w badaniu TSRST a temperaturą pęknięcia rzeczywistej

nawierzchni. Wyraża się ona równaniem:

$$T_p^{TSRST} = T_p^{NAW} + 4 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ,} \quad (14)$$

w którym:

T_p^{TSRST} – temperatura pęknięcia próbki w badaniu TSRST,

T_p^{NAW} – temperatura pęknięcia nawierzchni rzeczywistej.

Kierując się tymi wskazaniem, można określić, że mieszanka odpowiednia do warstwy ścieralnej nawierzchni w strefie wsA powinna mieć temperaturę pęknięcia w badaniu TSRST nie wyższą od $-30 \text{ } ^\circ\text{C}$, a w strefie wsB nie wyższą od $-24 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Porównując temperaturę pęknięcia TSRST badanych mieszanek z temperaturą maksymalną według zaleceń SHRP Superpave dla mieszanki mineralno-asfaltowej do warstwy ścieralnej, stwierdzono, że:

- kryterium dla strefy wsA (temperatura pęknięcia w TSRST nie więcej niż $-30 \text{ } ^\circ\text{C}$) spełniają mieszanki SMA i BA ze średnio- i wysokomodyfikowanymi elastome-roasfaltami,
- kryterium dla strefy wsB (temperatura pęknięcia w TSRST nie więcej niż $-24 \text{ } ^\circ\text{C}$) spełniają mieszanki SMA i BA z asfaltami zwykłymi D50 i D70 oraz z elastome-roasfaltami.

Jednocześnie należy dążyć do zwiększenia zawartości asfaltu w mieszance, zwłaszcza przeznaczonej do warstwy ścieralnej. Lepsze właściwości niskotemperaturowe wykazuje mastyks grysowy SMA niż beton asfaltowy. Zalecane są też mieszanki o drobniejszym uziarnieniu. Beton asfaltowy o grubszym uziarnieniu jest bardziej wrażliwy na segregację, która powoduje niejednorodność mieszanki i nawierzchni, co niekorzystnie wpływa na odporność niskotemperaturową, jak też wodo- i mrozoodporność.

Rozpatrując uzyskane wyniki w szerszym kontekście z uwzględnieniem innych rodzajów uszkodzenia nawierzchni:

- spękania zmęczeniowe generowane na powierzchni jezdni (podłużne) powodowane agresywnym obciążeniem pojazdów (*Super Singles*) wyposażonych w nowe opony szerokie promieniowe,
- deformacje trwałe,
- właściwości przeciwpoślizgowe,
- wodo- i mrozoodporność,

zaleca się w warstwie ścieralnej stosować mieszanki SMA lub MNU zawierające lepiszcza w zależności od obciążenia ruchem i strefy klimatycznej według tablicy 8.

Tablica 8. Zalecane lepiszcza asfaltowe do warstwy ścieralnej w zależności od strefy klimatycznej

Table 8. Bituminous binders recommended for wearing course with respect to climatic region

Lp	Strefa klimatyczna (według rys. 19)	Kategoria ruchu		
		KR1-2	KR3-4	KR5-6
1	wsA (spodziewana minimalna temperatura nawierzchni -34 °C)	DE80 A,B,C DE150 A,B,C ^{*)}	DE30 A,B,C DE80 A,B,C ^{*)}	DE30 A,B,C DE80 A,B,C ^{*)}
2	wsB (spodziewana minimalna temperatura nawierzchni -28 °C)	50/70 DE80 A,B,C DE150 A,B,C ^{*)}	50/70 DE30 A,B,C DE80 A,B,C ^{*)}	DE30 A,B,C DE80 A,B,C ^{*)}
*) w cienkiej warstwie				

8. PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania właściwości niskotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania wykonane były z zastosowaniem nowoczesnych, funkcjonalnych metod badań i obejmowały:

- moduł sztywności lepiszczy w niskiej temperaturze w reometrze zginanej belki BBR,
- właściwości niskotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych metodą TSRST,
- zespolonego modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych pod obciążeniem cyklicznym.

Na podstawie uzyskanych wyników opracowano zalecenia doboru lepiszczy do warstw asfaltowych z uwzględnieniem polskich warunków klimatycznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zasady projektowania betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe. Wytyczne oznaczania odkształcenia i modułu sztywności mieszanek mineralno-bitumicznych metodą pełzania pod obciążeniem statycznym, wyd. II uzupełnione, zeszyt 48, Informacje, Instrukcje, IBDiM, 1995
- [2] prEN 12607-1 (1999-version) Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air. Part 1: RTFOT method
- [3] AASHTO-PP1-97 Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)

-
- [4] Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). AASHTO Designation: TP1-98, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1999
- [5] AASHTO Provisional Standard TP10. Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength
- [6] *Sybilski D., Vanelstraete A., Partl M.*: Bending Beam and Dynamic Rheometer Measurements of Bituminous Binders. Recommendations, RILEM TC 182 PEB, Materials & Structures (przygotowane do druku)
- [7] *Bahia H.U.*: Low Temperature Physical Hardening of Asphalt Cements. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, USA, 1991
- [8] *Dongré R.*: Effect of physical hardening on stress relaxation behavior of asphalt binders. Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000
- [9] *Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E.*: Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete. Proc. AAPT 34, 1965
- [10] *Fabb T.T.J.*: The Influence of Mix Composition, Binder Properties and Cooling Rate on Asphalt Cracking at Low Temperature. Proc. AAPT. 43, 1974
- [11] *Arand W.*: Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Die Asphaltstrasse 3, 1983
- [12] *Arand W.*: Einfluss der Zusammensetzung von Walzasphalt auf das Verhalten bei Kälte. Strasse und Autobahn, 8, 1987
- [13] *Arand W., Sybilski D.*: Wpływ zastosowania polskich asfaltów drogowych na właściwości betonu asfaltowego w niskiej temperaturze. Prace IBDM, 3, 1992
- [14] ASTM D 3497 - 79 (Reapproved 1995) Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures
- [15] *Di Benedetto H., Partl M.N., Francken L. De La Roche Saint André C.*: RILEM TC 182-PEB. Stiffness testing of bituminous mixtures, Recommendations RILEM, Materials and Structures, **34**, March 2001
- [16] *Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D.*: The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass forming liquids. Journal of Amer. Chem. Soc., **77**, 1955
- [17] *Pellinen T.K., Witczak M.W.*: Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus. Proc. AAPT, **71**, 2002
- [18] *Medani T.O., Huurmann M., Molenaar A.A.A.*: On the Computation of Master Curves for Bituminous Mixes. Eurobitume & Eurasphalt Congress, Vienna 2004 (w druku)
- [19] *Brulé B., Largeaud S., Mazé M.*: Performance evaluation of polymer bitumens: new results and concrete proposals. RGRA, April 1998

- [20] *Lu X., Isaccson U.*: Effect of binder rheology on the low-temperature cracking of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, **2**, No. 1/2001
- [21] *Van der Poel C.*: A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data. *Journal of Applied Chemistry*, **4**, 221, 1954
- [22] *Kluttz, R.Q. and Dongré, R.*: Effect of SBS Polymer Modification on the Low Temperature Cracking of Asphalt Pavements. *Asphalt Science and Technology*, Arthur M. Usmani (ed.), Marcel Dekker Inc., New York 1997
- [23] *Lecomte M.J., Durand G., Robert M., Phillips M.C.*: Examination of the capability of Superpave tests to predict the low-temperature performance of polymer-modified binders. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona 2000
- [24] *Bouldin M.G., Dongré R.*: Implications of the new low temperature specifications on PG grading and testing of asphalt binders. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona 2000
- [25] *Hesp T.R., Terlouw T., Vonk W.C.*: Low-Temperature Performance of SBS-Modified Asphalt. *Proc. AAPT*, **69**, 2000
- [26] *Hoare T.R., Hesp S.A.M.*: Low-Temperature Fracture Test for Polymer-Modified Binders: Effect of Polymer Structure. Compatibility and Bitumen Source in Styrene-Butadiene Systems, *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona 2000
- [27] *Anderson D.A., Marasteanu M.O., Champion-Lapalu L., Le Hir Y., Didier M., Planche J.Pl.*: Low-temperature thermal cracking of asphalt binders as ranked by strength and fracture properties. *Eurasphalt&Eurobitume Congress*, Barcelona 2000
- [28] *Hesp S., Cai H., Thom D.*: Low-Temperature Performance Testing of Polymer-Modified Asphalt Concrete. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona 2000
- [29] *Champion-Lapalu L., Planche J.P., Martin D., Anderson D., Gerard J.F.*: Low-temperature and fracture properties of polymer-modified bitumens. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona 2000
- [30] *Partl M.N., Vinson T.S.*: Abkühlverhalten von Splittmastix und Gussasphalt. *Strasse und Verkehr*, **3**, 1998
- [31] *Partl M.N., Francken L.*: RILEM interlaboratory tests on stiffness modulus of bituminous mixtures. *Proc. of the 5th International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials, MTMB Lyon, 14-16 May 1997*, Edited: A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 1997
- [32] *Sybilski D.*: Wyznaczenie krzywej wiodącej mieszanki mineralno-asfaltowej. IV Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce, 5-6 maja 1998
- [33] *Sybilski D.*: Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce. *IBDiM, Studia i materiały*, zeszyt 50, Warszawa 2000

- [34] *Sybilski D. i in.*: Opracowanie zaleceń stosowania asfaltów drogowych z uwzględnieniem warunków klimatycznych i obciążenia ruchem. Sprawozdanie TN183, listopad 1999, praca na zlecenie GDDP
- [35] *Sybilski D., Mirski K.*: Dobór asfaltu do nawierzchni w polskich warunkach klimatycznych z uwzględnieniem procedur SHRP/Superpave. VI Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce, 9-10 maja 2000
- [36] *Kanerva H. K., Vinson T. S., Zeng H.*: Low-Temperature Cracking: Field Validation of the Thermal Stress Restrained Specimen Test. SHRP-A-401, Department of Civil Engineering Oregon State University, Washington, DC 1994

EVALUATION OF LOW TEMPERATURE PROPERTIES OF BITUMINOUS BINDERS AND ASPHALT MIXTURES

Abstract

Paper presents test results of low temperature properties of bituminous binders and asphalt mixtures. Advanced performance related test methods of binders (Bending Beam Rheometer BBR, Direct Tension Test DTT) and mixtures (Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength TSRST, complex stiffness modulus) were applied. Tests showed advantages of elastomer modified bitumens in comparison to plain bitumen as well as Stone Mastic Asphalt comparing to asphalt concrete. Recommendations for choice of binders were developed for Polish climatic conditions. Recommendations for choice of asphalt mixtures for wearing course were given as well.

PODZIĘKOWANIE

Autor pragnie wyrazić podziękowanie GDDKiA za finansowanie programów badawczych, w ramach których wykonane były opisane badania, oraz współpracownikom z Zakładu Technologii Nawierzchni IBDiM.