

dr inż. Roman Pacholak^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8136-1523

dr inż. Andrzej Plewa¹⁾

ORCID: 0000-0002-9470-9314

prof. dr hab. inż. Władysław Gardziejczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-9130-3773

Wpływ lepiszczy modyfikowanych na właściwości mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu w ujemnych temperaturach

The influence of modified binders on properties of low-noise asphalt mixtures in low-temperatures

DOI: 10.15199/33.2023.08.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu lepiszczy modyfikowanych na właściwości techniczne mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu w ujemnych temperaturach. Jako modyfikatory asfaltu 50/70 zastosowano kopolimer styrenowo-butadienowo-styrenowy (SBS), miął gumowy oraz kompozyt SBS-miał gumowy. Badania przeprowadzono na mieszankach mineralno-asfaltowych typu asfalt porowaty (PA8), mastyks grysowy SMA8, mastyks grysowy SMA8 LA oraz mastyks grysowy SMA8 LA z dodatkiem granulatu gumowego (10%, 20% i 30%). Wykazano, że badane modyfikatory znacznie rozszerzają dolną granicę zakresu lepkości asfaltu 50/70. Stwierdzono, że korzystniejszy wpływ na właściwości niskotemperaturowe mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu w ujemnych temperaturach, wg badania TSRST (*Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*), ma typ mieszanki niż rodzaj zastosowanego modyfikatora. Ustalono, że z punktu widzenia poprawy właściwości w ujemnych temperaturach najlepszym rozwiązaniem jest mieszanka typu SMA8 LA z zastosowaniem granulatu gumowego (10%) i asfaltu 50/70 modyfikowanego kompozytem SBS-miał gumowy.

Słowa kluczowe: nawierzchnie o obniżonym poziomie hałasu; asfalt modyfikowany; granulaty gumowe; właściwości niskotemperaturowe.

Abstract. This paper presents the analysis of the influence of modified binders on the technical properties of low-noise asphalt mixtures at negative temperatures. Styrene-butadiene-styrene (SBS) copolymer, crumb rubber (CR) and SBS-CR composite were used as modifiers for 50/70 bitumen. The research conducted on asphalt mixtures of porous asphalt (PA8), stone mastic asphalt SMA8, noise optimized stone mastic asphalt SMA8 LA and SMA8 LA with the addition of rubber granulate RG [10%, 20% and 30%]. It was shown that the tested modifiers significantly extend the lower bound of viscoelastic range of the 50/70 bitumen. The type of mixture had a greater effect on the low-temperature properties of low-noise asphalt mixtures in the TSRST (*Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*) test than the type of used modifier. The best solution, in terms of improving low-temperature properties, was found to be an SMA8 LA mixture using 10% of RG and 50/70 bitumen modified with SBS-CR composite.

Keywords: low-noise pavements; modified bitumen; rubber granulate; low-temperature performance.

Gwałtowne zwiększenie liczby pojazdów samochodowych, które odnotowano w XX wieku, wywołało znaczne zmiany poziomu hałasu od ruchu samochodowego w otoczeniu tras drogowych. Koszty związane z ograniczeniem szkodliwego wpływu hałasu na zdrowie ludzi i środowiska sięgają nawet 40 mld EUR rocznie [1]. Ekrany akustyczne są jednym z rozwiązań w walce z hałasem drogowym, ale ze względu na dosyć duże koszty ich budowy i utrzymania są realizowane prace badawcze dotyczące opracowania mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie

hałasu, które dzięki odpowiedniej strukturze zmniejszają hałas toczenia pojazdów samochodowych. Do tego typu mieszank należy zaliczyć: asfalt porowaty (PA), mieszankę do cienkich warstw z betonu asfaltowego (BBTM), mieszanki mastyksowo-grysowe zoptymalizowane pod względem hałaśliwości (SMA LA) [2]. Mieszanki o obniżonej hałaśliwości pozwalają efektywnie zredukować hałas powstający na styku opona/nawierzchnia nawet o 3 – 6 dB(A). Duża zawartość wolnych przestrzeni w tych mieszankach (10 – 20%) oraz warunki klimatyczne powodują, że są one szczególnie narażone na inicjację spękań niskotemperaturowych przez szybsze utwardzenie oksydacyjne (starzenie się) lepiszcza asfaltowego.

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*)} Adres do korespondencji: roman.pacholak@pb.edu.pl

Spośród czynników, wpływających na trwałość nawierzchni drogowej, wpływ temperatury jest jednym z najtrudniejszych do przewidywania i oceny [3]. Spękania niskotemperaturowe są istotnym rodzajem uszkodzeń dróg w warunkach klimatycznych Europy Środkowo-Wschodniej, w których temperatura w okresie zimowym może być niższa niż -30°C [4, 5]. Mieszanka mineralno-asfaltowa jest materiałem lepko-sprężystym, którego właściwości fizyczne i mechaniczne zależą w dużym stopniu od temperatury i sposobu oddziaływania obciążenia. Działanie niskiej temperatury lub nagłe schłodzenie powoduje inicjację naprężeń termicznych, tzw. skurczu niskotemperaturowego [6]. W chwili, gdy wywołane termicznie naprężenia osiągną wartość większą niż wytrzymałość mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie, ulega ona spękaniu. Podczas eksploatacji nawierzchni asfaltowych efekt wielokrotnych cykli zamrażania/rozmarzania prowadzi do ich degradacji [7]. Pomimo tego, że asfalt stanowi jedynie 5 – 10% składu mieszanki mineralno-asfaltowej, to przeprowadzone w Stanach Zjednoczonych badania SHRP wykazały, że jakość lepiszcza w 90% decyduje o odporności mieszanek na spękania w niskiej temperaturze. Właściwy dobór lepiszcza asfaltowego jest więc bardzo ważny.

Modyfikacja asfaltu miałem gumowym, wapnem hydratyzowanym, siarką lub polimerami poprawia odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na oddziaływania ujemnych temperatur [8 – 11]. Poprawę zachowania się nawierzchni w niskiej temperaturze uzyskuje się przez zastosowanie do modyfikacji asfaltu kopolimeru SBS oraz mialu gumowego, pochodzącego ze zużytych opon samochodowych, wprowadzonych do lepiszcza metodą „na mokro” [12 – 14].

W wielu światowych ośrodkach naukowych prowadzone są badania nad właściwościami reologicznymi lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych. Specyfikacje Superpave opracowane w USA, w celu zapobiegania spękanom niskotemperaturowym uwzględniają badania zginanej belki w reometrze BBR (*Bending Beam Rheometer*) oraz badania bezpośrednie na rozciąganie DTT (*Direct Tensile Test*) próbek lepiszczy asfaltowych. Jedną z najczęściej stosowanych metod wykorzystywanych do oceny właściwości „termosprężystych” mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych jest metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu TSRST (*Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*). W pracach [15 – 17] wykazano, że badanie TSRST można stosować do oceny podatności mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania niskotemperaturowe. Nie ma jednak oceny mieszanek mineralno-asfaltowych pod kątem interakcji między asfaltem a kruszywem, wpływu zawartości wolnych przestrzeni oraz ilości i typu lepiszczy.

Cel i zakres badań

Celem badań była analiza wpływu lepiszczy modyfikowanych kopolimerem SBS i miałem gumowym na właściwości w niskich temperaturach mieszanek mineralno-asfaltowych, o obniżonym poziomie hałasu typu PA8, SMA8, SMA8 LA

oraz SMA8 LA z dodatkiem granulatu gumowego. **Badania obejmowały ocenę:**

a) właściwości podstawowych lepko-sprężystych lepiszczy modyfikowanych (penetracja wg PN-EN 1426:2015-08, kohezja wg PN-EN 13589:2018-08, temperatura łamliwości w aparacie Fraassa wg PN-EN 12593:2015-08) oraz funkcjonalnych (odporność niskotemperaturowa zginanej belki w reometrze BBR wg PN-EN 14771:2012);

b) właściwości funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych (wytrzymałość na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu TSRST wg PN-EN 12697-46:2020-07).

Do badań wytypowano cztery lepiszcza: asfalt 50/70 (referencyjny); asfalt modyfikowany kopolimerem SBS w ilości 5% wag. (oznaczony jako S-5); asfalt modyfikowany miałem gumowym w ilości 10% wag. (G-10) oraz lepiszcze kompozytowe jednocześnie modyfikowane 2% wag. SBS i 10% wag. mialu gumowego (S-2+G-10). Szczegółowe informacje na temat wyników badań stanowiących podstawę wyboru lepiszczy modyfikowanych omówiono w pracach [18, 19]. Miał gumowy o frakcji 0/0,8 mm pochodzący z recyklingu opon samochodowych dodawano do asfaltu referencyjnego w technologii „na mokro”.

W artykule analizowano wyniki badań następujących mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu, zawierających kruszywo o maksymalnym uziarnieniu 8 mm: asfalt porowaty PA8; mieszanka mastyksowo-grysowa SMA8; mieszanka mastyksowo-grysowa o obniżonym poziomie hałasu SMA8 LA; mieszanka SMA8 LA z dodatkiem 10% granulatu gumowego (oznaczenie SMA8 LA [10% GG]); mieszanka SMA8 LA z dodatkiem 20% granulatu gumowego (SMA8 LA [20% GG]); mieszanka SMA8 LA z dodatkiem 30% granulatu gumowego (oznaczenie SMA8 LA [30% GG]). Granulat gumowy o uziarnieniu 1/4 mm dodawano do mieszanek SMA8 LA w technologii „na sucho” w ilościach 10, 20 i 30%, zastępując część kruszywa mineralnego w stosunku objętościowym. Szczegółowy opis zastosowanych materiałów oraz przygotowania próbek do badań podano w [18, 19]. Zawartość wolnych przestrzeni w zaprojektowanych mieszankach mineralno-asfaltowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zawartość wolnych przestrzeni w zaprojektowanych mieszankach mineralno-asfaltowych V_m [%]

Table 1. Air void content of designed asphalt mixtures V_m [%]

Rodzaj lepiszcza	Typ mieszanki					
	SMA8	PA8	SMA8 LA	SMA8 LA (10% GG)	SMA8 LA (20% GG)	SMA8 LA (30% GG)
50/70	2,89	23,80	10,56	11,64	11,99	15,00
S-5	2,63	23,59	10,62	11,39	12,14	14,82
G-10	3,22	23,97	10,88	11,96	12,37	15,76
S-2+G-10	3,05	23,84	11,04	11,72	12,63	15,29

Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 2 zestawiono wyniki badań podstawowych właściwości lepko-sprężystych lepiszczy modyfikowanych przed oraz po starzeniu technologicznym RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) wg PN-EN 12607-1:2014-12. Proces modyfikacji

Tabela 2. Podstawowe właściwości lepiszcza
Table 2. Basic properties of bitumen

Właściwość	Numer normy	Rodzaj lepiszcza			
		50/70/po RTFOT	S-5/po RTFOT	G-10/po RTFOT	S-2+G-10/po RTFOT
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	PN-EN 1426:2015-08	58,3/44,3	40,2/30,1	40,0/27,8	30,6/24,8
Temperatura łamliwości wg Fraassa [°C]	PN-EN 12593:2015-08	-14,8/ -12,9	-19,2/ -17,4	-16,1/ -15,4	-17,8/ -16,6
Kohezja w 5°C [J/cm ²]	PN-EN 13589:2018-08	5,6/6,2*	19,4/27,3	5,9/7,3*	13,6/17,2*

* próbki nie uzyskały wydłużenia 400 mm

asfaltu oraz szczegółowe wyniki właściwości lepko-sprężystych lepiszczy przedstawiono w [18, 19].

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 2 stwierdzono, że modyfikatory kopolimer SBS i miął gumowy działają usztywniająco na badany asfalt referencyjny 50/70. Świadczy o tym zdecydowanie mniejsza wartość penetracji w przypadku modyfikacji asfaltu kompozytem asfaltowym S-2+G-10 oraz miiałem gumowym G-10 (spadek o 48% i 31%). Zaobserwowano korzystny efekt wpływu dodatków modyfikujących na obniżenie temperatury łamliwości. Dodatek kopolimeru SBS w ilości 5% wag. oraz kompozytu (2% wag. SBS + 10% wag. MG) spowodowały obniżenie dolnej granicy lepko-sprężystości odpowiednio o 4,5 i 3,7°C (po RTFOT). Uzyskane wyniki kohezji, które pośrednio świadczą o trwałości zmęczeniowej warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej, dowodzą, że rodzaj modyfikatora ma wpływ na wartość kohezji [20]. Dodanie do asfaltu kopolimeru SBS powoduje zwiększenie kohezji w porównaniu z dodatkiem miiału gumowego. Największy przyrost kohezji uzyskało lepiszcze S-5 (+245%) w porównaniu z asfaltem 50/70, natomiast w przypadku zastosowania miiału gumowego G-10 zaobserwowano wzrost o ok. +5%. Korzystny przyrost kohezji (+143% w odniesieniu do asfaltu referencyjnego) wykazało lepiszcze polimero-gumowo-asfaltowe S-2+G-10.

Starzenie technologiczne RTFOT, ze względu na wzrost masy cząsteczkowej oraz kondensację węglowodorów aromatycznych, ma negatywny wpływ na analizowane lepiszcza, ponieważ zwiększa się ich sztywność [21]. Najbardziej odporne na proces starzenia jest lepiszcze kompozytowe (jednoczesny dodatek 2% wag. SBS i 10% wag. miiału gumowego). Efekt taki wyjaśnić można zwiększoną absorpcją lekkich składników asfaltów (węglowodorów aromatycznych) oraz uwalnianiem związków węglowych z miiału gumowego.

Badania odporności asfaltów modyfikowanych w niskich temperaturach wykonano w reometrze zginanej belki BBR w temperaturach: -16; -20; -25 i -30°C. Do próbek asfaltowych w postaci belek (125 × 12,5 × 6,25 mm) przykładano stałe obciążenie 100 g (980 ± 50 mN) oraz rejestrowano ugięcia w połowie rozpiętości δ(t) w czasie rzeczywistym. W badaniu odporności niskotemperaturowej wyznaczano sztywność pełzania S oraz parametr relaksacji m na podstawie wyników z trzech pomiarów w przypadku każdego rodzaju lepiszcza.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki badania sztywności pełzania S oraz parametru relaksacji m asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS i miiałem gumowym przed starzeniem oraz po starzeniu technologicznym RTFOT. Szczegółowe zestawienie wyników właściwości asfaltów modyfikowanych w niskich temperaturach zamieszczono w [19].

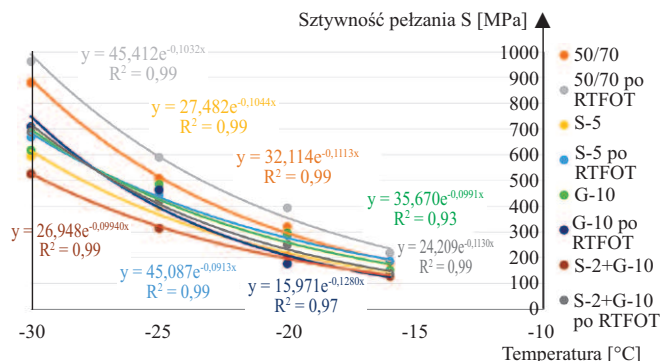

Rys. 1. Sztywność pełzania S lepiszczy w funkcji temperatury i rodzaju modyfikatora przed oraz po procesie starzenia technologicznego RTFOT [19]

Fig. 1. Stiffness modulus S of binders as a function of temperature and type of modifier before and after technological ageing process RTFOT [19]

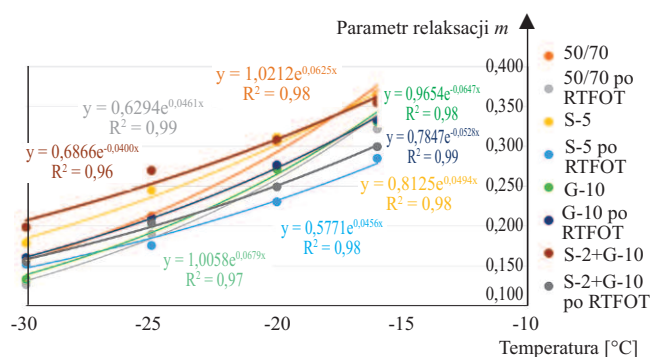

Rys. 2. Parametr relaksacji m lepiszczy w funkcji temperatury i rodzaju modyfikatora przed oraz po procesie starzenia technologicznego RTFOT [19]

Fig. 2. Creep ratio (m-value) of binders as a function of temperature and type of modifier before and after technological ageing process RTFOT [19]

W badaniu odporności na zmianę temperatury mniejsza wartość sztywności pełzania S świadczy o tym, że lepiszcze charakteryzuje się mniejszą sztywnością, natomiast wyższa wartość parametru m oznacza szybszą relaksację powstających naprężeń. Analiza wyników badań przedstawionych na rysunkach 1 i 2 potwierdza, że asfalty modyfikowane wykazują korzystniejsze właściwości przeciwspękania w porównaniu z asfaltem referencyjnym 50/70.

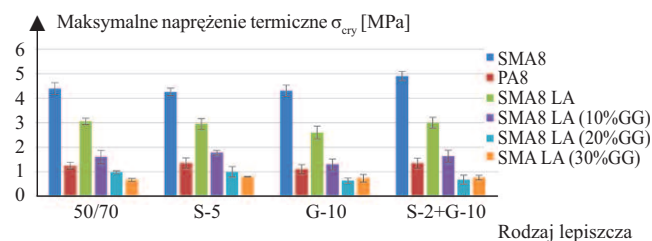
Analizując sztywność pełzania S (rysunek 1) w temperaturze -16°C, uzyskano jej wartości w granicach 130 – 180 MPa w przypadku każdego analizowanego lepiszcza. Obniżając temperaturę (do -30°C), uzyskano prawie dwukrotny wzrost rozrzutów sztywności S (500 – 900 MPa). W temperaturze -30°C lepiszcze polimero-gumowo-asfaltowe S-2+G-10 charakteryzuje się mniejszą o 40% sztywnością pełzania S (efekt korzystny) w porównaniu z asfaltem 50/70. Podobną zależ-

ność uzyskano w przypadku analizy parametru relaksacji m (rysunek 2). Wartość parametru m wszystkich analizowanych lepiszczy zmniejszała się wraz z obniżaniem temperatury badania, co wskazuje, że badane lepiszcza modyfikowane ulegały utwardzeniu w wyniku obniżania temperatury. W najniższej temperaturze -30°C lepiszcze kompozytowe S-2+G-10 uzyskało największą (najbardziej korzystną) wartość parametru relaksacji $m = 0,199$. Jest to wzrost o $+28\%$ w porównaniu z asfaltem referencyjnym 50/70. Zachowanie się lepiszcza polimerowo-gumowo-asfaltowego może wynikać z faktu, że duża sprężystość i elastyczność miały gumowego ułatwia deformację lepiszcza w niskiej temperaturze oraz pozwala na rozpraszanie energii wywołanej obciążeniem. W przypadku lepiszcza modyfikowanego kopolimerem SBS istniejąca trójwymiarowa sieć kopolimeru zwiększa elastyczność elastomeroasfaltu w niskiej temperaturze. Ilość kopolimeru SBS stosowaną do modyfikacji asfaltu można zmniejszyć, stosując modyfikację kompozytem S-2+G-10 i obniżając w ten sposób koszty produkcji.

Proces starzenia technologicznego RTFOT wpływa niekorzystnie na właściwości niskotemperaturowe lepiszczy modyfikowanych. Odnotowano zwiększenie wartości sztywności pełzania S oraz zmniejszenie parametru relaksacji m wszystkich analizowanych lepiszczy. Największe zmiany zachodzą w przypadku modyfikatorów S-5 i S-2+G-10, gdyż prawdopodobnie, podczas długotrwałego oddziaływania wysokiej temperatury, następuje w procesie starzenia rozpad wiązań butadienowych w sieci polimerowej.

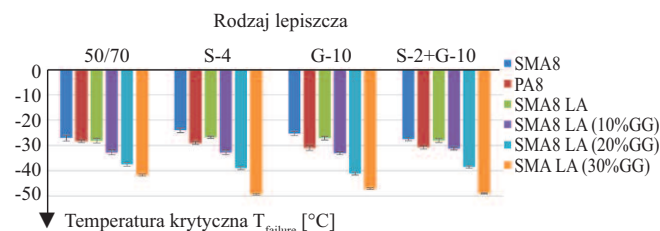
Ocenę właściwości w niskich temperaturach mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej hałaśliwości dokonano na podstawie wyników badania wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu TSRST. Próbkę w kształcie belek ($40 \times 40 \times 125 \text{ mm}$) „przyklejano” masą epoksydową do aluminiowych płyt bez możliwości skurczu termicznego. Początkowa temperatura badania wynosiła 20°C . Stopniowo schładzając próbki, ze stałą prędkością 10°C/h , inicjowano w mieszance naprężenia rozciągające. Po przekroczeniu wytrzymałości materiału na rozciąganie dochodziło do pęknięcia beleczek. W badaniu uzyskiwano parametry: maksymalne naprężenie termiczne σ_{cry} i temperaturę krytyczną T_{failure} .

Na rysunku 3 przedstawiono średnią wartość maksymalnego naprężenia termicznego σ_{cry} , a na rysunku 4 średnią wartość temperatury krytycznej T_{failure} w funkcji temperatury badanych mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu.



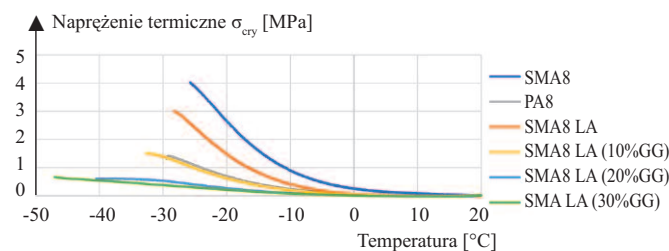
Rys. 3. Maksymalne naprężenie termiczne σ_{cry} mieszanek mineralno-asfaltowych w funkcji rodzaju lepiszcza [19]
Fig. 3. Maximum thermal stress σ_{cry} of asphalt mixtures as a function of type of binder [19]

Na podstawie przedstawionych wyników ustalono, że większy wpływ na właściwości niskotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych ma typ mieszanki niż rodzaj zastosowanego lepiszcza asfaltowego. Oznacza to, że istotny wpływ na odporność mieszanek w niskich temperaturach ma zawartość wolnych przestrzeni – inna w każdym typie mieszanki. W większości przypadków modyfikatory zwiększają wartość naprężeń termicznych w mieszankach. Odmienne wyniki uzyskano w mieszankach z zastosowaniem lepiszcza gumowo-asfaltowego G-10. Miał gumowy pozwala kompensować naprężenia wywołane skurczem termicznym. Stwierdzono również pozytywny wpływ modyfikatorów na zmianę temperatury krytycznej (rysunek 4).



Rys. 4. Maksymalna temperatura krytyczna T_{failure} mieszanek mineralno-asfaltowych w zależności od rodzaju lepiszcza [19]
Fig. 4. Maximum fracture temperature T_{failure} of asphalt mixtures as a function of type of binder [19]

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowo zależność naprężenia termicznego w funkcji temperatury w przypadku mieszanek z lepiszczem gumowo-asfaltowym G-10. Szczegółowe zestawienie właściwości asfaltów modyfikowanych zamieszczono w [19].



Rys. 5. Średnie wartości naprężeń termicznych mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem gumowo-asfaltowym G-10 w funkcji temperatury [19]
Fig. 5. Average thermal stress values of asphalt mixtures with rubber-asphalt binder G-10 as a function of temperature [19]

Wykres zależności średnich wartości naprężeń termicznych w funkcji temperatury wskazuje, że dodatek granulatu gumowego do mieszanek mineralno-asfaltowych pozwala w sposób istotny zmniejszyć naprężenia powstające przy obniżeniu temperatury. Mieszanki typu SMA8 i SMA8 LA charakteryzują się „typowym” przebiegiem krzywej naprężeń (stopniowy wzrost naprężeń do osiągnięcia temperatury przejścia, po przekroczeniu której kształt krzywej przyjmuje przebieg zbliżony do prostoliniowego). W mieszankach SMA8 LA z granulatem gumowym zaobserwowano spłaszczenie wykresu krzywej naprężenia. Granulat gumowy powoduje zmniejszenie wartości modułów sztywności mieszanek, a tym samym wpływa pozytywnie na temperaturę krytyczną T_{failure} . W mieszankach SMA8 LA (30% GG) z lepiszczem polime-

rowym S-5 temperatura krytyczna oscyluje na granicy $-49,4^{\circ}\text{C}$. Jest to o $22,6^{\circ}\text{C}$ mniej w porównaniu z mieszanką SMA8 LA z tym samym lepiszczem (spadek temperatury o 84%).

Podsumowanie

Wyniki badań i analizy właściwości funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu w ujemnej temperaturze z zastosowaniem lepiszczy modyfikowanych kopolimerem SBS, miałem gumowym i kompozytem SBS-miał gumowy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1) dodatek kopolimeru SBS i mialu gumowego (oraz ich jednoczesne zastosowanie) wpływa usztywniająco na badany asfalt 50/70, o czym świadczą zdecydowanie mniejsze wartości penetracji;

2) dodatki modyfikujące w postaci SBS i mialu gumowego powodują obniżenie dolnej granicy zakresu lepkości asfaltu 50/70, na co wskazuje zmiana temperatury łamliwości wg Fraassa;

3) największy wpływ na wartość kohezji lepiszcza ma zastosowanie kopolimeru SBS w ilości 5% wag.; miał gumowy poprawia wartość kohezji w granicach 5%, co świadczy o jego większej niejednorodności;

4) kopolimer SBS i miał gumowy wpływają na rozszerzenie zakresu lepkości w ujemnych temperaturach; najbardziej korzystne wyniki uzyskało lepiszcze kompozytowe (jednoczesna modyfikacja asfaltu 2% wag. SBS i 10% wag. mialu gumowego);

5) najlepszymi właściwościami w niskich temperaturach w badaniu TSRST charakteryzują się mieszanki mineralno-asfaltowe z zastosowaniem 10% wag. granulatu gumowego i z lepiszczem polimerowo-gumowo-asfaltowym (2% wag. SBS + 10% wag. mialu gumowego);

6) największy wpływ na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu w niskiej temperaturze ma typ mieszanki. Można wnioskować, że istotny wpływ na odporność mieszanek w niskiej temperaturze ma zawartość wolnych przestrzeni – inna w każdym typie mieszanki.

Literatura

- [1] Kleizienė R, Šernas O, Vaitkus A, Simanavičienė R. Asphalt Pavement Acoustic Performance Model. Sustainability. 2019; <https://doi.org/10.3390/su11102938>.
- [2] Gardziejczyk, W. Hałaśliwość nawierzchni drogowych. 2018; Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.
- [3] Gajewski M, Langlois PA. Prediction of Asphalt Concrete Low-Temperature Cracking Resistance on the Basis of Different Constitutive Models. Procedia Eng. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.016>.
- [4] Velasquez R, Labuz J, Marasteanu M, Zofka A. Revising Thermal Stresses in the TSRST for Low-Temperature Cracking Prediction. J. Mater. Civ. Eng. 2009; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:11\(680\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:11(680)).
- [5] Radziszewski P, Piłat J, Plewa A. Wykorzystanie Miejscowych Kruszyw Naturalnych z Regionu Polski Północno-Wschodniej Do Budowy Nawierzchni Asfaltowych. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Kielce-Krynica, 19-24 września 2010: problemy naukowo-badawcze budownictwa. Wydaw. Politech. Świętokrzyskiej. 2010.

[6] Wu S, He R, Chen H, Luo Y. Low Temperature Characteristics of Asphalt Mixture Based on the Semi-Circular Bend and Thermal Stress Restrained Specimen Test in Alpine Cold Regions. Constr. Build. Mater. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125300>.

[7] Pszczola M, Jaczewski M, Szydłowski C. Assessment of Thermal Stresses in Asphalt Mixtures at Low Temperatures Using the Tensile Creep Test and the Bending Beam Creep Test. Appl. Sci. 2019; <https://doi.org/10.3390/app9050846>.

[8] Błażejowski K, Wójcik-Wiśniewska M. Odporność na zmęczenie i pękanie mieszanek mineralno-asfaltowych z różnymi asfaltami. IV Śląskie Forum Drogownictwa 13.04.2016 r.

[9] Lin P, Huang W, Tang N, Xiao F, Li Y. Understanding the Low Temperature Properties of Terminal Blend Hybrid Asphalt through Chemical and Thermal Analysis Methods. Constr. Build. Mater. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.060>.

[10] Pszczola M, Judycki J. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers Incomparison with TSRST Test Results. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Springer. 2012; https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_5.

[11] Chen Y, Xu S, Tebaldi G, Romeo E. Role of Mineral Filler in Asphalt Mixture. Road Mater. Pavement Des. 2022; <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826351>.

[12] Qian C, Fan W, Yang G, Han L, Xing B, Lv X. Influence of Crumb Rubber Particle Size and SBS Structure on Properties of CR/SBS Composite Modified Asphalt. Constr. Build. Mater. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117517>.

[13] Wang T, Wei X, Zhang D, Shi H, Cheng Z. Evaluation for Low Temperature Performance of SBS Modified Asphalt by Dynamic Shear Rheometer Method. Buildings. 2021; <https://doi.org/10.3390/buildings111090408>.

[14] Zhou J, Chen X, Xu G, Fu Q. Evaluation of Low Temperature Performance for SBS/CR Compound Modified Asphalt Binders Based on Fractional Viscoelastic Model. Constr. Build. Mater. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.064>.

[15] Pszczola M, Szydłowski C, Jaczewski M. Influence of Cooling Rate and Additives on Low-Temperature Properties of Asphalt Mixtures in the TSRST. Constr. Build. Mater. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.148>.

[16] Zaumanis M, Valters A. Comparison of Two Low-Temperature Cracking Tests for Use in Performance-Based Asphalt Mixture Design. Int. J. Pavement Eng. 2020; <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1549323>.

[17] Yang T, Jia Y, Pan Y, Zhao Y. Evaluation of the Low-Temperature Cracking Performance of Recycled Asphalt Mixture: A Development of Equivalent Fracture Temperature. Buildings 2022; <https://doi.org/10.3390/buildings12091366>.

[18] Gardziejczyk W, Plewa A, Pacholak R. Effect of Addition of Rubber Granulate and Type of Modified Binder on the Viscoelastic Properties of Stone Mastic Asphalt Reducing Tire/Road Noise (SMA LA). Materials. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13163446>.

[19] Pacholak R. Praca doktorska: Wpływ właściwości lepko-sprężystych asfaltów modyfikowanych na wybrane cechy techniczne mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej hałaśliwości (niepublikowana na prawach rękopisu). Politechnika Białostocka. 2022.

[20] Błażejowski K, Wójcik-Wiśniewska M, Baranowska W, Ostrowski P. Poradnik asfaltowy. 2014. ORLEN Asphalt, Płock.

[21] Iwański M, Cholewińska M, Mazurek G. Właściwości asfaltu z dodatkami modyfikującymi po procesie starzenia krótkoterminowego. Budownictwo i Architektura. 2014; 13 (1): 15 – 27.

Informacja o finansowaniu badań: Badania sfinansowano w ramach pracy własnej indywidualnej nr WI/WB-IIL/10/2020 oraz pracy badawczej nr WZ/WB-IIL/7/2023 realizowanych w Politechnice Białostockiej z dotacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Przyjęto do druku: 19.07.2023 r.