

**BARTOSZ BUDZIŃSKI¹⁾**

ORCID: 0000-0001-6716-4454

MARIA RATAJCZAK²⁾

ORCID: 0000-0003-0575-4963

EVALUATION OF THE RESISTANCE OF MODIFIED BITUMEN TO LOW-TEMPERATURE CRACKING BASED ON THE COLLOIDAL INDEX

OCENA ODPORNOŚCI ASFALTU MODYFIKOWANEGO NA SPĘKANIA NISKOTEMPERATUROWE NA PODSTAWIE WSKAŹNIKA KOLOIDALNEGO

STRESZCZENIE. Jedną z przyczyn uszkodzeń nawierzchni asfaltowych w regionach świata, gdzie występują ujemne temperatury, są spękania niskotemperaturowe. Aby przeciwdziałać temu zjawisku, projektowane są mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA), które mają być odporne na występowanie takich pęknięć. Dobór lepiszcza asfaltowego ma kluczowe znaczenie dla żywotności nawierzchni drogowej i jej odporności na powstawanie spękań. Autorzy w artykule dokonali oceny wpływu rodzaju lepiszcza na odporność niskotemperaturową mieszanek mineralno-asfaltowych. W badaniu wykorzystano kilka asfaltów modyfikowanych, zarówno średnio-, jak i wysokomodyfikowanych (HiMA). Określono podstawowe parametry asfaltów (temperatura mięknięcia, penetracja) oraz oznaczono skład grupowy (SARA). Jako kryterium prawidłowego doboru lepiszcza zastosowano wskaźnik koloidalny. Przeprowadzono również testy odporności na pękanie w niskiej temperaturze na mieszankach mineralno-asfaltowych. Badanie przeprowadzono za pomocą metody TSRST. Wyniki pokazały, że zastosowanie asfaltu modyfikowanego poprawia parametry MMA w niskich temperaturach. Zauważono również, że ocena odporności na pękanie w niskiej temperaturze za pomocą wskaźnika koloidalnego nie jest skuteczna w przypadku asfaltów modyfikowanych; do ich oceny konieczne jest opracowanie innej metodyki badawczej.

SŁOWA KLUCZOWE: asfalt, mieszanki mineralno-asfaltowe, odporność na pękanie, spękania niskotemperaturowe, wskaźnik koloidalny.

ABSTRACT. One of the causes of damage to bitumen pavements in regions of the world with sub-zero temperatures is low-temperature cracking. To counter this phenomenon, asphalt mixtures (MMA) are being designed to resist the occurrence of such cracks. The choice of bitumen binder is crucial to the service life of a road pavement and its resistance to cracking. In this paper, the authors evaluated the influence of binder type on the low-temperature resistance of asphalt mixtures. Several modified bitumens, both medium and high-modified (HiMA), were used in the study. The basic parameters of the bitumens (softening point, penetration) as well as the group composition (SARA) were determined. The colloidal index was used as a criterion for the correct choice of binder. Low-temperature cracking resistance tests were also carried out on asphalt mixtures. The study was conducted using the TSRST method. The results showed that the use of modified bitumen improves the performance of MMA at low temperatures. It was also noted that the assessment of low-temperature cracking resistance using the colloidal index is not effective for modified bitumens; a different test methodology needs to be developed for their assessment.

DOI: 10.7409/rabdim.024.013

KEYWORDS: bitumen, asphalt mixtures, fracture resistance, low-temperature cracking, colloidal index.

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin; bartosz.budzinski@zut.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; maria.ratajczak@put.poznan.pl

1. WPROWADZENIE

Na obszarach, gdzie występują ujemne temperatury może dochodzić do powstawania spękań niskotemperaturowych [1-4]. Problem spękań niskotemperaturowych w literaturze pierwszy raz został poruszony w 1966 roku [5]; nazwano go wówczas *non-load associated cracking of asphalt pavements*. Na terenie Kanady i północnej części Stanów Zjednoczonych spękania niskotemperaturowe są główną formą uszkodzeń nawierzchni [6]. Spękania niskotemperaturowe występują również w innych rejonach świata, między innymi na terenie Europy Północnej, Rosji, Japonii i północnych Chin [7-9]. Proces powstawania spękań niskotemperaturowych zasadniczo może być spowodowany trzema mechanizmami: pęknięcie termiczne w wyniku pojedynczego zdarzenia, zmęczenie termiczne oraz pękanie termiczne związane z obciążeniem [10, 11], przy czym powstanie spękań może być kombinacją powyższych trzech mechanizmów. Pęknięcie w wyniku pojedynczego zdarzenia termicznego powstaje w sytuacji, w której dochodzi do gwałtownego obniżenia temperatury powietrza. Prowadzi to do skurczu nawierzchni asfaltowej, a w momencie, w którym powstające naprężenia przekroczą wytrzymałość materiału, powstaje pęknięcie [12]. Ten typ pęknięcia jest typowy dla chłodnych regionów (np. Alaska, Kanada). Pęknięcie wskutek zmęczenia termicznego powstaje przy cyklicznym schładzaniu i ogrzewaniu nawierzchni, które prowadzi do przekroczenia odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie [13], mimo że pojedynczy spadek temperatury nie jest ekstremalny. Ten typ zniszczenia występuje najczęściej w klimacie umiarkowanym [14]. Ostatni z mechanizmów jest kombinacją cyklicznego schładzania nawierzchni i kolejnych obciążeń od ruchu. Spękania niskotemperaturowe przyjmują formę spękań poprzecznych [3, 15-19]. Mieszanka mineralno-asfaltowa jest wrażliwa na zmiany temperatury – przy jej spadku staje się sztywna i twarda [20], co powoduje powstawanie spękań. Xu et al. wykazali, że siła adhezji do kruszywa jest większa niż kohezja asfaltu, a wraz z spadkiem temperatury efekt ten rośnie [21]. Należy tym samym zakładać, że spękanie niskotemperaturowe ma charakter kohezyjny. Spękania niskotemperaturowe na nawierzchni asfaltowej są rozłożone najczęściej równomiernie, w odstępach od kilku do kilkuset metrów [22]. Według raportu SHRP-400 do czynników wpływających na spękania niskotemperaturowe zalicza się: materiał, środowisko i geometrię

1. INTRODUCTION

In areas with sub-zero temperatures, low-temperature cracking may occur [1-4]. The problem of low-temperature cracking was first addressed in the literature in 1966 [5]; it was then called *non-load associated cracking of asphalt pavements*. Within Canada and the northern part of the United States, low-temperature cracking is the main form of pavement defects [6]. Low-temperature cracking also occurs in other areas of the world, including northern Europe, Russia, Japan and northern China [7-9]. The process of low-temperature cracking can generally be caused by three mechanisms: thermal cracking as a result of a single event, thermal fatigue and load-related thermal cracking [10, 11], while crack formation can be a combination of the three aforementioned mechanisms. Single thermal event cracking occurs when there is a sharp drop in air temperature. This leads to shrinkage of the bitumen pavement, and when the resulting stresses exceed the strength of the material, a crack is formed [12]. This type of fracture is typical of cold regions (e.g. Alaska, Canada). Thermal fatigue cracking occurs when the pavement is cyclically cooled and heated, leading to the tensile resistance of the asphalt mixture being exceeded [13], even though a single temperature drop is not extreme. This type of damage is most common in temperate climates [14]. The last mechanism is a combination of cyclic cooling of the pavement and subsequent loads from traffic. Low-temperature cracks take the form of transverse cracks [3, 15-19]. The asphalt mixture is sensitive to changes in temperature – when the temperature drops it becomes stiff and hard [20], resulting in cracks. Xu et al. showed that the force of adhesion to the aggregate is greater than the bitumen cohesion, and that this effect increases with decreasing temperature [21]. It should thus be assumed that the low-temperature cracking is cohesive in nature. Low-temperature cracks on bitumen pavements are usually distributed uniformly, at intervals of several to several hundred metres [22]. According to the SHRP-400 report, factors affecting low-temperature cracking include: material, environment and pavement geometry [23]. The type of bitumen binder and, in particular, its rheological properties [24-27], is crucial in terms of resistance to low temperatures. The phenomenon of physical hardening of bitumen, a phenomenon where the stiffness of bitumen increases at low temperatures, contributes to the formation of low-temperature cracks [28]. The great-

nawierzchni [23]. Kluczowy ze względu na odporność na niskie temperatury jest rodzaj lepiszcza asfaltowego, a w szczególności jego właściwości reologiczne [24-27]. Do powstawania spękań niskotemperaturowych przyczynia się zjawisko twardnienia fizycznego asfaltu, czyli zjawisko polegające na wzroście sztywności asfaltu w niskich temperaturach [28]. Największy wzrost sztywności obserwuje się w zakresie $+25^{\circ}\text{C}$ do -25°C [29]. Isacson i Zeng wskazują, że pochodzenie lepiszcza asfaltowego oraz skład, wyrażony między innymi procentową zawartością asfaltenów i żywic w asfalcie, wpływają na jego parametry niskotemperaturowe [30]. Generalnie wyniki badań wskazują, że zastosowanie asfaltu o wyższej penetracji (bardziej miękkie lepiszcze) przekłada się na lepsze zachowanie mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach [20, 31-35].

Od wielu lat poprawę parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych osiąga się poprzez modyfikację asfaltu polimerami. Przyczyniło się to między innymi do poprawy odporności na deformacje trwałe oraz odporności na zmęczenie [36, 37]. Modyfikację asfaltu polimerami rozpoczęto się na szerszą skalę w latach 70. XX wieku [38]. Modyfikacja stosowana jest do poprawy cech funkcjonalnych asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych, w tym również parametrów niskotemperaturowych. Badania wskazują, że modyfikacja polimerami przynosi korzystne efekty w niskich temperaturach [26, 39-47]. Z drugiej strony część badań, w których porównuje się mieszanki z asfaltem drogowym przed modyfikacją i asfaltem po modyfikacji, wskazuje, że właściwości niskotemperaturowe w głównej mierze zależą od parametrów asfaltu przed modyfikacją, a sama modyfikacja niekoniecznie przynosi znaczące korzyści [48-50]. W Tabl. 1 zestawiono wyniki badań uzyskiwanych w teście TSRST (ang. *Thermal Stress Restrained Specimen Test*) w różnych pracach badawczych, w zależności od rodzaju i ilości modyfikatora oraz rodzaju asfaltu przed modyfikacją. Analiza uzyskiwanych rezultatów wskazuje na niejednoznaczny wpływ modyfikacji polimerami, w szczególności w badaniu TSRST. W przypadku badania wyłącznie samego asfaltu w teście BBR wpływ modyfikacji częściej okazuje się korzystny i objawia się mniejszą sztywnością lepiszcza. Generalnie modyfikacja polimerem pozwala na zastosowanie bardziej miękkiego asfaltu bazowego (przy jednoczesnym spełnieniu wymagań odporności na deformacje trwałe) i z tym należy wiązać pozytywny wpływ asfaltów modyfikowanych na odporność mieszanek na niskie temperatury.

est increase in stiffness is observed between $+25^{\circ}\text{C}$ and -25°C [29]. Isacson and Zeng point out that the origin of the bitumen binder and the composition, expressed among other things by the percentage of asphaltenes and resins in the bitumen, affect its low-temperature performance [30]. In general, research results indicate that the use of higher penetration bitumen (softer binder) translates into better behaviour of asphalt mixtures at low temperatures [20, 31-35].

For many years, improvements in the performance of asphalt mixtures have been achieved by modifying the bitumen with polymers. This has contributed, among others, to improved resistance to permanent deformation and resistance to fatigue [36, 37]. Modification of bitumen with polymers began on a larger scale in the 1970s [38]. Modification is used to improve the functional characteristics of bitumens and asphalt mixtures, including low-temperature performance. Research indicates that polymer modification has beneficial effects at low temperatures [26, 39-47]. On the other hand, some studies comparing mixtures with road bitumen before modification and bitumen after modification indicate that the low-temperature properties mainly depend on the parameters of the bitumen before modification, and that modification alone does not necessarily bring significant benefits [48-50]. Table 1 summarises the results obtained from the TSRST (*Thermal Stress Restrained Specimen Test*) in various research works, depending on the type and amount of modifier and the type of bitumen before modification. Analysis of the results obtained indicates an ambiguous effect of polymer modification, particularly in the TSRST. When testing the bitumen alone in the BBR test, the effect of the modification is more often shown to be beneficial and manifests itself with lower binder stiffness. In general, polymer modification allows the use of a softer base bitumen (while meeting the requirements for resistance to permanent deformation) and the positive effect of modified bitumens on the low-temperature resistance of mixtures should be linked to this.

Previous studies [51] have shown a strong correlation between low-temperature cracking and a specific colloidal index for unmodified bitumens. These relationships, as well as the relationship between penetration and fracture temperature, are shown in Figs 1 and 2, respectively. The observed regularities are due to the fact that for unmodified bitumen binders there is a strong correlation between penetration and colloidal index.

Table 1. Effect of polymer modification of bitumen on the TSRST fracture temperature
 Tablica 1. Wpływ modyfikacji asfaltu polimerem na temperaturę pęknięcia w badaniu TSRST

Author Autor	Neat bitumen/ oil source Asfalt bazowy/ pochodzenie ropy	Bitumen/Modification Asfalt/Modyfikacja	Bitumen parameters Parametry lepiszcza			Gradation Type Uziarnienie mieszanki	Fracture Temperature Temperatura pęknięcia [°C]	Worse after modification Pogorszenie po modyfikacji
			Pen at / w 25°C [0.1 mm]	R&B [°C]	Tcr (BBR) [°C]			
[49]	70/100 Venezuela Wenezuela	70/100	84	46.0		-28.8 ^{***}	-	
		70/100 + 6% SBS	49	73.5		-28.1 ^{***}	YES / TAK	
		70/100 + 6% SEBS	40	71.8		-21.9 ^{***}	YES / TAK	
	160/220 Venezuela Wenezuela	70/100 + 6% EVA	54	59.5		-24.9 ^{***}	YES / TAK	
		70/100 + 6% EVA	44	74.8		-25.8 ^{***}	YES / TAK	
		160/220	183	38.8		-32.5 ^{***}	-	
	160/220 Venezuela Wenezuela	160/220 + 6% SBS	88	77.2		-33.1 ^{***}	NO / NIE	
		160/220 + 6% SEBS	61	66.8	n.d.	-27.9 ^{***}	YES / TAK	
		160/220 + 6% EVA	97	53.4		-31.6 ^{***}	YES / TAK	
	160/220 Mexico Meksyk	160/220 + 6% EVA	82	70.2		-31.8 ^{***}	YES / TAK	
		160/220	180	41.0		-32.6 ^{***}	-	
		160/220 + 6% SBS	88	77.2		-32.8 ^{***}	NO / NIE	
A60 Middle Eastern Środkowy Wsch.	160/220 + 6% SEBS	67	70.5		-29.5 ^{***}	YES / TAK		
	160/220 + 6% EVA	100	57.7		-33.8 ^{***}	NO / NIE		
	160/220 + 6% EVA	72	71.0		-31.6 ^{***}	YES / TAK		
[54]	A60 Middle Eastern Środkowy Wsch.	A60	38 ^{*)}	53.0 ^{*)}	-11.0 ^{*)}	-25.0	-	
		A60 + 5% SBS	32 ^{*)}	85.0 ^{*)}	-15.0 ^{*)}	-23.0	YES / TAK	
		A100	62 ^{*)}	49.0 ^{*)}	-14.0 ^{*)}	-28.1	-	
	A100 Middle Eastern Środkowy Wsch.	A100 + 3% SBS	55 ^{*)}	57.0 ^{*)}	-16.0 ^{*)}	-27.5	YES / TAK	
		A100 + 5% SBS	46 ^{*)}	80.0 ^{*)}	-17.5 ^{*)}	-27.7	YES / TAK	
		A100 + 7% SBS	45 ^{*)}	91.0 ^{*)}	-20.0 ^{*)}	-27.8	YES / TAK	
	A200 Middle Eastern Środkowy Wsch.	A200	133 ^{*)}	43.0 ^{*)}	-18.0 ^{*)}	-31.9	-	
		A200 + 5% SBS	96 ^{*)}	80.0 ^{*)}	-22.0 ^{*)}	-31.0	YES / TAK	
		B85	54 ^{*)}	52.0 ^{*)}	-18.0 ^{*)}	-28.0	-	
	Middle Eastern Środkowy Wsch.	B85 + 5% SBS	40 ^{*)}	69.0 ^{*)}	-18.5 ^{*)}	-26.3	YES / TAK	

Table 1 (Continuous). Effect of polymer modification of bitumen on the TSRST fracture temperature
Tablica 1 (Kontynuacja). Wpływ modyfikacji asfaltu polimerem na temperaturę pęknięcia w badaniu TSRST

[33]	100/130 Western Siberia Zach. Syberia	100/130	110	44.0	-34.1	AC 11	-34.1	-
		100/130 + Kraton 4%	60	76.0	-35.6		-35.6	NO / NIE
		100/130 + Calprene 4%	58	73.0	-38.2		-38.2	NO / NIE
		100/130 + Butonal NS198 3%	83	58.0	-34.4		-34.4	NO / NIE
		100/130 + Elvaloy 4170 1.4%	86	76.0	-33.7		-33.7	YES / TAK
		130/200	175	41.0	-36.7		-36.7	-
		130/200 + Kraton 6%	74	75.5	-33.2		-33.2	YES / TAK
		130/200 + Calprene 6%	63	79.0	-35.3		-35.3	YES / TAK
		130/200+ Butonal NS198 3.5%	110	61.5	-33.1		-33.1	YES / TAK
		130/200+ Elvaloy 4170 1.4%	105	60.5	-35.3		-35.3	YES / TAK
[55]	n.d.	130/200 + Kraton 5.5% + PPA 0.02%	79	58.0	-32.2	AC 13	-33.8	YES / TAK
		130/200 + Calprene 5.5% PPA 0.02%	76	75.0	-35.9		-36.1	YES / TAK
		130/200+ Elvaloy 4170 1.4% + PPA 0.02%	118	60.5	-35.1		-36.5	YES / TAK
		130/200 + PPA 1.0%	75	63.0	-34.8		-33.3	YES / TAK
		70	68	53.2	-24.4 ^{***)}		-24.4 ^{***)}	-
		70 + PPA 1%			-12.0 ^{***)}		-12.0 ^{***)}	YES / TAK
		70 + SBS 4.5%			-22.3 ^{***)}		-22.3 ^{***)}	YES / TAK
		70 + SBS 3% + PPA 0.75%	n.d.	n.d.	n.d.		-22.1 ^{***)}	YES / TAK
		70 + SBR 2.5%			-27.0 ^{***)}		-27.0 ^{***)}	NO / NIE
		70 + SBS 2.5% + PPA 0.75%			-24.4 ^{***)}		-24.4 ^{***)}	YES / TAK
[56]	n.d.	E70			-23.5 ^{***)}	AC	-24.3 ^{***)}	-
		E70 + SBS (Linear) 3%			-23.7 ^{***)}		-25.7 ^{***)}	NO / NIE
		E70 + SBS (Linear) 4.5%			-24.9 ^{***)}		-29.4 ^{***)}	NO / NIE
		E70 + SBS (Linear) 6.0%	n.d.	n.d.	-26.2 ^{***)}		-27.8 ^{***)}	NO / NIE
		E70 + SBS (Radial) 3%			-24.2 ^{***)}		-28.5 ^{***)}	NO / NIE
		E70 + SBS (Radial) 4.5%			-25.7 ^{***)}		-31.7 ^{***)}	NO / NIE
		E70 + SBS (Radial) 6.0%			-26.3 ^{***)}		-31.1 ^{***)}	NO / NIE
		85/100			-33.3		-33.3	-
		85/100 + diblock SB 5%			-25.5		-25.5	YES / TAK
		85/100 + EVA 5%			-38.0		-38.0	NO / NIE
[40]	AAN Bow River Rejon rzeki Bow	85/100 + SBS (Radial) 5%	n.d.	n.d.	n.d.	AC	-41.0	NO / NIE

n.d. – no data / brak danych; *) after RTFOT aging / po starzeniu RTFOT; **) after RTFOT+PAV aging / po starzeniu RTFOT+PAV;

***) Data extracted from graph / Dane na podstawie wykresu; R&B – softening point Ring and Ball / temperatura mięknięcia;

Ter (BBR) – Thermal Contact Resistance / odporność na kontakt termiczny; SBS, PPA, SEBS, EVA – polymers / polimery;

Wcześniejsze badania [51] wykazały silną korelację między pękaniem w niskiej temperaturze a określonym wskaźnikiem koloidalnym dla asfaltów niemodyfikowanych. Relacje te, jak również zależności między penetracją a temperaturą pękania, przedstawiono odpowiednio na Rys. 1 oraz Rys. 2. Zaobserwowane prawidłowości wynikają z faktu, że dla niemodyfikowanych lepiszczy asfaltowych istnieje silna korelacja między penetracją a wskaźnikiem koloidalnym. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań odporności na spękania niskotemperaturowe mieszank mineralno-asfaltowych na bazie asfaltów modyfikowanych polimerami. Zbadano również zależności pomiędzy odpornością niskotemperaturową MMA a wskaźnikiem koloidalnym zastosowanego polimeroasfaltu.

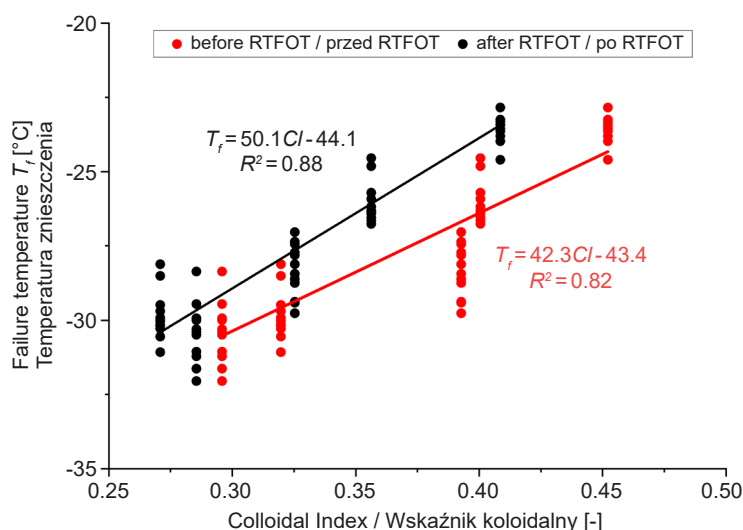


Fig. 1. Relationship between colloidal index and cracking temperature for unmodified bitumens, based on [51]

Rys. 1. Zależność pomiędzy wskaźnikiem koloidalnym a temperaturą pęknięcia dla asfaltów drogowych, na podstawie [51]

Wyniki badań wykonanych na potrzeby tego artykułu zestawiono i porównano z wynikami przedstawionymi we wcześniejszej publikacji autorów [51] (dla asfaltów niemodyfikowanych). Na tej podstawie oceniono wpływ zastosowania asfaltu modyfikowanego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na powstawanie spękań indukowanych termicznie. Jednocześnie parametry mie-

This paper presents the results of a study of the low-temperature cracking resistance of asphalt mixtures based on polymer-modified bitumens. The relationship between the low-temperature resistance of the MMA and the colloidal index of the polymer modified bitumen used was also investigated.

The results of the tests carried out for the purposes of this paper were compared and contrasted with those presented in a previous publication by the authors [51] (for unmodified bitumens). On this basis, the effect of the use of modified bitumen on the resistance of the asphalt mixture to thermally induced cracking was assessed. At the same time, mixture parameters such as grain size distribution, void content or binder content were the same for modified and unmodified bitumens.

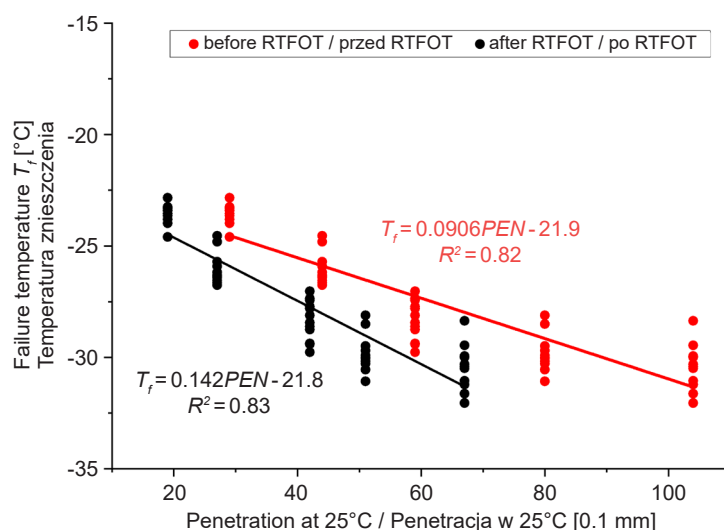


Fig. 2. Relationship between penetration and cracking temperature for unmodified bitumens, based on [51]

Rys. 2. Zależność pomiędzy penetracją a temperaturą pęknięcia dla asfaltów drogowych, na podstawie [51]

2. MATERIALS AND TEST METHODS

2.1. MATERIALS

In order to verify the method proposed in [48] for evaluating the properties of low-temperature asphalt mixtures based on the colloidal index of the binder, six types of bitumen were used to produce these mixtures. The bind-

szanki takie jak uziarnienie, zawartość wolnych przestrzeni czy zawartość lepiszcza były takie same dla asfaltów modyfikowanych i niemodyfikowanych.

2. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

2.1. MATERIAŁY

Aby zweryfikować zaproponowaną w pracy [48] metodę oceny właściwości niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie wskaźnika koloidalnego lepiszcza, do produkcji tych mieszanek użyto sześciu rodzajów asfaltów. Lepiszczka zostały zmodyfikowane przemysłowo, pochodziły z jednej z rafinerii i charakteryzowały się zbliżonym terminem produkcji. Tabl. 2 zawiera podstawowe parametry użytych asfaltów, takie jak penetracja w temperaturze 25°C i temperatura mięknięcia oznaczona metodą pierścienia i kuli.

ers were industrially modified, sourced from one of the refineries and had a similar production date. Table 2 includes the basic parameters of the bitumen used, such as penetration at 25°C and softening temperature determined by the ring and ball method.

The mixture type chosen for the study was AC11 binder course asphalt mixture according to WT-2:2014 [52]. The chosen mixture type allowed, among others, a direct comparison to be made with unmodified bitumen mixtures that have been the subject of previous studies. In addition, the samples tested differed in terms of the type of bitumen. The grain size curve of the aggregate in the specified mixtures is shown in Fig. 3. The mineral mixture was granodiorite aggregate. The binder content of the asphalt mixture was 4.8% and the design void content was 3.5%. The mixtures were prepared in a laboratory mixer.

Table 2. List of tested bitumens

Tablica 2. Lepiszczka asfaltowe poddane badaniom

Binder type Rodzaj lepiszcza	Parameter Parametr	Test method Metoda badania	Unit Jednostka	Before RTFOT ^{*)} Przed RTFOT	After RTFOT ^{*)} Po RTFOT
10/40-65	Penetration at 25°C Penetracja w 25°C	EN 1426:2015-08 EN 1427:2015-08	0.1 mm	35	25
	Softening point Temperatura mięknięcia		°C	78.6	84
25/55-60	Penetration at 25°C Penetracja w 25°C		0.1 mm	38	27
	Softening point Temperatura mięknięcia		°C	66.6	73.5
45/80-65	Penetration at 25°C Penetracja w 25°C		0.1 mm	57	42
	Softening point Temperatura mięknięcia		°C	68.8	75.5
25/55-80	Penetration at 25°C Penetracja w 25°C		0.1 mm	50	36
	Softening point Temperatura mięknięcia		°C	87.2	92.5
45/80-80	Penetration at 25°C Penetracja w 25°C		0.1 mm	54	39
	Softening point Temperatura mięknięcia		°C	92.2	94.0
65/105-80	Penetration at 25°C Penetracja w 25°C		0.1 mm	70	48
	Softening point Temperatura mięknięcia		°C	89.2	92

^{*)} RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test / Metoda cienkiej wirowanej warstwy asfaltu przy badaniu odporności na starzenie

Wybrany do badań rodzajem mieszanki była mieszanka mineralno-asfaltowa warstwy wiążącej AC11 wg WT-2:2014 [52]. Wybrany typ mieszanki pozwalał między innymi na dokonanie bezpośredniego porównania z mieszankami z asfaltem niemodyfikowanym, które były przedmiotem wcześniejszych badań. Dodatkowo badane próbki różniły się pod względem rodzaju asfaltu. Krzywa uziarnienia kruszywa w określonych mieszankach jest przedstawiona na Rys. 3. Mieszankę mineralną stanowiło kruszywo granodiorytowe. Zawartość lepiszcza w mieszance mineralno-asfaltowej wynosiła 4,8%, a projektowana zawartość wolnych przestrzeni 3,5%. Mieszanki zostały przygotowane w mieszalniku laboratoryjnym. Po wymieszaniu, próbki umieszczano w temperaturze 155°C na 3 godziny i zagęszczono zgodnie z normą EN 12697-33 za pomocą zagęszczarki walcowej. Okres kondycjonowania był podyktowany chęcią zasymulowania starzenia technologicznego (transportu mieszanki). Z przygotowanych płyt o wymiarach 30,5 cm × 30,5 cm × 7 cm wycięto próbki analityczne o wymiarach 4 cm × 4 cm × 20 cm. Wszystkie próbki analityczne sprawdzono pod kątem zawartości wolnych przestrzeni zgodnie z normą EN 12697-8, a także wykonano pomiary szerokości (3 pomiary), grubości (3 pomiary) i długości (2 pomiary), które uwzględniono w badaniu TSRST.

2.2. METODY BADAWCZE

2.2.1. Oznaczenie składu grupowego asfaltów (SARA)

Do oznaczenia składu grupowego badanych asfaltów wykorzystano metodę chromatografii cienkowarstwowej TLC (*thin layer chromatography*) z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym FID (metoda TLC/FID). Do rozdziału lepiszczy na poszczególne frakcje zastosowano następujący zestaw rozpuszczalników (eluentów) [53]:

- heptan C_7H_{16} ,
- toluen C_7H_8 + heptan C_7H_{16} , (80% : 20%),
- dichlorometan CH_2Cl_2 + metanol CH_3OH , (95% : 5%).

Rozpuszczalniki stosowano w „kierunku” rosnącej siły elucyjnej. Pomiedzy kolejnymi stopniami elucji chromarody umieszczano na 2 minuty w suszarce rozgrzanej do temperatury $60^\circ C \pm 2^\circ C$, a następnie wkładano je do eksykatora, aż do wystygnięcia. Po zakończeniu elucji ramkę z chromarodami umieszczano w aparacie IATROSCAN MK-6, gdzie następowało wypalenie substancji organicznych w płomieniu wodoru, a powstałe w ten sposób jony

After mixing, the samples were placed at 155°C for 3 hours and compacted according to EN 12697-33 using a roller compactor. The conditioning period was dictated by the desire to simulate process ageing (transport of the mixture). Analytical samples measuring 4 cm × 4 cm × 20 cm were cut from the prepared plates measuring 30.5 cm × 30.5 cm × 7 cm. All analytical samples were checked for void content in accordance with EN 12697-8 and measurements of width (3 measurements), thickness (3 measurements) and length (2 measurements) were taken and included in the TSRST.

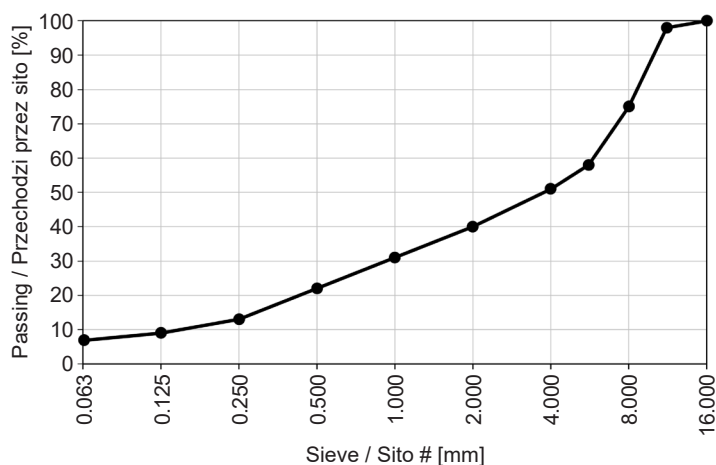


Fig. 3. Gradation curve of the aggregate for AC11 mixtures used in this study

Rys. 3. Krzywa uziarnienia mieszanki AC11 do warstwy wiążącej użytej do badań

2.2. RESEARCH METHODS

2.2.1. Determination of the group composition of bitumen (SARA)

Thin layer chromatography (TLC) with an FID flame ionisation detector (TLC/FID method) was used to determine the group composition of the bitumens tested. The following set of solvents (eluent) was used to separate the binders into the different fractions [53]:

- heptane C_7H_{16} ,
- toluene C_7H_8 + heptane C_7H_{16} , (80% : 20%),
- dichloromethane CH_2Cl_2 + methanol CH_3OH , (95% : 5%).

Solvents were applied in the “direction” of increasing elution force. Between elution steps, the chromarods were placed in a dryer heated to $60^\circ C \pm 2^\circ C$ for 2 minutes and then placed in a desiccator until cooled. After elution, the

generowały sygnał proporcjonalny do ilości wypalanej substancji, który był zbierany przez elektrodę kolektorową i zapisywany jako zmiana sygnału detektora FID w funkcji czasu w postaci chromatogramu [53]. Analiza ilościowa badanych asfaltów polega na zliczeniu pól powierzchni poszczególnych pasm chromatogramu, odpowiadających odpowiednim frakcjom asfaltu. Wynikiem badań jest procentowa zawartość poszczególnych grup frakcyjnych.

Na podstawie oznaczonych składów grupowych badanych asfaltów obliczono wskaźnik stabilności koloidalnej CI :

$$CI = \frac{\% \text{ aromatyczne} + \% \text{ żywice}}{\% \text{ asfalteny} + \% \text{ nasycone}} \quad (1)$$

Wskaźnik ten, obok lepkości wyrażonej jako penetracja w 25°C, posłużył do wyznaczenia zależności pomiędzy parametrami asfaltu użytego do produkcji MMA oraz wyników uzyskanych w badaniu TSRST.

2.2.2. Badanie naprężeń termicznych w próbce usztywnionej (TSRST)

Badanie polega na stopniowym ochładzaniu próbki z prędkością 10°C/h, z jednoczesnym zablokowaniem możliwości odkształcania się próbki wskutek skurczu (odkształcenia równe 0). Wynikiem badania jest wzrost wartości naprężeń w czasie, minimalna temperatura oraz naprężenie przy zniszczeniu. Test rozpoczyna się w temperaturze +20°C. Podczas testu rejestrowana jest temperatura próbki (na podstawie wskazań 3 czujników temperatury) oraz naprężenie generowane podczas chłodzenia próbki. Próbki klejono do elementów montażowych dwuskładnikowym klejem epoksydowym i pozostawiano na 24 godziny w celu utwardzenia. Następnie próbkę umieszczano w układzie testowym i kondycjonowano przez 2 godziny w temperaturze 20°C. Relatywnie krótki czas kondycjonowania był uzasadniony małą różnicą między temperaturą kondycjonowania a temperaturą otoczenia w laboratorium. Gęstości każdej próbki określono zgodnie z normą EN 12697-5, wraz z zawartością wolnych przestrzeni.

3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki oznaczania składu grupowego analizowanych asfaltów, przed i po starzeniu metodą RTFOT, przedstawiono na Rys. 4 i 5. We wszystkich testowanych próbkach zaobserwowano znaczące zmiany w zawartości aromatów

chromarod frame was placed in the IATROSCAN MK-6, where the organic substances were burned in a hydrogen flame and the resulting ions generated a signal proportional to the amount burned, which was collected by the collector electrode and recorded as the change in signal of the FID detector as a function of time in the form of a chromatogram [53]. The quantitative analysis of the bitumens tested consists of counting the areas of the individual bands of the chromatogram, corresponding to the respective bitumen fractions. The result of the study is the percentage of each fractional group.

Based on the determined group compositions of the bitumens tested, the colloidal stability index CI was calculated:

$$CI = \frac{\% \text{ aromatic} + \% \text{ resin}}{\% \text{ asphaltens} + \% \text{ saturated}} \quad (1)$$

This index, alongside viscosity expressed as penetration at 25°C, was used to determine the relationship between the parameters of the bitumen used to produce the MMA and the results obtained in the TSRST.

2.2.2. Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)

The test consists of gradually cooling the sample at a rate of 10°C/h, while blocking the possibility of deformation due to shrinkage (deformation equal to 0). The result of the test is the increase in stress values over time, the minimum temperature and the stress at damage. The test starts at +20°C. During the test, the temperature of the specimen (based on the readings of the 3 temperature sensors) and the stress generated during the cooling of the specimen are recorded. The specimens were glued to the mounting components with a two-component epoxy adhesive and left to cure for 24 hours. The sample was then placed in the test system and conditioned for 2 hours at 20°C. The relatively short conditioning time was justified by the small difference between the conditioning temperature and the ambient temperature in the laboratory. The densities of each sample were determined in accordance with EN 12697-5, together with the void content.

3. TEST RESULTS

The results of the determination of the group composition of the bitumens analysed, before and after ageing using the RTFOT method, are shown in Figs 4 and 5. Significant changes in aroma and resin content were observed in all

i żywic. Procentowa zawartość związków aromatycznych zmniejsza się, a procentowa zawartość żywic wzrasta, co jest zgodne z prawidłowościami opisanymi w literaturze przedmiotu. Na Rys. 6 przedstawiono zależność pomiędzy indeksem koloidalnym a penetracją dla asfaltów drogowych [51] i modyfikowanych po starzeniu metodą RTFOT. Wyniki wskazują na silną zależność liniową między dwoma testowanymi cechami (Współczynnik determinacji w tym przypadku wynosi $R^2 = 0,71$). Wskazuje to na znaczący wpływ składu chemicznego asfaltu na jego penetrację.

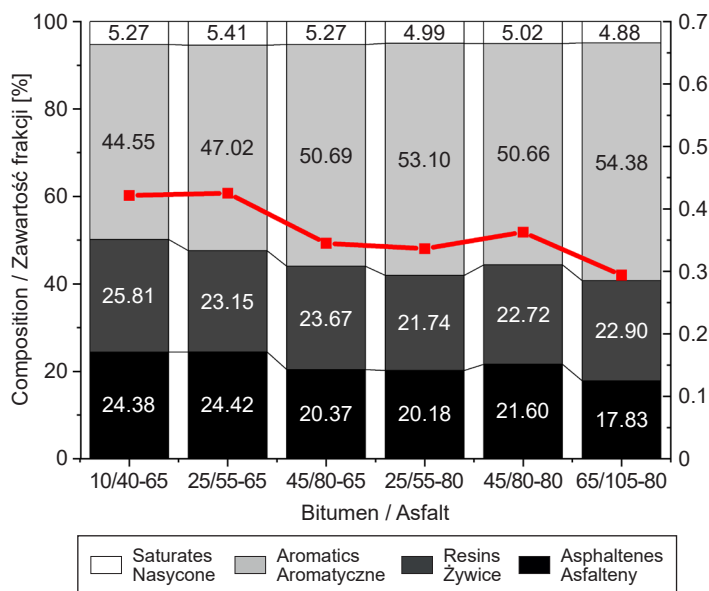


Fig. 4. Group composition and colloidal index values of the modified bitumens before RTFOT
Rys. 4. Skład grupowy i wskaźnik koloidalny asfaltów modyfikowanych przed starzeniem RTFOT

samples tested. The percentage of aromatic compounds decreases and the percentage of resins increases, which is in line with the regularities described in the literature. Fig. 6 shows the relationship between colloidal index and penetration for road bitumens [51] and modified bitumens after RTFOT ageing. The results indicate a strong linear relationship between the two characteristics tested (Coefficient of Determination in this case is $R^2 = 0.71$). This indicates that the chemical composition of the bitumen has a significant effect on its penetration.

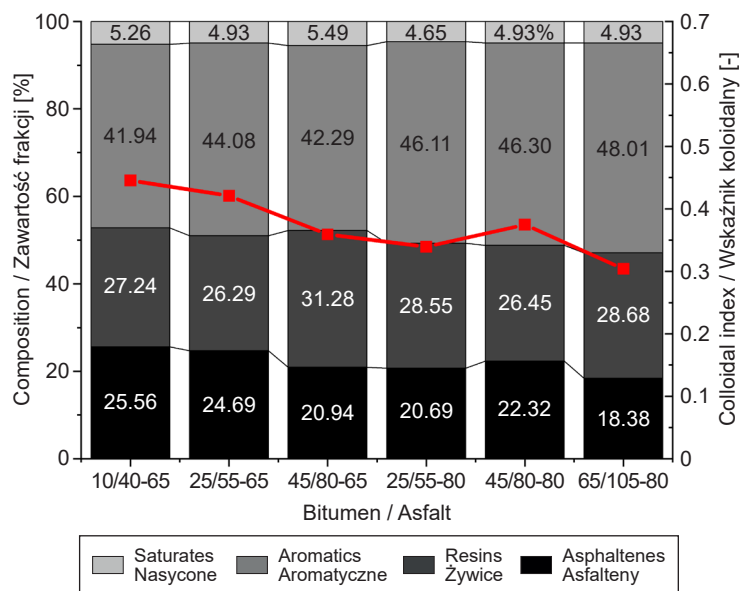


Fig. 5. Group composition and colloidal index values of the modified bitumens after RTFOT
Rys. 5. Skład grupowy i wskaźnik koloidalny asfaltów modyfikowanych po starzeniu RTFOT

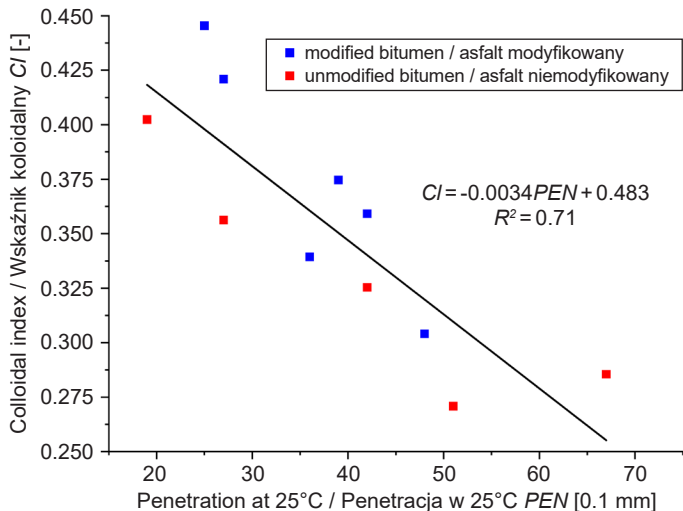


Fig. 6. Relationship between bitumen penetration and colloidal index (results for unmodified bitumen come from [51])
Rys. 6. Wykres zależności pomiędzy penetracją a indeksem koloidalnym (wyniki dla asfaltu niemodyfikowanego pochodzą z [51])

Wyniki badania TSRST przedstawiono w Tabl. 3. Uzyskane wyniki cechują się wysoką powtarzalnością, co potwierdzają małe odchylenia standardowe. Wartości naprężeń σ_f w momencie pęknięcia wynosiły od 4,5 MPa do 5,6 MPa; różnice te należy uznać za niewielkie. Jednakże wartości naprężeń uzyskane w mieszankach z wykorzystaniem asfaltów modyfikowanych są znacznie wyższe niż wartości uzyskane dla mieszanek mineralno-asfaltowych w pracy [51]. Dla asfaltów drogowych zakres uzyskanych naprężeń wynosił od 3,1 MPa do 4,4 MPa. Prawdopodobne jest, że użycie asfaltu modyfikowanego zwiększa wytrzymałość na rozciąganie w niskich temperaturach. Uzyskane wyniki pęknięcia w niskich temperaturach są podobne, niezależnie od zastosowanego lepiszcza asfaltowego. Temperatura pęknięcia T_f osiągnięta w badaniach, wynosząca około -32°C , wskazuje na dobrą odporność na pęknięcie w niskich temperaturach. Na Rys. 7 przedstawiono korelację wskaźnika koloidalnego CI i temperatury pęknięcia T_f asfaltów modyfikowanych po RTFOT. Na wykresie przedstawiono również zależność pomiędzy indeksem koloidalnym CI a temperaturą pęknięcia w badaniu TSRST dla asfaltów niemodyfikowanych (czerwona linia na wykresie).

The TSRST results are shown in Table 3. The results obtained are characterized by a high repeatability, as evidenced by the low standard deviations. Stress values σ_f at fracture ranged from 4.5 MPa to 5.6 MPa; these differences should be considered small. However, the stress values obtained in the mixtures using modified bitumens are much higher than the values obtained for asphalt mixtures in the work [51]. For road bitumens, the range of stresses obtained was from 3.1 MPa to 4.4 MPa. It is likely that the use of modified bitumen increases the tensile strength at low temperatures. The low-temperature cracking results obtained are similar, regardless of the bitumen binder used. The fracture temperature T_f achieved in the tests, which was around -32°C , indicates good low-temperature fracture resistance. Fig. 7 shows the correlation of the CI colloidal index and fracture temperature of bitumens modified after RTFOT. The graph also shows the relationship between CI colloidal index and fracture temperature T_f in the TSRST for unmodified bitumens (red line in the graph).

Table 3. TSRST test results
Tablica 3. Wyniki badania TSRST

Binder type Rodzaj lepiszcza	Parameter Parametr	Unit Jednostka	Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe
10/40-65	T_f	$^\circ\text{C}$	-32.8	0.60
	σ_f	MPa	5.0	0.30
25/55-60	T_f	$^\circ\text{C}$	-31.7	1.28
	σ_f	MPa	4.5	0.24
45/80-65	T_f	$^\circ\text{C}$	-33.5	1.70
	σ_f	MPa	5.1	0.28
25/55-80	T_f	$^\circ\text{C}$	-32.5	0.84
	σ_f	MPa	5.4	0.45
45/80-80	T_f	$^\circ\text{C}$	-33.3	1.50
	σ_f	MPa	5.5	0.72
65/105-80	T_f	$^\circ\text{C}$	-33.7	0.34
	σ_f	MPa	5.6	0.53

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że zastosowanie asfaltu modyfikowanego istotnie obniża temperaturę pęknięcia mieszanki mineralno-asfaltowej. Różnica między asfaltami modyfikowanymi a niemodyfikowanymi wynosi $3,2^\circ\text{C}$ dla bardziej miękkich lepiszczy (niski wskaźnik koloidalny) i do $8,2^\circ\text{C}$ dla twardszych lepiszczy (wyższy wskaźnik koloidalny). Użycie asfaltu modyfikowanego znacznie poprawia

Based on the results obtained, it can be concluded that the use of modified bitumen significantly reduces the fracture temperature of the asphalt mixture. The difference between modified and unmodified bitumens is 3.2°C for softer binders (low colloidal index) and up to 8.2°C for harder binders (higher colloidal index). The use of modified bitumen significantly improves the resistance of the asphalt mixture to cracking at low temperatures. Thus,

odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na pękanie w niskich temperaturach. Tym samym asfalt modyfikowany powinien być stosowany w miejscach, gdzie pękanie w niskich temperaturach jest przyczyną uszkodzeń nawierzchni. Dzięki asfaltom o niższej penetracji (twardsze lepiszcze) można osiągnąć wystarczającą odporność na trwałe odkształcenia, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej odporności na pękanie w niskich temperaturach. Różnica w obrębie grupy wszystkich modyfikowanych asfaltów wynosi tylko 2°C (największa różnica między wartościami średnimi). Ta wartość jest mniejsza niż powtarzalność metody. W przeprowadzonych badaniach nie zaobserwowano różnicy między asfaltem modyfikowanym (PMB) a asfaltem modyfikowanym polimerem o wysokiej zawartości polimeru (HiMA). Powinno to być przedmiotem dalszych badań, aczkolwiek nie prowadzi to do wniosku o braku zasadności stosowania asfaltów wysokomodyfikowanych. Zdaniem autorów w przypadku asfaltów wysokomodyfikowanych główną zaletą jest poprawa odporności na zmęczenie i odporności na deformacje trwałe przy jednoczesnym zachowaniu bardzo wysokiej odporności na spękania niskotemperaturowe w porównaniu do asfaltów średniomodyfikowanych.

W przypadku asfaltów modyfikowanych (PMB i HiMA) wskaźnik koloidalny lepiszcza nie koreluje z temperaturą pękania mieszanki asfaltowej. Dlatego należy stwierdzić, że metoda oceny odporności asfaltu na pękanie w niskich temperaturach za pomocą wskaźnika koloidalnego, która dawała satysfakcjonujące rezultaty dla asfaltów niemodyfikowanych, nie jest odpowiednia w przypadku asfaltów modyfikowanych.

Silna korelacja między penetracją a wskaźnikiem koloidalnym (Rys. 6) nie przekłada się na równie silną zależność między wskaźnikiem koloidalnym a temperaturą pękania mieszanki asfaltowej (Rys. 7), co wskazuje na inne zachowanie mieszanki z modyfikowanym lepiszczem. W związku z tym należy uznać, że ocena lepiszcza modyfikowanego pod kątem jego odporności na pękanie w niskich temperaturach przy użyciu wskaźnika koloidalnego jest nieodpowiednia (w przeciwieństwie do przypadku asfaltów niemodyfikowanych). Wynika to z faktu, że wskaźnik koloidalny jest obliczany na podstawie wyników badania oznaczania składu grupowego, które umożliwia rozdzielenie asfaltu na cztery podstawowe grupy: związki aromatyczne, związki nasycone, żywice oraz asfaltyny. Podczas procesu modyfikacji asfaltu łańcuchy

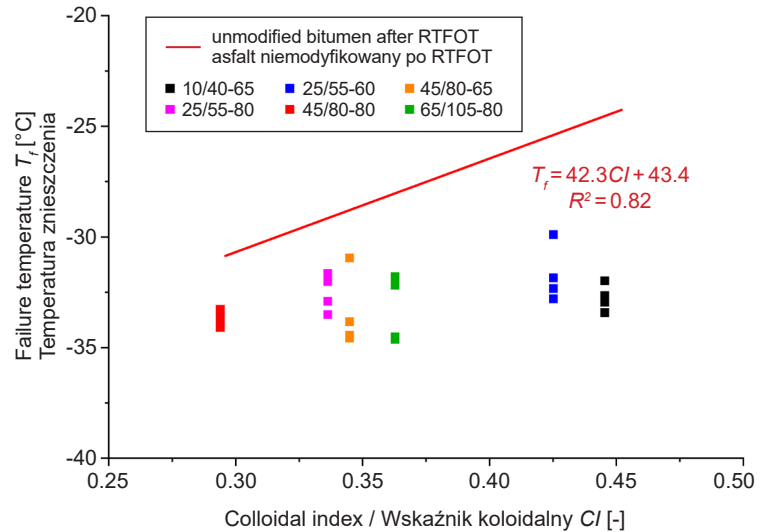
modified bitumen should be used in areas where low-temperature cracking is a cause of pavement damage. With lower penetration bitumens (harder binder), sufficient resistance to permanent deformation can be achieved, while maintaining high resistance to cracking at low temperatures. The difference within the group of all modified bitumens is only 2°C (the largest difference between the average values). This value is less than the repeatability of the method. In the tests carried out, no difference was observed between modified bitumen (PMB) and high polymer modified bitumen (HiMA). This should be the subject of further research, although it does not lead to the conclusion that there is no validity in using highly modified bitumen. According to the authors, in the case of high-modified bitumen, the main advantage is the improvement in fatigue resistance and resistance to permanent deformation while maintaining very high resistance to low-temperature cracking compared to medium-modified bitumen.

For modified bitumen (PMB and HiMA), the colloidal index of the binder does not correlate with the cracking temperature of the bitumen mixture. Therefore, it must be concluded that the method of assessing the low-temperature cracking resistance of bitumen using the colloidal index, which gave satisfactory results for unmodified bitumen, is not suitable for modified bitumen.

The strong correlation between penetration and colloidal index (Fig. 6) does not translate into an equally strong correlation between colloidal index and cracking temperature of the bitumen mix (Fig. 7), indicating a different behaviour of the mix with the modified binder. Therefore, it should be considered inappropriate to assess a modified binder for its resistance to cracking at low temperatures using a colloidal index (in contrast to the case of unmodified bitumens). This is due to the fact that the colloidal index is calculated from the results of the group composition determination test, which allows the bitumen to be separated into four basic groups: aromatic compounds, saturated compounds, resins and asphaltenes. During the bitumen modification process, the polymer chains are “saturated” with oil fractions mainly from the group of saturated compounds and resins. When using the same test methodology for the determination of group composition for modified bitumen, the polymer is somehow “hidden” in the aforementioned two fractions. The application of the colloidal index method for assessing the

polimerowe „nasycone” są frakcjami olejowymi głównie z grupy związków nasyconych oraz żywic. Gdy stosuje tę samą metodykę badania oznaczania składu grupowego dla asfaltów modyfikowanych, polimer jest niejako „ukryty” w wyżej wymienionych dwóch frakcjach. Zastosowanie metody wskaźnika koloidalnego do oceny odporności niskotemperaturowej asfaltów wymagałoby opracowania nowej metodyki badawczej oznaczania składu grupowego, tak aby możliwy był rozdział materiału na frakcje asfaltowe oraz modyfikator. Również ocena asfaltu oparta wyłącznie na penetracji (miękki/twardy asfalt) jest niewystarczająca w kontekście właściwości niskotemperaturowych.

Fig. 7. Failure temperature T_f depending on colloidal index CI (only after RTFOT results); red line based on [51]
Rys. 7. Zależność temperatury pęknięcia T_f od wskaźnika koloidalnego CI (wyniki po RTFOT); czerwona linia na podstawie [51]



4. WNIOSKI

W artykule przeprowadzono weryfikację metody oceny odporności asfaltu na pękanie w niskich temperaturach za pomocą wskaźnika koloidalnego. Zbadano możliwość zastosowania tej metody dla asfaltów modyfikowanych. Sformułowano następujące wnioski:

1. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz należy stwierdzić, że metoda wskaźnika koloidalnego nie jest odpowiednia dla asfaltów modyfikowanych, tym samym istnieje potrzeba poszukiwania innych metod oceny odporności asfaltów na powstawanie spękań niskotemperaturowych.
2. Zastosowanie asfaltu modyfikowanego znacznie poprawiło odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na pękanie w niskich temperaturach w stosunku do mieszanek zawierających asfalt drogowy.
3. Nie odnotowano istotnych różnic w temperaturze pęknięcia pomiędzy asfaltami średnio- i wysokomodyfikowanymi; uzyskane różnice należy uznać za statystycznie nieistotne.
4. W badaniach zaobserwowano silną korelację między penetracją lepszczą asfaltowego a wskaźnikiem koloidalnym.

low-temperature resistance of bitumens would require the development of a new test methodology for the determination of group composition, so that it would be possible to separate the material into bitumen fractions and modifier. Also an assessment of bitumen based solely on penetration (soft/hard bitumen) is insufficient in the context of low-temperature properties.

4. CONCLUSIONS

This paper verifies a method for assessing the low-temperature cracking resistance of bitumen using a colloidal index. The applicability of this method for modified bitumens was investigated. The following conclusions were drawn:

1. Based on the research and analysis carried out, it must be concluded that the colloidal index method is not suitable for modified bitumens, thus there is a need to look for other methods to assess the resistance of bitumens to low-temperature cracking.
2. The use of modified bitumen significantly improved the low-temperature cracking resistance of the bitumen mixture compared to mixtures containing road bitumen.
3. There were no significant differences in fracture temperature between medium- and high-modified bitumens; the differences obtained should be considered statistically insignificant.
4. The study observed a strong correlation between bitumen binder penetration and colloidal index.

5. Istnieje potrzeba kontynuowania badań zarówno w zakresie innych metod oceny asfaltów na spękania niskotemperaturowe, jak i badań obejmujących mieszanki o innej zawartości lepiszcza, np. do warstw ścieralnych.

5. There is a need for continued research into both other methods of assessing bitumens for low-temperature cracking and research involving mixtures with a different binder content, such as for wearing courses.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Judycki J.*: Application of the new viscoelastic method of thermal stress calculation to the analysis of low-temperature cracking of asphalt layers. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **19**, 1, 2020, 27-49, DOI: 10.7409/rabdim.020.002
- [2] *Vinson T.S., Janoo V.C., Haas R.C.G.*: Low temperature and thermal fatigue cracking. Summary report SR-OSU-A-003A-89-1 of Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C., 1989
- [3] *Behnia B., Buttlar W., Reis H.*: Evaluation of low-temperature cracking performance of asphalt pavements using acoustic emission: A review. *Applied Sciences*, **8**, 2, 2018, ID article: 306, DOI: 10.3390/app8020306
- [4] *Gajewski M., Bańkowski W., Gajewska B.*: Determination of Thermal Stresses in Asphalt Layers as a Problem of Thermo-Elasticity and Unsteady Heat Flow. In: *Di Benedetto H., Baaj H., Chailleux E., Tebaldi G., Sauzéat C., Mangiafico S.* (Eds.): Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. Springer International Publishing, Cham, RILEM Bookseries, **27**, 2022, 545-551
- [5] *Lytton R.L.*: Design of asphalt pavements for thermal fatigue cracking. The Institute: College Station, Tex, 1983
- [6] *Yee P., Aida B., Hesp S., Marks P., Tam K.*: Analysis of premature low-temperature cracking in three Ontario, Canada, pavements. *Transportation Research Record*, **1962**, 1, 2006, 44-51, DOI: 10.3141/1962-06
- [7] *Zaumanis M., Valters A.*: Comparison of two low-temperature cracking tests for use in performance-based asphalt mixture design. *International Journal of Pavement Engineering*, **21**, 12, 2020, 1461-1469, DOI: 10.1080/10298436.2018.1549323
- [8] *Judycki J., Jaczewski M., Ryś D., Pszczoła M., Jaskuła P., Glinicki A.*: Field Investigation of low-temperature cracking and stiffness moduli on selected roads with conventional and high modulus asphalt concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **236**, 2017, ID article: 012002, DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012002
- [9] *Gao H., Xu B.*: Research on climatic influencing factors of low temperature cracking index of asphalt pavement in cold area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **651**, 4, 2021, ID article: 042032, DOI: 10.1088/1755-1315/651/4/042032
- [10] *Bouldin M.G., Dongre R., Row G.M., Sharrock M.J., Anderson D.A.*: Predicting thermal cracking of pavements from binder properties: Theoretical basis and field validation. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **69**, 2000, 455-496
- [11] *Li X.J., Marasteanu M.O.*: Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*, **50**, 7, 2010, 867-876, DOI: 10.1007/s11340-009-9303-0
- [12] *Epps A.*: Design and analysis system for thermal cracking in asphalt concrete. *Journal of Transportation Engineering*, **126**, 4, 2000, 300-307, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:4(300)
- [13] *Shahin M.Y., McCullough B.F.*: Prediction of low temperature and thermal-fatigue cracking in flexible pavements. Research Report No. 123-14, The Texas Highway Department and Texas Transportation Institute, 1972
- [14] *Jackson N.M., Vinson T.S.*: Analysis of thermal fatigue distress of asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record*, **1545**, 1, 1996, 43-49, DOI: 10.1177/0361198196154500106
- [15] *Raffaniello A., Bauer, M., Safiuddin Md., El-Hakim M.*: Traffic and climate impacts on rutting and thermal cracking in flexible and composite pavements. *Infrastructures*, **7**, 8, 2022, ID article: 100, DOI: 10.3390/infrastructures7080100
- [16] *Marasteanu M.O., Li X., Clyne T.R., Voller V., Timm D.H., Newcomb D.*: Low temperature cracking of asphalt concrete pavement. Strategic Highway Research Program SHRP-A-400, Final Report, Minnesota Department of Transportation, 2004
- [17] *Rahbar-Rastegar R., Dave E.V., Daniel J.S.*: Fatigue and thermal cracking analysis of asphalt mixtures using continuum-damage and cohesive-zone models. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, **144**, 4, 2018, ID article: 04018040, DOI: 10.1061/JPEODX.0000066

- [18] *Anderson R., King G., Hanson, D., Blankenship P.*: Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **80**, 2011, 615-664
- [19] *Szwed A., Kamińska I.*: Mitigation of low-temperature cracking in asphalt pavement by selection of material stiffness. *Procedia Engineering*, **111**, 2015, 748-755, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.141
- [20] *Pirmohammad S., Ayatollahi M.R.*: Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading. *Cold Regions Science and Technology*, **110**, 2015, 149-159, DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.11.001
- [21] *Xu Y., Zheng C., Feng Y., Guo X.*: Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis. *Construction and Building Materials*, **183**, 2018, 95-101, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169
- [22] *Zhang W.*: Evaluation of field transverse cracking of asphalt pavements. Washington State University, 2015, <https://rex.libraries.wsu.edu/esploro/outputs/doctoral/Evaluation-of-Field-Transverse-Cracking-of/99900581837801842> (available online: 10 October 2022)
- [23] *Jung D., Vinson T.S.*: Thermal Stress restrained specimen test to evaluate low-temperature cracking of asphalt-aggregate mixtures. *Transportation Research Record*, **1417**, 1993, 12-20
- [24] *Büchner J., Wistuba M.*: Analysis of low temperature relaxation properties of asphalt binder and asphalt mastic using a dynamic shear rheometer. *Proceedings of the Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, **2**, CRC Press, London, 2022, 508-516
- [25] *Isacsson U., Zeng H.*: Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology. *Journal of Materials Science*, **33**, 8, 1998, 2165-2170, DOI: 10.1023/A:1004383506240
- [26] *Pszczola M., Judycki J.*: Evaluation of thermal stresses in asphalt layers in comparison with TSRST test results. *Proceedings of The 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, RILEM Bookseries, **4**, 2012, 41-49, DOI: 10.1007/978-94-007-4566-7_5
- [27] *Jaczewski M., Dołżycki B., Alenowicz J., Jaskuła P.*: Impact of reclaimed asphalt pavement (RAP) on low-temperature properties of asphalt concrete. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **18**, 4, 2019, 303-315, DOI: 10.7409/rabdim.019.020
- [28] *Judycki J.*: Twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych oraz jego wpływ na spękania niskotemperaturowe. *Drogownictwo*, **73**, 12, 2013, 368-373
- [29] *Soenen H., Ekblad J., Lu X., Redelius P.*: Isothermal hardening in bitumen and in asphalt mix. *Proceedings of The 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress Held, Vienna*, 2004, **2**, 2004, 1364-1375
- [30] *Isacsson U., Zeng H.*: Relationships between bitumen chemistry and low temperature behaviour of asphalt. *Construction and Building Materials*, **11**, 2, 1997, 83-91, DOI: 10.1016/S0950-0618(97)00008-1
- [31] *Budziński B., Mieczkowski P.*: Use of tensile creep test (TCT) for evaluation of low temperature performance of bituminous mixtures used for bridge pavement. *Archives of Civil Engineering*, **68**, 2, 2022, 679-696, DOI: 10.24425/ACE.2022.140666
- [32] *Riccardi C., Wang D., Wistuba M.P., Walther A.*: Effects of polyacrylonitrile fibres and high content of RAP on mechanical properties of asphalt mixtures in binder and base layers. *Road Materials and Pavement Design*, **24**, 9, 2023, 2133–2155, DOI: 10.1080/14680629.2022.2117072
- [33] *Teltayev B.B., Rossi C.O., Izmailova G.G., Amirbayev E.D., Elshibayev A.O.*: Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, **11**, 2019, ID article: e00238, DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00238
- [34] *Tan Y., Zhang L., Xu H.*: Evaluation of low-temperature performance of asphalt paving mixtures. *Cold Regions Science and Technology*, **70**, 2012, 107-112, DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.08.006
- [35] *Li G.Q., Li Y.Q., Metcalf J.B., Pang S.S.*: Elastic modulus prediction of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11**, 3, 1999, 236-241, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(236)
- [36] *Vamegh M., Ameri M., Chavoshian Naeni S.F.*: Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS. *Construction and Building Materials*, **209**, 2019, 202-214, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.111
- [37] *Khodaii A., Mehrara A.*: Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Construction and Building Materials*, **23**, 7, 2009, 2586-2592, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.015

- [38] Zhu J., Birgisson B., Kringos N.: Polymer modification of bitumen: advances and challenges. *European Polymer Journal*, **54**, 2014, 18-38, DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005
- [39] Isacsson U., Zeng H.: Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt. *Materials and Structures*, **31**, 1998, 58-63, DOI: 10.1007/BF02486415
- [40] Roy S.D., Hesp S.A.M.: Low-temperature binder specification development: Thermal Stress restrained specimen testing of asphalt binders and mixtures. *Journal of the Transportation Research Board*, **1766**, 1, 2001, 7-14, DOI: 10.3141/1766-02
- [41] Błażejowski K., Wójcik-Wisniewska M.: Wytrzymałość zmęczeniowa i odporność na pękanie mieszanek mineralno-asfaltowych z różnymi asfaltami. IV Śląskie Forum Drogownictwa, Chorzów, 2016
- [42] Tabor Z.: Przykłady zastosowania asfaltów wysokomodyfikowanych podczas remontów dróg wojewódzkich. IV Śląskie Forum Drogownictwa, Chorzów, 2016
- [43] Du Z., Jiang C., Yuan J., Xiao F., Wang J.: Low temperature performance characteristics of polyethylene modified asphalts – a review. *Construction and Building Materials*, **264**, 2020, ID article: 120704, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120704
- [44] Rys D., Jaczewski M., Pszczola M., Jaskuła P., Bańkowski W.: Effect of bitumen characteristics obtained according to EN and Superpave specifications on asphalt mixture performance in low-temperature laboratory tests. *Construction and Building Materials*, **231**, 2020, ID article: 117156, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117156
- [45] Becker Y., Méndez M., Rodríguez Y.: Polymer modified asphalt. *Vision Tecnológica*, **9**, 2000, 39-50, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51775580> (available on 16.09.2024)
- [46] Pszczola M., Szydłowski C., Jaczewski M.: Influence of cooling rate and additives on low-temperature properties of asphalt mixtures in the TSRST. *Construction and Building Materials*, **204**, 2019, 399-409, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.148
- [47] Judycki J.; Pszczola M.; Jaskuła P.: Wpływ rodzaju asfaltu na odporność cienkich warstw ściernych na spękania niskotemperaturowe. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne Technologie w Budownictwie Drogowym”, Poznań, 2001; 132-141
- [48] Lu X., Isacsson U.: Effect of binder rheology on the low-temperature cracking of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, **2**, 1, 2001, 29-47, DOI: 10.1080/14680629.2001.9689893
- [49] Lu X.; Isacsson U., Ekblad J.: Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *Materials and Structures*, **36**, 2003, 652-656, DOI: 10.1007/BF02479497
- [50] Aliha M.R.M., Fazaeli H., Aghajani S., Moghadas Nejad F.: Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, **95**, 2015, 545-555, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.165
- [51] Budziński B., Ratajczak M., Majer S., Wilmański A.: Influence of bitumen grade and air voids on low-temperature cracking of asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, 2023, ID article: e02255, DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02255
- [52] WT-2 Część I: Mieszanki Mineralno-Asfaltowe, Wymagania Techniczne. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014
- [53] Ranny M.: Thin-layer chromatography with flame ionization detection. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 2013
- [54] Hesp S., Terlouw T., Vonk W.: Low Temperature performance of SBS-modified asphalt mixes. *The Conference of Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, Reno, NV, United States, **69**, 2000, 540-573
- [55] Liu H., Chen Z., Wang Y., Zhang Z., Hao P.: Effect of poly phosphoric acid (PPA) on creep response of base and polymer modified asphalt binders/mixtures at intermediate-low temperature. *Construction and Building Materials*, **159**, 2018, 329-337, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.087
- [56] Lin P., Huang W., Li Y., Tang N., Xiao F.: Investigation of influence factors on low temperature properties of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, **154**, 2017, 609-622, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.118