

**DAWID RYŚ¹⁾**

ORCID: 0000-0002-7252-8002

PIOTR JASKUŁA²⁾

ORCID: 0000-0002-1563-2778

CEZARY SZYDŁOWSKI³⁾

ORCID: 0000-0002-6141-9839

COMPREHENSIVE TEMPERATURE PERFORMANCE EVALUATION OF ASPHALT MASTICS CONTAINING HYDRATED LIME FILLER BASED ON DYNAMIC SHEAR RHEOMETER TESTING

BADANIA W REOMETRZE DYNAMICZNEGO ŚCINANIA JAKO KOMPLEKSOWA METODA OCENY WŁAŚCIWOŚCI MASTYKSÓW ASFALTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH WAPNO HYDRATYZOWANE W SZEROKIM ZAKRESIE TEMPERATURY

STRESZCZENIE. W artykule przeanalizowano możliwości skutecznego badania właściwości mastyksów asfaltowych w pełnym zakresie wartości temperatury z zastosowaniem reometru dynamicznego ścinania (DSR). Badania przeprowadzono na sześciu różnych mastyksach asfaltowych, aby umożliwić ocenę wpływu wapna hydratyzowanego oraz modyfikacji asfaltu na właściwości mastyksu, zarówno przed starzeniem, jak i po nim. Różne badania przeprowadzone w reometrze dynamicznego ścinania dały obraz właściwości mastyksów w całym zakresie eksploatacyjnych wartości temperatury: od -20°C do 64°C . Test pełzania i nawrotu MSCR wykazał na poziomie obciążenia 3,2 kPa dwukrotnie niższą wartość nieodwracalnej podatności na pełzanie w przypadku mastyksów z wypełniaczem mieszanym (zawierającym mączkę wapienną i wapno hydratyzowane), co wskazuje na ich znacznie wyższą odporność na deformacje trwałe. Test liniowego zwiększania amplitudy LAS wykazał, że trwałość zmęczeniowa obliczona dla odkształcenia 2,5% jest niemal trzykrotnie wyższa dla mastyksów zawierających środek adhezyjny lub wapno hydratyzowane. Właściwości reologiczne mastyksów w niskich wartościach temperatury analizowano na podstawie badań relaksacji. Stwierdzono, że mastyksy z wapnem hydratyzowanym mają nieco niższą zdolność relaksacji naprężeń niż pozostałe mastyksy, zawierające wyłącznie mączkę wapienną.

SŁOWA KLUCZOWE: mastyks asfaltowy, relaksacja naprężeń, reometr dynamicznego ścinania DSR, test liniowego zwiększania amplitudy LAS, test pełzania i nawrotu MSCR, wapno hydratyzowane.

ABSTRACT. The paper focuses on exploring the potential for effective testing of asphalt mastics in the full range of temperatures using the Dynamic Shear Rheometer (DSR) apparatus. Six various types of asphalt mastics were selected to enable the evaluation of the effects of hydrated lime and bitumen modification, both before and after aging. Different DSR tests covered the whole range of service temperatures from -20°C to 64°C . Multiple Stress Creep Recovery test indicated that in the case of mastics with mixed filler (containing hydrated lime) the non-recoverable compliance at the stress level of 3.2 kPa was lower by half indicating much higher resistance to permanent deformations. Linear Amplitude Sweep Test showed that fatigue life calculated at 2.5% strain is almost 3 times greater when adhesive agent or hydrated lime is applied. Low-temperature rheological properties of mastics were investigated based on relaxation tests and it was concluded that mastics with hydrated lime have slightly lower stress relaxation capacity than the remaining mastics with lime filler.

KEYWORDS: ageing, asphalt mastic, dynamic shear rheometer, hydrated lime, Linear Amplitude Sweep, Multiple Stress Creep Recovery, stress relaxation.

DOI: 10.7409/rabdim.024.017

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; dawid.rys@pg.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; piotr.jaskula@pg.edu.pl

³⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; cezary.szydowski@pg.edu.pl

1. WSTĘP

Idea zastosowania reometru dynamicznego ścinania DSR (ang. *Dynamic Shear Rheometer*) do badania mastyksów pojawiła się stosunkowo niedawno. Aparat ten zastosowali w badaniach efektu usztywnienia mastyksu w zależności od zawartości i rodzaju wypełniacza w średnich i wysokich wartościach temperatury m.in. Little i Petersen [1], Jimenez et al. [2], Das i Singh [3, 4], czy Rahim et al. [5], którzy analizowali wpływ starzenia asfaltu. Pozytywny efekt usztywnienia mastyksu w średnich i wysokich wartościach temperatury dzięki zastosowaniu wapna hydratyzowanego wykazano w pracach badawczych opisanych w [1, 4, 6-9]. Aparat DSR zastosowano również niedawno do oceny mastyksów pod względem ich odporności na zmęczenie [10-12]. Niemniej jednak, poza bieżącymi pracami badawczymi autorów [13, 14], nie zastosowano dotąd badań w reometrze DSR prowadzonych w niskich temperaturach (do -20°C) do określenia odporności mastyksów na spękania niskotemperaturowe. Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy i praktyki badawczej, w niniejszym artykule autorzy skupiają się na badaniu właściwości mastyksów asfaltowych w pełnym zakresie temperatur eksploatacyjnych.

Przeprowadzenie badań na mastyksach, nie zaś wyłącznie na pełnych mieszankach asfaltowych, może pozwolić na bardziej kompleksową ocenę wpływu wypełniacza. Niektóre rodzaje wypełniaczy, np. wapno hydratyzowane, zapewniają wyraźne korzyści, które już wielokrotnie wykazano w badaniach [15-20]. Co więcej, wapno hydratyzowane poprawia odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na oddziaływanie wody i mrozu [15, 17, 21] (redukując zjawisko odmywania lepiszcza od ziaren kruszywa), ogranicza efekty utleniania i utwardzania asfaltu [16, 22, 23], zwiększa sztywność mieszanki i ogranicza koleinowanie [18, 24], zwiększa trwałość zmęczeniową, a nawet poprawia odporność na spękania niskotemperaturowe [22, 24, 25]. Wapno hydratyzowane najwyraźniej istotnie zmienia właściwości reologiczne mastyksu (asfalt + wypełniacz) zawartego w mieszance mineralno-asfaltowej, a nawet właściwości samego wypełniacza, wpływając na właściwości eksploatacyjne mieszanki mineralno-asfaltowej w szerokim zakresie temperatur. Nie dziwi zatem znaczące zainteresowanie badaczy samym mastyksem; badania mastyksów są wykonywane szczególnie często w reometrze DSR – pierwotnie przeznaczonym do badań właściwości asfaltów – który pozwala

1. INTRODUCTION

Application of the Dynamic Shear Rheometer (DSR) device in mastic research is a relatively recent advancement. Using this apparatus, the stiffening effect of mastic due to the content and type of filler at high and medium temperatures was studied by Little & Petersen [1], Jimenez et al. [2], Das & Singh [3, 4], and Rahim et al. [5], who studied the impact of bitumen ageing. The positive effects of stiffening of mastic at high and medium temperatures after using hydrated lime in mastic have been demonstrated in the research projects described in [1, 4, 6-9]. The DSR device was also recently used to assess mastics in terms of resistance to fatigue [10-12]. However, tests at low temperatures (within -20°C) have never been used to determine the resistance to low-temperature cracking of mastics in the DSR device – apart from the ongoing research [13, 14]. Taking into consideration the current state of the art, the paper is focused on examining properties of asphalt mastics across the full temperature range.

Conducting assessments on mastic, as opposed to exclusively focusing on asphalt testing, may facilitate a more comprehensive evaluation of the filler's influence. Some types of fillers, e.g. hydrated lime, provide considerable benefits, which have been repeatedly proven in research over the years [15-20]. Moreover, hydrated lime improves the resistance of asphalt mixtures to the detrimental effects of water and frost [15, 17, 21] (by reducing stripping of bitumen film from the aggregate surfaces), reduces oxidation and age-hardening effects [16, 22, 23], increases asphalt mixture stiffness and reduces rutting [18, 24], extends the fatigue life and even improves low-temperature cracking resistance [22, 24, 25]. Hydrated lime seems to significantly change the rheological properties of mastic (filler + bitumen) in the asphalt mixture or even the properties of fine filler, which affect the performance of the asphalt mixture in a wide range of temperatures. This justifies the notable scientific interest in the mastic itself; testing of mastics is performed particularly often using the DSR – originally used to assess properties of bitumens – which significantly reduces the duration of the tests and the demand for test materials.

The paper aims to adopt several test methods that can be performed using a single device, the Dynamic Shear Rheometer, for a comprehensive investigation of asphalt mastics. The choice of asphalt mastics for laboratory tests

na istotne ograniczenie czasu badań i zapotrzebowania na materiały.

W artykule przedstawiono kilka procedur badawczych, które można wykonać na jednym urządzeniu (reometrze dynamicznego ścinania DSR) w celu kompleksowego zbadania właściwości mastyksów asfaltowych. Doboru poszczególnych mastyksów do badań dokonano tak, aby skupić się na zbadaniu wpływu wapna hydratyzowanego na właściwości mastyksów w pełnym zakresie temperatur użytkowych (nie wyłączając temperatur niskich). Poddano ocenie: właściwości opisujące deformacje plastyczne w wysokich wartościach temperatury, właściwości zmęczenia w średnich temperaturach oraz zdolność do relaksacji w niskich temperaturach.

2. METODYKA I BADANIA

2.1. OPIS OGÓLNY EKSPERYMENTU

W pracy zastosowano następujące procedury badawcze:

1. Test pełzania i nawrotu MSCR (ang. *Multiple Stress Creep Recovery*) według AASHTO T 350-19, który wykonano celem określenia odporności mastyksów na deformacje plastyczne.
2. Test liniowego zwiększania amplitudy LAS (ang. *Linear Amplitude Sweep*) według AASHTO T 391-20, który pozwala na ocenę odporności mastyksów na zmęczenie.
3. Test relaksacji naprężeń wg [13], który odzwierciedla niskotemperaturowe właściwości reologiczne.

Uzyskane wyniki zostaną omówione w kontekście wpływu składu mastyksu i jego podstawowych właściwości na jego pracę w poszczególnych zakresach temperatur. Aby uczynić dyskusję bardziej przejrzystą, nagłówki podrozdziałów w rozdziale 3 będą pogrupowane według analizowanych zjawisk, zaś odpowiednie wyniki z poszczególnych procedur badawczych będą przypisane do nich tematycznie.

2.2. MATERIAŁY

Badania laboratoryjne przeprowadzono na sześciu mastyksach asfaltowych, których zestawienie znajduje się w Tabl. 1. Mastyksy te są reprezentatywne dla betonu asfaltowego AC 11 dla warstw ścieralnych, spełniają polskie wymagania techniczne WT-2 [26] i wykazują stały stosunek wypełniacza do lepiszcza F/B równy 1,2 (wagowo). Mastyks referencyjny, oznaczony literą P (od

was focused on investigating the effect of hydrated lime on performance across the entire range of service temperatures (including low temperatures), in order to evaluate: plastic deformation properties at high temperatures, fatigue properties at moderate temperatures, relaxation capacity at low temperatures.

2. METHODOLOGY AND TESTING

2.1. OVERALL DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT

The following test procedures were considered in the study:

1. Multiple Stress Creep Recovery test according to AASHTO T 350-19, which was performed in order to evaluate the resistance of mastics to plastic deformation.
2. Linear Amplitude Sweep test according to AASHTO T 391-20, which enables evaluation of the resistance of mastics to fatigue failure.
3. Relaxation tests according to [13], which indicate the low-temperature rheological properties.

The discussion of the results is focused on identifying the impact of mastic composition and its basic properties on performance in a given service temperature range. To make the discussion section clearer, the headers in section 3 are grouped by the observed phenomena, and the results from particular tests are assigned thematically.

2.2. MATERIALS

Laboratory tests were performed on six asphalt mastics, which are summarised in Table 1. These mastics are representative of asphalt concrete AC 11 for wearing courses, meeting the Polish technical requirements WT-2 [26], with the constant filler to bitumen ratio F/B equal to 1.2 by mass. The reference mastic was designated as P (for “Plain”) and consisted of neat bitumen 50/70 (according to EN 12591) and lime filler. For three mastics with neat bitumen 50/70, a specific part of lime filler was replaced by hydrated lime, to obtain the selected proportions of hydrated lime filler to lime filler (HL/L), equal to 50%, 33% or 20%. The remaining two mastics included liquid adhesive agent, which was added to the bitumen at the quantity of 0.3% (by mass of bitumen). One of the two mastics with the adhesive agent was made using polymer-modified bitumen PmB 45/80-55. The liquid adhesive agent was a tall oil amidopolyamine mixture, with

ang. „Plain”), składał się z asfaltu niemodyfikowanego 50/70 (wg EN 12591) oraz wypełniacza wapiennego. Dla trzech kolejnych mastyksów z asfaltem niemodyfikowanym 50/70 zastąpiono określoną część wypełniacza wapiennego tak, aby osiągnąć założone proporcje wagowe wapnem hydratyzowanym („HL”) do mączki wapiennej („L”) równe: 50%, 33% lub 20%. Dwa ostatnie mastyksy zawierały dodatek płynnego środka adhezyjnego („AA”), który dodano do asfaltu w ilości 0,3% (względem masy asfaltu). Jeden z dwóch mastyksów zawierających środek adhezyjny wykonano z użyciem asfaltu modyfikowanego polimerem PmB 45/80-55. Płynny środek adhezyjny stanowiła mieszanina amidopoliamin oleju talowego o gęstości 0,88 – 0,98 g/cm³ i lepkości dynamicznej 3000 m · Pa · s w temperaturze +20°C. Temperatura mięknienia w badaniu pierścienia i kuli *PiK* dla wszystkich wymienionych kombinacji materiałowych została przedstawiona w Tabl. 1. Z kolei Tabl. 2 przedstawia właściwości wypełniaczy mineralnych stosowanych w badanych mastyksach.

Table 1. Asphalt mastics
Tablica 1. Mastyksy asfaltowe

Material designation Oznaczenie materiału	Bitumen class Klasa asfaltu	Proportion of hydrated lime filler to lime filler [%] Stosunek wapna hydratyzowanego do mączki wapiennej HL/L	Content of adhesive agent [%] Zawartość środka adhezyjnego	Mass proportions [%] ^{a)} Proporcje wagowe ^{a)}				Softening Point <i>R&B</i> [°C] Temperatura mięknienia <i>PiK</i>	
				HL	L	B	AA	Unaged Bez starzenia	After PAV Po PAV
P	50/70	0	0	0.00	54.55	45.45	0.00	56.4	70.9
P + AA	50/70	0	0.3	0.00	54.55	45.31	0.14	56.3	70.8
P + HL50	50/70	50	0	18.18	36.36	45.45	0.00	63.8	76.0
P + HL33	50/70	33	0	13.53	41.01	45.45	0.00	61.0	74.7
P + HL20	50/70	20	0	9.09	45.45	45.45	0.00	58.8	74.1
M + AA	45/80-55	0	0.3	0.00	54.55	45.31	0.14	82.2	78.1

^{a)} HL – hydrated lime / wapno hydratyzowane; L – lime filler / mączka wapienna; B – bitumen / asfalt; AA – adhesive agent / środek adhezyjny

Table 2. Physical properties of mineral fillers
Tablica 2. Właściwości fizyczne wypełniaczy mineralnych

Material designation Oznaczenie materiału	Particle density ρ_f [Mg/m ³] Gęstość ziaren	% Passing / % Przechodzących				
		#1.0	#0.5	#0.25	#0.125	#0.063
Limestone filler Mączka wapienna	2.71	100.0	98.8	98.6	95.7	79.6
Hydrated lime Wapno hydratyzowane	2.31	100.0	100.0	100.0	99.8	99.0

Mastyks zawierający wypełniacz mieszany (zawierający wapno hydratyzowane) wykazywał wyższe temperatury mięknienia *PiK* i był mniej podatny na starzenie niż

the density of 0.88 – 0.98 g/cm³ and dynamic viscosity of 3000 m · Pa · s at +20°C. The ring-and-ball *R&B* softening points for all the material compositions are presented in Table 1. Table 2 presents properties of the mineral fillers used in the tested asphalt mastics.

Mastic containing mixed fillers (with hydrated lime) showed higher *R&B* temperature and it was less susceptible to ageing than the mastic made from a combination of bitumen and standard lime filler. The change in softening point when using the HL/L = 50% ratio was 19%, while with the lime filler it was 25%. Application of adhesive agent had a minor effect on the *R&B* temperature as well as on the change in the *R&B* temperature due to ageing. Interestingly, in the case of the M + AA mastic with polymer modified bitumen, *R&B* temperature decreased after PAV ageing. The selected mastics differ in terms of their basic properties, therefore differences are also to be expected in further performance tests.

mastyks stanowiący tylko połączenie asfaltu i standardowego wypełniacza (mączki wapiennej). Zmiana temperatury mięknięcia dla mastyksu ze stosunkiem HL/L = 50% wyniosła 19%, zaś dla mastyksu z samym wypełniaczem wapiennym: 25%. Zastosowanie środka adhezyjnego miało nieznaczny wpływ na temperaturę mięknięcia w badaniu *PiK*, jak również na jej zmianę pod wpływem starzenia. Co interesujące, w przypadku mastyksu M + AA z asfaltem modyfikowanym temperatura *PiK* zmniejszyła się po starzeniu. Wybrane mastyksy różnią się pod kątem podstawowych właściwości, a zatem różnic należy spodziewać również w wynikach dalszych badań.

2.3. APARAT BADAWCZY DSR

Zastosowany w badaniach reometr dynamicznego ścinania DSR został wyprodukowany przez TA Instrument jako model Discovery HR-3. Urządzenie jest sterowane za pomocą dostarczonego przez producenta oprogramowania Trios. Średnica płytek uzależniona jest od temperatury badania; wynosi ona 25 mm dla badań wykonywanych w temperaturze powyżej 34°C, 8 mm dla badań w temperaturach od 10°C do 34°C, oraz 4 mm dla badań wykonywanych w temperaturze poniżej 10°C. Parametry podatności skrętnej (*compliance*) zostały dostosowane do badania mastyksów i wynosiły:

- dla geometrii z płytkami 4 mm: 1,03 mrad/Nm,
- dla geometrii z płytkami 8 mm: 2,02 mrad/Nm,
- dla geometrii z płytkami 25 mm: 1,58 mrad/Nm.

Szczelina między płytkami wynosi 1 mm dla płytek o średnicy 25 mm, zaś 2 mm dla płytek o średnicach 8 mm i 4 mm. W przypadku badań prowadzonych w temperaturze poniżej 0°C, początkowa szczelina przy montażu próbki wynosi 2 mm, ale może być nieco mniejsza w momencie osiągnięcia temperatury badania, ze względu na siłę osiową, której wartość należy zachować na poziomie 0 N.

2.4. BADANIA W REOMETRZE DYNAMICZNEGO ŚCINANIA

2.4.1. Produkcja próbek i ich montaż w aparacie

Mastyksy były przygotowane w warunkach laboratoryjnych. W pierwszym kroku wysuszono mączkę wapienną i wapno hydratyzowane do osiągnięcia stałej masy w temperaturze 160°C. Następnie suche wypełniacze zmieszano

2.3. INSTRUMENT

The Dynamic Shear Rheometer was produced by TA Instrument as the Discovery HR-3 model. The device is controlled using the producer's software Trios. The diameter of plates depends on the test temperature and equals 25 mm for tests performed above 34°C, 8 mm for tests at temperatures ranging from 10°C to 34°C, and 4 mm for test temperatures below 10°C. The compliance parameters were adjusted to the asphalt mastics and were as follows:

- 4-mm geometry: 1.03 mrad/Nm,
- 8-mm geometry: 2.02 mrad/Nm,
- 25-mm geometry: 1.58 mrad/Nm.

The gap between the plates equals 1 mm for the 25-mm geometry and 2 mm for the 8-mm and 4-mm geometries. In the case of tests performed at temperatures below 0°C, the initial gap at specimen installation equals 2 mm, but it may be slightly lower when the test temperature is reached, due to axial force, which should be kept at 0 N.

2.4. DYNAMIC SHEAR RHEOMETER TESTS

2.4.1. Specimen manufacturing and installation

The mastics were prepared in laboratory conditions. In the first step, the limestone filler and hydrated lime were dried to constant mass at 160°C. Then, the dry fillers were mixed in fixed mass proportions and reheated to 160°C. The last step was to add the mixed filler to the bitumen heated to 160°C. The filler was dosed continuously, with simultaneous mixing using a manual stirrer. The temperature was maintained at 160°C during stirring. The mixing process was finished when a uniform consistency of the mastic was obtained, without any visible lumps of the filler. If a liquid adhesive agent was used, it was dosed into the binder prior to mixing with the filler. The prepared mastics were placed in moulds with silicone paper and left to cool, while the samples for softening point testing were poured into the rings. Immediately after mixing, a portion of the prepared mastic (2 × 50 g for each variant) was placed in long-term ageing pans in a Pressure Ageing Vessel (PAV) device. The long-term ageing procedure was carried out according to EN 14769. Ageing

w założonych proporcjach i ponownie podgrzano do 160°C. Ostatni krok polegał na dodaniu otrzymanych wypełniaczy do asfaltu podgrzanego do temperatury 160°C. Wypełniacz dozowano w sposób ciągły, jednocześnie mieszając mastyks mieszadłem ręcznym. Podczas mieszania podtrzymywano temperaturę 160°C. Proces mieszania kończono po uzyskaniu jednolitej konsystencji mastyksu, bez żadnych widocznych grudek wypełniacza. W przypadku zastosowania płynnego środka adhezyjnego dozowano go do lepiszcza przed dodaniem wypełniacza. Przygotowane mastyksy umieszczono w formach wyłożonych papierem silikonowym i pozostawiono do ostygnięcia, zaś próbki do badań temperatury mięknięcia wiano do pierścieni. Bezpośrednio po mieszanii część każdego mastyksu (2×50 g dla każdego wariantu) umieszczono w tackach przeznaczonych do starzenia długoterminowego w komorze PAV (ang. *Pressure Ageing Vessel*). Procedurę przyspieszonego starzenia długoterminowego przeprowadzono zgodnie z normą EN 14769. Starzenie prowadzono przez 20 godzin w temperaturze 100°C i ciśnieniu 2,1 MPa.

W przypadku lepiszcza asfaltowego starzenie długoterminowe PAV jest zazwyczaj poprzedzone symulacją starzenia technologicznego w suszarce RTFO (ang. *Rolling Thin-Film Oven*) w temperaturze 163°C. Niemniej jednak, autorzy postanowili pominąć ten etap ze względu na następujące przyczyny:

- mastyksy doznały częściowego starzenia technologicznego w procesie mieszania,
- RTFOT to metoda starzenia, w której podczas wirowania materiał tworzy cienką warstwę; grubość tej warstwy jest jednak wyraźnie uzależniona od lepkości materiału. A zatem, podczas badania RTFOT mastyks jest mniej intensywnie poddawany oddziaływaniu gorącego powietrza ze względu odmienną grubość powstałej cienkiej warstwy determinowaną przez lepkość materiału. Mogłoby to prowadzić do błędnej interpretacji, że wypełniacze ograniczają starzenie asfaltu [27, 28].

Małe porcje (łyżka, ok. 5 g) mastyksów asfaltowych podgrzewano do temperatury 160°C i wlewano do silikonowych form z cylindrycznymi zagłębieniami o średnicy 25 mm lub 8 mm oraz głębokości 1,5 mm lub 2,5 mm. Następnie pozostawiono próbki do ostudzenia w temperaturze pokojowej. Próbki cylindryczne montowano w reometrze DSR, rozgrzany do temperatury instalacji

was performed at 100°C for 20 hours at the pressure of 2.1 MPa.

Typically, in the case of asphalt binder, long-term ageing simulation in PAV device is preceded by short-term ageing simulation in Rolling Thin-Film Oven (RTFO) at 163°C. However, the authors decided to omit this stage due to the following reasons:

- mastics were subjected to partial short-term ageing during the blending process,
- RTFOT is an ageing test in which material forms a rotating film during ageing; thickness of the film is heavily dependent on viscosity. Consequently, when mastic is tested with RTFOT, it is less exposed to hot air compared to bitumen, due to the different film thicknesses determined by their viscosities. This can lead to the incorrect interpretation that fillers mitigate bitumen ageing [27, 28].

Small portions (spoonful, approx. 5 g) of asphalt mastics were heated to the temperature of 160°C and then poured into silicone moulds with cylindrical cavities of 25 mm or 8 mm in diameter and 1.5 mm or 2.5 mm in depth. Thereafter, the specimens cooled down to room temperature. Cylindrical specimens were then mounted in the DSR, which was heated to the installation temperature of 70°C. Excess material was trimmed to the trimming gap, which is 0.05 mm greater than the geometry gap.

In the case of tests using the 4-mm-diameter plates, the procedure of specimen installation was different. A special silicone mould was applied on the lower steel plate first, and then the plates were heated up to 70°C. Then liquid mastics, heated to approximately 160°C, were poured into the silicone mould. In further steps, the top surface of specimen was trimmed to the level of the silicone mould with a heated metal spatula and then the upper steel plate was instantly lowered to reach the trimming gap of 2.05 mm. After the chamber had been cooled to 10°C, the silicon mould was disassembled and the geometry gap of 2 mm was reached.

2.4.2. Multiple Stress Creep Recovery test

The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test was developed to improve asphalt binder performance grading due to the susceptibility of binder to permanent deformation [29]. Test protocol was adopted after the European Standard EN 16659:2016. In total, 20 load-recovery cycles

cyjnej 70°C. Nadmiar materiału usuwano aż do uzyskania „odstępu przycięcia” większego o 0,05 mm niż szczelina opisana w zadanej geometrii.

W przypadku badań z zastosowaniem płytek o średnicy 4 mm procedura montażu była inna. Najpierw na dolnej płycie stalowej umieszczano specjalną formę silikonową, po czym rozgrzewano płytki do 70°C. Następnie płynny mastyks, rozgrzany do ok. 160°C, wlewano do formy silikonowej. W kolejnych krokach górną powierzchnię próbki przycinano za pomocą rozgrzanej metalowej szpatułki, doprowadzając do jej wyrównania z krawędziami silikonowej formy. Następnie natychmiast opuszczano górną płytkę do uzyskania odstępu 2,05 mm. Po wychłodzeniu komory do 10°C demontowano formę silikonową i używano założoną w geometrii szczelinę 2 mm.

2.4.2. Test pełzania i nawrotu MSCR

Test pełzania i nawrotu MSCR (ang. *Multiple Stress Creep Recovery*) został opracowany w celu poprawy klasyfikacji asfaltów pod względem odporności na deformacje trwałe [29]. Protokół badawczy został przyjęty zgodnie z Normą Europejską EN 16659:2016. Podczas badania próbka poddana jest łącznie 20 cyklom obciążania-odprężania. Na każdy cykl składa się faza obciążania (pełzania) o czasie trwania 1 s oraz faza odprężania (nawrotu przy zerowym naprężeniu) o czasie trwania 9 s. Stosowane są naprężenia ścinające na dwóch poziomach: 0,1 kPa w pierwszych 10 cyklach oraz 3,2 kPa w kolejnych 10 cyklach. Badania prowadzono w temperaturze 58°C, która odpowiada ekstremalnej górnej temperaturze nawierzchni w klimacie umiarkowanym. Wynik badania stanowią poniższe parametry, oznaczone według równań (1)-(3):

$$R_{\tau} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_1}, \quad (1)$$

$$J_{nr, \tau} = \frac{\varepsilon_{10}}{\tau}, \quad (2)$$

gdzie:

R – procentowy nawrót [%],

ε_1 – wzrost odkształcenia po jednosekundowym okresie obciążenia (na koniec fazy pełzania) [-],

ε_{10} – trwała część odkształcenia po całym 10-sekundowym cyklu (na koniec fazy odprężania) [-],

J_{nr} – nieodwracalna podatność na pełzanie [1/kPa],

τ – przyłożone naprężenie ścinające [kPa].

are applied during the test. Each creep-recovery cycle includes a 1-s creep period with constant stress and a 9-s recovery period with zero stress. Two shear stresses are applied: 0.1 kPa in the 10 initial cycles and 3.2 kPa in the remaining 10 cycles. Tests were performed at the temperature of 58°C, which corresponds to the extreme upper pavement temperatures in moderate climate zones. As the result of the test, parameters given in equations (1)-(3) are reported:

$$R_{\tau} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_1}, \quad (1)$$

$$J_{nr, \tau} = \frac{\varepsilon_{10}}{\tau}, \quad (2)$$

where:

R – percent recovery [%],

ε_1 – increase in strain after 1 s of load cycle (at the end of the creep phase of the cycle) [-],

ε_{10} – residual strain after the entire 10-s cycle (at the end of the recovery phase) [-],

J_{nr} – non-recoverable compliance [1/kPa],

τ – applied shear stress [kPa].

The percent recovery R and non-recoverable creep compliance J_{nr} are reported as the average of the last ten test cycles at each stress level and are used as indicators of binder resistance to permanent deformation. The sensitivity to stress level is expressed by the parameter $J_{nr \text{ diff}}$, which is calculated according to formula:

$$J_{nr \text{ diff}} = \frac{J_{nr \text{ 3,2 kPa}} - J_{nr \text{ 0,1 kPa}}}{J_{nr \text{ 0,1 kPa}}}, \quad (3)$$

where:

$J_{nr \text{ diff}}$ – the relative difference in non-recoverable creep compliance (the subscripts represent shear stress levels).

The general meaning of non-recoverable compliance is that with an increase in J_{nr} , the resistance of bituminous material to permanent deformation decreases. According to the AASHTO MP-19-10 standard, the $J_{nr \text{ 3,2 kPa}}$ value should not exceed 0.5 kPa⁻¹ when bitumen is used for areas subjected to extreme traffic loads. At the same time, the stress sensitivity of bitumen expressed by $J_{nr \text{ diff}}$ should be less than 75%.

Procentowy nawrót R oraz nieodwracalna podatność na pełzanie J_{nr} raportowane są jako średnia z ostatnich dziesięciu cykli na każdym poziomie naprężeń. Odzwierciedlają one odporność lepiszcza na deformacje trwałe. Wrażliwość na poziom naprężeń wyraża z kolei parametr $J_{nr\ diff}$, który oblicza się według poniższego wzoru:

$$J_{nr\ diff} = \frac{J_{nr\ 3,2\ kPa} - J_{nr\ 0,1\ kPa}}{J_{nr\ 0,1\ kPa}}, \quad (3)$$

gdzie:

$J_{nr\ diff}$ – różnica względna wartości nieodwracalnej podatności na pełzanie (indeksy dolne oznaczają poziomy naprężenia ścinającego).

Ogólna interpretacja nieodwracalnej podatności na pełzanie jest taka, że wzrost J_{nr} oznacza spadek odporności materiału na deformacje trwałe. Według normy AASHTO MP-19-10 wartość $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ nie powinna przekraczać $0,5\ kPa^{-1}$, jeśli asfalt jest przeznaczony do zastosowania na powierzchniach narażonych na ekstremalne obciążenie ruchem. Jednocześnie wrażliwość na poziom naprężeń wyrażona wartością $J_{nr\ diff}$ powinna być poniżej 75%.

2.4.3. Test liniowego zwiększania amplitudy LAS

Test liniowego zwiększania amplitudy LAS (ang. *Linear Amplitude Sweep*) został pierwotnie opracowany przez zespół prof. Bahii z Uniwersytetu Wisconsin [30-32] z myślą o ocenie właściwości zmęczeniowych lepiszczy asfaltowych. Protokół badawczy oraz arkusz kalkulacyjny wprowadzono w 2012 r., gdy opublikowana została tymczasowa norma AASHTO TP 101-12. Wersję rozwojową wprowadzono w 2014 r. w normie TP 101-14, zaś najnowszą wersję wprowadzono w normie stałej AASHTO T391. Autorzy niniejszej pracy zaadoptowali i przeanalizowali test LAS w swoich badaniach; bardziej szczegółowo został opisany w poprzednich pracach [33]. Na procedurę badawczą składają się dwa etapy: faza zwiększania częstotliwości oraz faza zwiększania amplitudy. Celem pierwszej fazy jest określenie parametru m , który jest potrzebny do dalszych analiz obliczeniowych. W próbie generowane jest odkształcenie ścinające o stałej amplitudzie 0,1%, podczas gdy częstotliwość skrętna wzrasta stopniowo w następującej sekwencji: od 0,2 Hz do 1,0 Hz w krokach co 0,2 Hz; od 2,0 Hz do 10,0 Hz w krokach co 2 Hz; a wreszcie do 20,0 Hz oraz do 30,0 Hz. Na każdym poziomie rejestrowany jest zespolony moduł ścinania

2.4.3. Linear Amplitude Sweep test

The Linear Amplitude Sweep (LAS) was originally developed by Prof. Bahia's team at the University of Wisconsin [30-32] for evaluating fatigue properties of asphalt binders. The test protocol and spreadsheet were introduced in 2012, when the AASHTO provisional standard TP 101-12 was published. Developing version was introduced in 2014 in the TP 101-14 standard and the latest version was introduced by AASHTO as the permanent standard AASHTO T391. The LAS test was adopted and analysed by the authors; it is described in greater detail in previous studies [33]. The procedure consists of two stages: a frequency sweep and an amplitude sweep. The aim of the frequency sweep stage is to determine the parameter m , which is needed for further computational analysis. A constant shear strain amounting to 0.1% is generated in the sample, while the torsion frequency gradually increases in the following sequence: from 0.2 Hz to 1.0 Hz at every 0.2 Hz, from 2.0 Hz up to 10.0 Hz at every 2 Hz, and then to 20.0 Hz and 30.0 Hz. The complex shear modulus and the phase angle are registered in each test step. In the second stage (the amplitude sweep) of the test, the damage (parameter D_f) induced by the cyclic loading of the sample is determined. The asphalt binder sample is twisted at a constant frequency of 10 Hz. The loading process according to TP 101-12 and T391 consists of ten-second intervals, each with a set strain, which is tantamount to 100 load cycles per strain level, each successive cycle causing greater deformation of the sample. The set successive shear strains are as follows: 0.1% as the initial level and then from 1.0% to 30%, gradually increased by 1%. However, the authors used the approach given in the TP 101-14 standard, where shear strain increases continuously. Regardless of the loading mode, the sample is subjected to 3100 load cycles in total.

The LAS test is based on the theory of viscoelastic continuum damage (VECD) mechanics. The VECD theory is based on the analysis of deviations from the viscoelastic behaviour and the reduction in stiffness with advancing damage. The fatigue model (4), which is developed on the basis of experimental data and VECD theory, enables prediction of fatigue life for a given strain level.

$$N_f = A (\gamma_{max})^B, \quad (4)$$

where:

N_f – fatigue life (number of cycles to failure) [–],

oraz kąt przesunięcia fazowego. W drugiej fazie (wzrostu amplitudy) określa się skumulowany poziom zmęczenia (parametr D_f) wywołany przez cykliczne obciążenia próbki. Próbka lepiszcza skręcana jest ze stałą częstotliwością 10 Hz. Procedura obciążania zgodnie z TP 101-12 oraz T391 składa się z dziesięciosekundowych interwałów – z zadaniem poziomem amplitudy odkształcenia na każdym z nich – co przekłada się na 100 cykli obciążenia na każdym poziomie amplitudy odkształcenia; każdy kolejny cykl wywołuje większą deformację próbki. Zadane kolejne poziomy odkształcenia ścinającego są następujące: 0,1% na poziomie początkowym, a następnie stopniowy wzrost od 1,0% do 30%, z krokiem 1%. Niemniej jednak, autorzy wykorzystali podejście badawcze przedstawione w normie TP 101-14 gdzie odkształcenie ścinające wzrasta w sposób ciągły. Bez względu na wybrany tryb obciążeń, próbka poddana jest łącznie 3100 cyklom obciążenia.

Test LAS oparty jest na teorii lepkosprężystej mechaniki zniszczenia VECD (ang. *viscoelastic continuum damage*), która oparta jest na analizie odchylenia od zachowania lepkosprężystego oraz redukcji sztywności materiału wraz z postępowaniem szkody zmęczeniowej. Model zmęczeniowy (4), opracowany na podstawie danych eksperymentalnych oraz teorii VECD, pozwala na przewidywanie wytrzymałości zmęczeniowej dla dowolnego poziomu odkształceń.

$$N_f = A (\gamma_{\max})^B, \quad (4)$$

gdzie:

N_f – trwałość zmęczeniowa (liczba cykli do zniszczenia) [–],

γ_{\max} – maksymalne odkształcenie ścinające [–],

A, B – współczynniki modelu zmęczeniowego wg równań (5) i (6):

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha}, \quad (5)$$

$$B = -2\alpha, \quad (6)$$

gdzie:

f – częstotliwość [Hz],

$$k = 1 + (1 - C_2) \alpha, \quad \alpha = 1 + \frac{1}{m},$$

m – nachylenie wykresu częstotliwość-moduł ścinania,

γ_{\max} – the maximum shear strain [–],

A, B – fatigue model coefficients according to equations (5) and (6):

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha}, \quad (5)$$

$$B = -2\alpha, \quad (6)$$

where:

f – frequency [Hz],

$$k = 1 + (1 - C_2) \alpha, \quad \alpha = 1 + \frac{1}{m},$$

m – the slope of the frequency-shear modulus graph,

D_f – damage accumulation at the instant of sample failure $D_f = \left(\frac{C_0 - C}{C_1}\right)^{\frac{1}{C_2}}$,

C – material integrity coefficient,

$C_0 = 1$ – the mean material integrity value at the sample strain of 0.1%,

C_1, C_2 – the computational coefficients of the model fitted to the test results.

It must be noted that both procedures and approaches in determination of the A and B parameters changed during the development of the LAS test; a more detailed clarification is available in [32]. The authors used the approach given in the AASHTO TP 101-14 standard and the Excel spreadsheet version 1.57. The choice is justified by the observation that the fit of the VECD damage curve for asphalt mastic obtained using the TP 101-14 protocol is more adequate than that obtained using the T391 protocol.

Fatigue testing of asphalt mastic in the Dynamic Shear Rheometer can be problematic due to delamination of the specimen from the steel plate. The problem was described in greater detail by Hospodka et al. [34], who proposed a hyperbolic specimen shape instead of the cylindrical 8-mm shape. According to studies [10, 34], hyperbolic specimen shape prevents failure at the interface of the test geometry and mastic specimen due to high stiffness. However, some previous experiences have shown that problems with bulging and delamination can be minimised within the range of the G^* modulus values from 2 MPa to 80 MPa. Therefore, the test temperature of 20°C was chosen, for which G^* is approximately between 50 MPa and 70 MPa.

D_f – skumulowany poziom zmęczenia w chwili zniszczenia próbki $D_f = \left(\frac{C_0 - C}{C_1}\right)^{\frac{1}{C_2}}$,

C – współczynnik integralności materiału,

$C_0 = 1$ – średnia wartość integralności materiału przy odkształceniu próbki 0,1%,

C_1, C_2 – współczynniki obliczeniowe modelu dopasowanego do wyników badania.

Należy zaznaczyć, że procedury i podejście do wyznaczania wartości parametrów A i B zmieniły się podczas rozwoju badania LAS; bardziej szczegółowe wyjaśnienia dostępne są w [32]. Autorzy wykorzystali podejście podane w normie AASHTO TP 101-14 oraz powiązany arkusz obliczeniowy Excel w wersji 1.57. Wybór ten uzasadniony jest obserwacją, że dla mastyksu asfaltowego dopasowanie krzywej zmęczeniowej VECD uzyskane za pomocą protokołu TP 101-14 jest bliższe rzeczywistości niż uzyskane za pomocą protokołu T391.

Badanie zmęczenia mastyksu asfaltowego w reometrze dynamicznego ścinania może być problematyczne ze względu na odspojenie próbki od płytki stalowej. Problem opisali bardziej szczegółowo Hospodka et al. [34], proponując zastosowanie hiperbolicznego kształtu próbki zamiast cylindrycznego o średnicy 8 mm. Według badań [10, 34] hiperboliczny kształt próbki zapobiega zniszczeniu na styku między oprzyrządowaniem (płytkami) a próbką mastyksu. Niemniej jednak, niektóre wcześniejsze doświadczenia pokazują, że problem wybrzuszenia i odspojenia może być zminimalizowany w zakresie wartości modułu G^* od 2 MPa do 80 MPa. W związku z tym wybrano temperaturę badania 20°C, dla której G^* wynosi w przybliżeniu od 50 MPa do 70 MPa.

2.4.4. Test relaksacji naprężeń

W mechanice materiałów określenie „relaksacja” odnosi się do opóźnionego spadku naprężenia przy zadanym stałym odkształceniu. Badanie relaksacji naprężeń asfaltów i mastyksów asfaltowych w reometrze DSR zostało opisane w szczegółach w [13, 14]. Po montażu próbki następuje jej kondycjonowanie do wybranej temperatury badania (w tym przypadku –20°C) przez 30 minut. Istotne jest kontrolowanie siły normalnej oraz kompensowanie szczeliny ze względu na skurcz termiczny próbki. Następnie poddaje się próbkę stałemu odkształceniu poprzez quasi-statyczną deformację skrętną górnej płytki. Wartość

2.4.4. Relaxation test

In material science the term “relaxation” means a delayed decrease in stress with an applied constant strain. The relaxation test in the DSR for bitumen and asphalt mastics is described in detail in [13, 14]. After installation of the specimen, it is conditioned to the chosen test temperature (–20°C in the considered study) for 30 minutes. It is important to control the normal force and to compensate the gap to account for thermal shrinkage of the specimen. Next, constant shear strain is applied to the specimen by quasi-static shear deformation of the upper measuring plate. The value of the applied shear strain equalled 0.1% or 1.0% and it was reached in 10 s. Finally, the shear strain is held constant for 60 minutes, while the diminishing shear stress is recorded. The resolution of data acquisition at the beginning of the test equals 0.1 s for the first 100 data points, and then the resolution is multiplied by a factor of 2 per every 100 data points. A total number of 841 data points is collected during the test.

The proportional stress relaxation is defined as the relative difference between the maximum shear stress value τ_{\max} and the shear stress after 60 minutes τ_{60} :

$$\text{stress relaxation after 60 min} = \frac{\tau_{\max} - \tau_{60}}{\tau_{\max}} \cdot 100 [\%]. \quad (7)$$

In further analysis of low-temperature properties, stress relaxation is analysed in combination with the complex modulus measured at the same temperature of –20°C and at a low frequency of 0.02 Hz. Higher value of the complex modulus favours generation of tensile stress in the asphalt pavement, while higher stress relaxation leads to a reduction in the final stresses.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. RESISTANCE OF ASPHALT MASTICS TO PLASTIC DEFORMATION

The course of the MSCR test for three examples of asphalt mastics is presented in Fig. 1. It clearly indicates that mastics differ in terms of resistance to permanent deformation. It was observed that filler including hydrated lime positively reduced permanent strain of the P + HL50 mastic in comparison to plain mastic P (which included mineral lime only); it is visible particularly well in the total strain at the end of the test. Mastic with modified bitumen displayed the lowest residual strain. Moreover, mastic

przyłożonego odkształcenia ścinającego wynosiła 0,1% lub 1,0% i była osiągana w ciągu 10 s. Ostatecznie odkształcenie ścinające utrzymuje się na zadanym poziomie przez 60 minut, rejestrując malejące naprężenia ścinające. Odstęp czasowy między rejestracją kolejnych punktów danych wynosi 0,1 s na początku testu (pierwszych 100 punktów danych); następnie odstęp mnoży się przez współczynnik 2 co każde 100 punktów danych. W rezultacie podczas badania dochodzi do rejestracji 841 punktów danych.

Proporcjonalna relaksacja naprężeń zdefiniowana jest jako różnica względna między maksymalną wartością naprężeń ścinających τ_{\max} a naprężeniami ścinającymi po 60 minutach τ_{60} :

$$\text{relaksacja naprężeń po 60 min} = \frac{\tau_{\max} - \tau_{60}}{\tau_{\max}} \cdot 100 [\%]. \quad (7)$$

W dalszych analizach właściwości niskotemperaturowych relaksacja naprężeń będzie rozpatrywana w zestawieniu z modułem zespolonym pomierzonym przy tej samej temperaturze -20°C oraz niskiej częstotliwości 0,02 Hz. Wyższe wartości modułu zespolonego sprzyjają generowaniu naprężeń rozciągających w nawierzchni asfaltowej, zaś wyższa relaksacja prowadzi do redukcji ostatecznych naprężeń.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

3.1. ODPORNOŚĆ MASTYKSÓW ASFALTOWYCH NA DEFORMACJE TRWAŁE

Na Rys. 1 przedstawiono przebieg badania MSCR na przykładzie trzech mastyksów asfaltowych. Jasno wynika z niego, że mastyksy wykazują zróżnicowaną odporność na deformacje trwałe. Zaobserwowano, że wypełniacz z zawartością wapna hydratyzowanego pozytywnie wpłynął na redukcję odkształcenia trwałego mastyksu P + HL50 w porównaniu z mastyksem standardowym P (w którym wypełniacz stanowiła wyłącznie mączka wapienna); jest to widoczne szczególnie dobrze po wartościach całkowitych odkształceń pomierzonych na koniec badania. Mastyks z asfaltem modyfikowanym wykazywał najmniejsze odkształcenia resztkowe. Co więcej, mastyks z asfaltem modyfikowanym (M + AA) wykazywał znaczny nawrót w fazach odprężania, w przeciwieństwie do mastyksu z asfaltem drogowym (niemodyfikowanym) (P), w którego przypadku

with modified bitumen (M + AA) recovered strain in the recovery periods, while mastic with neat bitumen (P) did not, as visible in the plateaus of strains in the recovery periods. Mastic with hydrated lime P + HL50 recover strain partially, but its effectiveness was not as pronounced as in the case of mastic with modified bitumen (M + AA). A more detailed investigation was performed based on the parameters $J_{nr,3.2}$ and $J_{nr,diff}$, which are presented in Fig. 2.

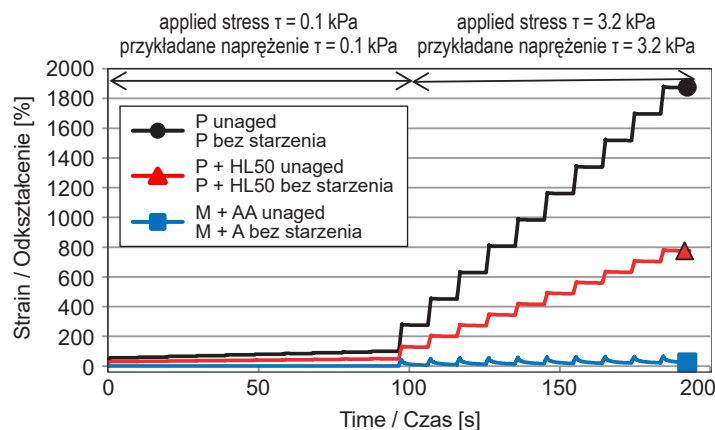


Fig. 1. Comparison of strain in successive load cycles during the MSCR tests for three types of mastics before ageing
Rys. 1. Porównanie odkształceń w kolejnych cyklach badania MSCR dla trzech mastyksów przed starzeniem

Fig. 2 presents recovery parameter R at the stress of 0.1 kPa and 3.2 kPa as well as non-recoverable creep compliance (J_{nr}) and the relative differences in non-recoverable creep compliance for the two stress levels of 3.2 kPa and 0.1 kPa ($J_{nr,diff}$). The AASHTO specification TP 70 gives the maximum values of $J_{nr,3.2\text{ kPa}}$ and $J_{nr,diff}$ for bitumen after RTFOT ageing, depending on traffic load. The most restrictive criterion is determined for extremely heavy traffic load category E, which means over 30 million 80-kN ESALs (Equivalent Standard Axle Loads); the accepted maximum values equal $J_{nr,3.2\text{ kPa max}} = 0.5\text{ kPa}^{-1}$ and $J_{nr,diff max} = 75\%$, at test temperature equal to the upper performance grade (58°C in the considered case). Results of the MSCR tests of mastics should not be compared directly to those criteria due to the differences in the ageing process and in the material itself. However, some findings can be formulated:

- Non-recoverable compliance J_{nr} for mastic is much lower than for bitumen. Results of $J_{nr,3.2}$ for most mastics with neat bitumen before ageing are below 0.5 kPa^{-1} .

widać wypłaszczenia wykresu odkształceń w fazach odprężania. Mastyks z wapnem hydratyzowanym P+HL50 wykazywał częściowy nawrót, ale zjawisko to nie było tak wyraźne jak w przypadku mastyksu z asfaltem modyfikowanym (M+AA). Bardziej szczegółową analizę przeprowadzono na podstawie parametrów $J_{nr,3,2}$ oraz $J_{nr,diff}$, które przedstawione są na Rys. 2.

- When neat bitumen is used, ageing of mastics in PAV causes significant increase in recovery parameters and a decrease in J_{nr} by an approximate factor of 10; it does not affect the $J_{nr,diff}$ parameter. The elasticity of mastics with neat bitumen increases after PAV ageing regardless of the type of filler.

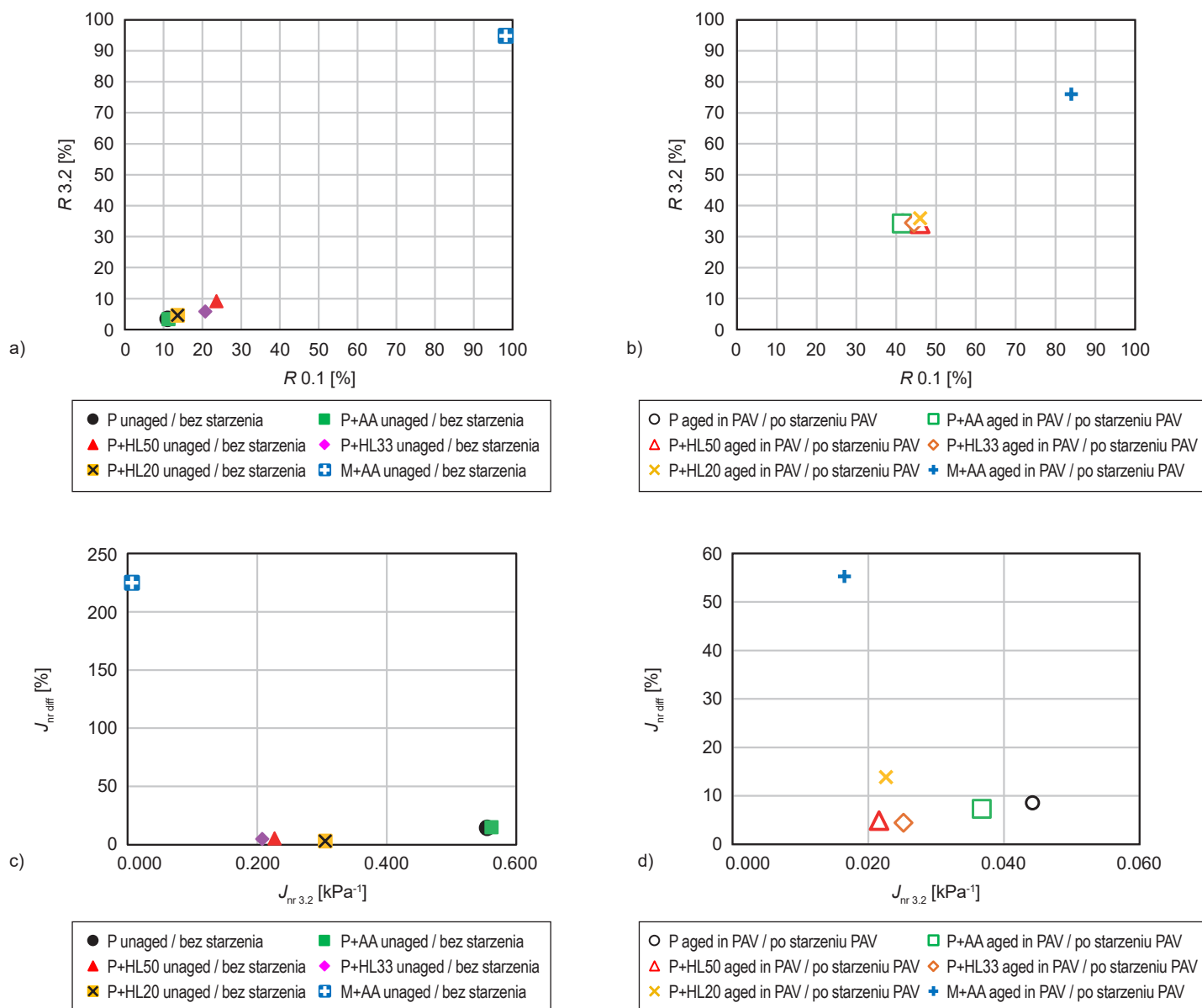


Fig. 2. Results of the MSCR test on asphalt mastics: a), b) recovery parameters $R_{3,2}$ vs $R_{0,1}$; c), d) creep compliance $J_{nr,3,2}$ and $J_{nr,diff}$; diagrams: a), c) test before ageing; b), d) test after ageing in PAV
Rys. 2. Wyniki testu MSCR mastyksów asfaltowych: a), b) parametry nawrotu $R_{3,2}$ vs. $R_{0,1}$; c), d) nieodwracalna podatność na pełzanie $J_{nr,3,2}$ oraz $J_{nr,diff}$; wykresy: a), c) dotyczą badania przed starzeniem; b), d) dotyczą badania po starzeniu PAV

Na Rys. 2 przedstawiono parametr nawrotu R przy naprężeniach 0,1 kPa i 3,2 kPa, jak również nieodwracalną podatność na pełzanie (J_{nr}) oraz jej względną różnicę ($J_{nr\ diff}$) między dwoma poziomami naprężeń: 3,2 kPa oraz 0,1 kPa. Specyfikacja AASHTO TP 70 określa maksymalne wartości $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ oraz $J_{nr\ diff}$ dla lepiszczy po starzeniu RTFOT, w zależności od obciążenia ruchem. Najbardziej restrykcyjne kryterium zdefiniowane jest dla ekstremalnie wysokiego obciążenia ruchem – kategorii E, która oznacza ponad 30 milionów przejazdów równoważnych osi standardowych 80 kN; akceptowalne wartości maksymalne wynoszą $J_{nr\ 3,2\ max} = 0,5\ kPa^{-1}$ oraz $J_{nr\ diff\ max} = 75\%$, przy temperaturze badania równej górnej wartości temperatury wg oznaczenia rodzaju funkcjonalnego (*Performance Grade*) – w tym przypadku 58°C. Wyniki badań MSCR mastyksów nie powinny być zestawiane bezpośrednio z tymi kryteriami ze względu na różnice w procesie starzenia o właściwościach samego materiału. Niemniej jednak, możliwe jest sformułowanie pewnych spostrzeżeń:

- Nieodwracalna podatność na pełzanie J_{nr} dla mastyksu jest dużo niższa niż dla asfaltu. Uzyskane wyniki $J_{nr\ 3,2}$ dla większości mastyksów z asfaltem drogowym (niemodyfikowanym) przed starzeniem wyniosły poniżej 0,5 kPa⁻¹.
- Przy zastosowaniu asfaltu drogowego (niemodyfikowanego) starzenie PAV mastyksów powoduje istotny wzrost parametrów nawrotu oraz około 10-krotny spadek J_{nr} ; nie ma natomiast wpływu na parametr $J_{nr\ diff}$. Sprężystość mastyksów z asfaltem drogowym (niemodyfikowanym) wzrasta po starzeniu PAV bez względu na rodzaj wypełniacza.
- Z kolei w przypadku mastyksu z asfaltem modyfikowanym M+AA starzenie PAV spowodowało spadek parametru nawrotu oraz wzrost $J_{nr\ 3,2}$ z 0,007 kPa⁻¹ do 0,017 kPa⁻¹; nastąpił również spadek $J_{nr\ diff}$ z 225% do 55%. Może to świadczyć o rozpadzie sieci polimerowej w mastyksie pod wpływem procesu starzenia.
- Mastyksy z wypełniaczami mieszanymi (zawierającymi wapno hydratyzowane: P + HL20, P + HL33 oraz P + HL50) są dużo bardziej odporne na deformacje plastyczne niż mastyksy z samą mączką wapienną (P oraz P + AA), na co wskazuje dwukrotnie niższa wartość $J_{nr\ 3,2}$.
- In contrast, in the case of mastic with polymer-modified bitumen M + AA, PAV ageing caused a decrease in recovery parameter and an increase in $J_{nr\ 3,2}$ from 0.007 kPa⁻¹ to 0.017 kPa⁻¹; there was also a decrease in $J_{nr\ diff}$ from 225% to 55%. It may indicate that polymer network disintegrates in mastic due to the ageing process.
- Mastics with mixed filler, containing hydrated lime (P + HL20, P + HL33 and P + HL50) are much more resistant to plastic deformation than mastics with lime filler (P and P + AA), as indicated by $J_{nr\ 3,2}$, which was two times lower.
- Before ageing, mastic with polymer-modified bitumen M + AA is much more resistant to plastic deformation than the remaining mastics with neat bitumen, which may be concluded on the basis of $J_{nr\ 3,2}$. After PAV ageing, the differences in $J_{nr\ 3,2}$ between the mastic M + AA and the mastics P + HL50, P + HL33, P + HL20 are much lower (0.017 kPa⁻¹ vs 0.022 – 0.025 kPa⁻¹).
- The increase in stress level leads to significant differences in J_{nr} for the mastic M + AA with modified binder. When the stress grows to 3.2 kPa, a sharp reduction in elastic recovery is observed in the M + AA mastic, while a relatively stable recovery is observed in the case of the remaining mastics with unmodified binders.

3.2. EFFECT OF ADHESIVE AGENTS AND BITUMEN MODIFICATION ON MASTIC FATIGUE

Results obtained from the Linear Amplitude Sweep test are presented in Fig. 3a for each of the considered mastics after ageing in PAV. Fig 3a shows the change in effective shear stress in successive load cycles, as the effective shear strain gradually increases. It should be noted that the test protocol assumed an increase in shear strain up to 30%, but all mastics with neat bitumen failed before reaching the maximum shear strain. Only the mastic M + AA with polymer-modified binder sustained the growing shear strain until the assumed maximum value was reached. The raw test data were processed using the spreadsheet version 1.57, available at [32]; parameters A and B of the fatigue model are presented in Figs 3b and 3c, respectively. It is important to note that the issue of delamination was successfully avoided and each specimen failed due to development of interior cracks. This was achieved after several trials and selection of the test

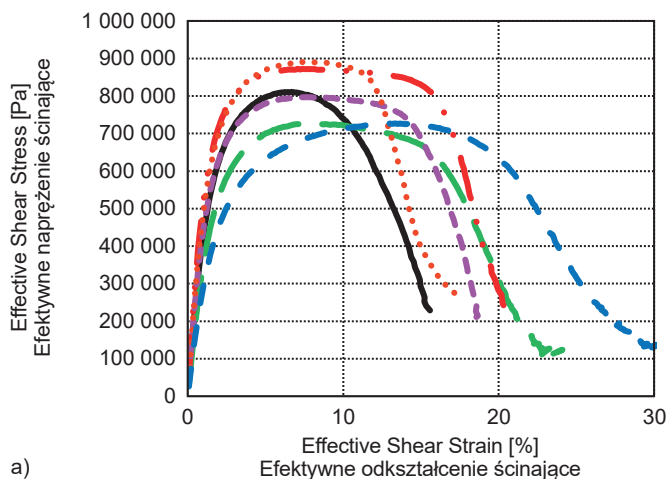
- Przed starzeniem mastyks z asfaltem modyfikowanym M + AA jest dużo bardziej odporny na deformacje plastyczne niż pozostałe mastyksy z asfaltem drogowym (niemodyfikowanym), co można stwierdzić na podstawie wartości $J_{nr 3,2}$. Po starzeniu PAV różnice $J_{nr 3,2}$ między mastyksem M + AA a mastyksami P + HL50, P + HL33 i P + HL20 są dużo mniejsze ($0,017 \text{ kPa}^{-1}$ vs. $0,022 - 0,025 \text{ kPa}^{-1}$).
- Wzrost poziomu naprężenia prowadzi do istotnych zmian J_{nr} mastyksu M + AA z asfaltem modyfikowanym. Gdy naprężenie wzrasta do $3,2 \text{ kPa}$, następuje gwałtowny spadek nawrotu sprężystego obserwowanego dla mastyksu M + AA, podczas gdy dla pozostałych mastyksów z lepiszczami niemodyfikowanymi obserwuje się względnie stabilne wartości nawrotu.

3.2. WPŁYW DODATKU ADHEZYJNEGO I MODYFIKACJI ASFALTU NA WŁAŚCIWOŚCI ZMĘCZENIOWE MASTYKSU

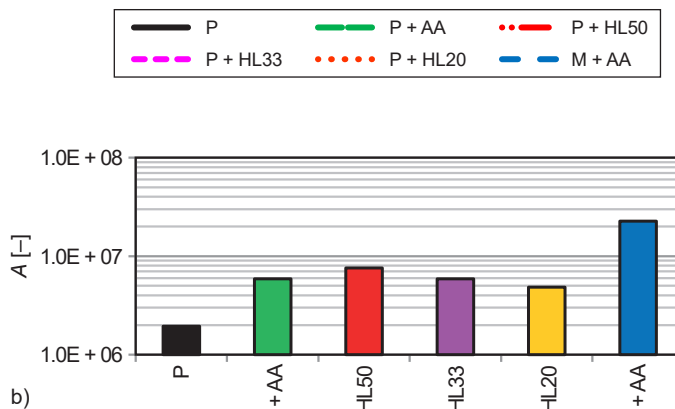
Wyniki uzyskane w teście LAS dla każdego z rozpatrywanych mastyksów po starzeniu PAV przedstawiono na Rys. 3a. Na rysunku tym widać zmianę efektywnego naprężenia ścinającego w kolejnych cyklach obciążeń, w miarę wzrostu efektywnego odkształcenia ścinającego. Należy zauważyć, że choć protokół badawczy zakładał wzrost odkształcenia do 30%, wszystkie próbki mastyksów z asfaltem drogowym (niemodyfikowanym) doznały zniszczenia przed osiągnięciem zakładanego maksymalnego odkształcenia. Jedynie mastyks M + AA z asfaltem modyfikowanym wytrzymał rosnące odkształcenie ścinające aż do osiągnięcia założonej maksymalnej wartości. Surowe dane z badania przetworzono z zastosowaniem arkusza kalkulacyjnego w wersji 1.57, dostępnego na [32]; parametry A i B modelu zmęczeniowego przedstawiono odpowiednio na Rys. 3b i 3c. Co istotne, skutecznie uniknięto problemu odspojenia, a każda z próbek doznała zniszczenia pod wpływem powstania spękań wewnętrznych. Osiągnięto to po kilku badaniach próbnych i ostatecznym doborze temperatury badania wynoszącej 20°C . Problem odspajania próbek był wyraźniejszy w niższych wartościach temperatury badania; zagadnienie to wymaga dalszych badań.

Porównanie poszczególnych mastyksów pod względem ich odporności na zmęczenie przedstawiono na Rys. 4. Krzywe zmęczeniowe wyliczone na podstawie równa-

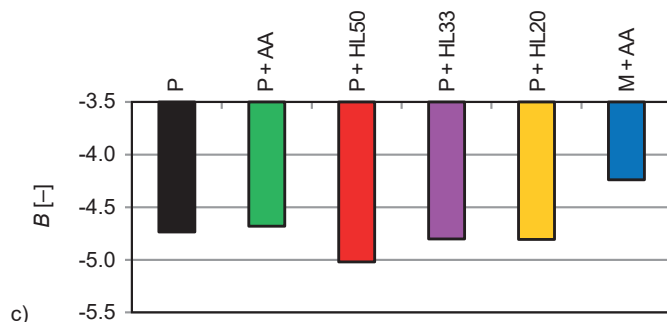
temperature of 20°C . The problem of specimen delamination became more pronounced at lower test temperatures, and further research is required to address this issue.



a)



b)

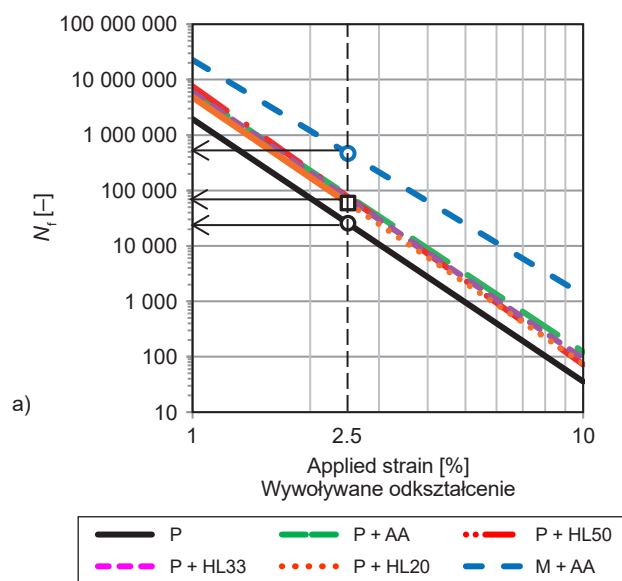


c)

Fig. 3. Results of the LAS test: a) change in the effective shear stress due to the applied shear strain; b), c) coefficients A and B of the estimated fatigue model

Rys. 3. Wyniki testu LAS: a) zmiana efektywnych naprężeń ścinających wraz ze wzrostem wywołanego odkształcenia ścinającego; b) i c) – współczynniki A i B modelu zmęczeniowego

nia (4) widoczne są na Rys. 4a. Trwałości zmęczeniowe $N_{f(2,5\%)}$ wyznaczono dla odkształceń 2,5% w sposób pokazany na Rys. 4a. Uzyskane wartości są przedstawione na Rys. 4b. Widać wyraźnie, że zastosowanie środka adhezyjnego lub wapna hydratyzowanego istotnie zwiększało trwałość zmęczeniową. Obserwacja ta wskazuje, iż składniki poprawiające właściwości adhezyjne mastyksu poprawiają również jego kohezję, co przekłada się na wzrost trwałości zmęczeniowej. Wniosek ten jest zgodny z wcześniejszymi badaniami [1], gdzie stwierdzono, że wapno hydratyzowane jako wypełniacz dużo skuteczniej od wypełniacza wapiennego podnosi trwałość zmęczeniową oraz zwiększa poziom skumulowanej szkody zmęczeniowej przeniesionej przed zniszczeniem. Test potwierdził również, że modyfikacja asfaltu polimerem w najwyższym stopniu podnosi jego odporność na zmęczenie.



Comparison of particular mastics in terms of their fatigue resistance is presented in Fig. 4. Fatigue curves calculated on the basis of equation (4) are shown in Fig. 4a. Fatigue lives $N_{f(2,5\%)}$ were determined at 2.5% strain, as shown in Fig. 4a. They are presented in Fig. 4b. It is clearly visible that application of adhesive agent or hydrated lime significantly increased fatigue life. This observation indicates that components which increase adhesive properties of mastics increase cohesive properties as well, resulting in an increase in fatigue resistance. This finding is in agreement with previous research [1], where it was stated that HL filler is much more effective than the LS filler in terms of extending fatigue life and increasing the degree of damage sustained prior to failure. The test also confirmed that polymer modification of bitumen increases resistance to fatigue to the greatest extent.

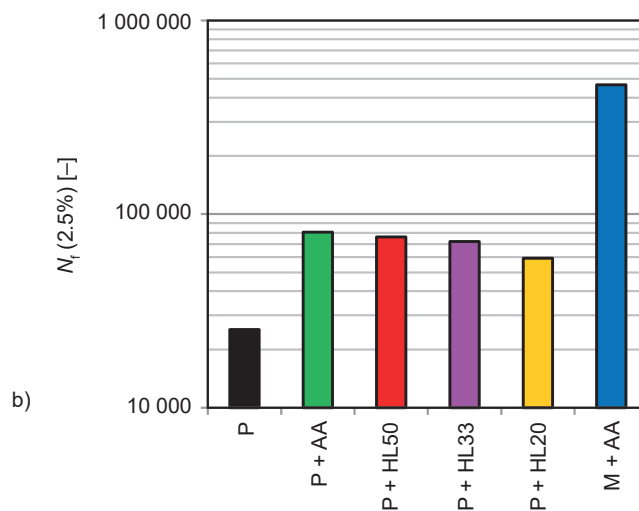


Fig. 4. Fatigue resistance analysis: a) fatigue curves of the tested mastics; b) comparison of the number of cycles to failure at 2.5% strain
Rys. 4. Analiza odporności na zmęczenie: a) krzywe zmęczeniowe badanych mastyksów; b) porównanie liczby cykli do zniszczenia przy poziomie odkształcenia 2,5%

3.3. WŁAŚCIWOŚCI NISKOTEMPERATUROWE

Na Rys. 5 przedstawiono podsumowanie właściwości niskotemperaturowych mastyksów asfaltowych przed i po starzeniu PAV. Moduł zespolony G^* mierzony przy niskiej częstotliwości obciążeń (0,02 Hz) jest analizowany w zestawieniu z procentowym spadkiem naprężeń wynikłym z relaksacji (obie wartości określone w temperaturze -20°C). W niskich temperaturach pozytywne skutki

3.3. LOW-TEMPERATURE PROPERTIES

Low-temperature properties of asphalt mastics before ageing and after PAV are summarised in Fig. 5. Complex modulus G^* measured at low load frequency (0.02 Hz) is analysed in combination with percentage of stress decrease due to relaxation (both values obtained at the temperature of -20°C). At low temperatures, both the decrease in complex modulus and the increase in stress relaxation have positive effects, because they lead to a reduction in

ma zarówno spadek modułu zespolonego, jak i zwiększona relaksacja naprężeń, ponieważ przekładają się one na redukcję naprężeń termicznych oraz, co za tym idzie, zmniejszone ryzyko wystąpienia spękań niskotemperaturowych. Starzenie długoterminowe PAV powoduje wzrost modułu zespolonego oraz spadek zdolności do relaksacji naprężeń, jak widać na Rys. 5, gdzie wyniki uzyskane na próbkach poddanych starzeniu PAV wykazują widoczne przesunięcie w kierunku dolnego prawego narożnika wykresu. Dodatek wapna hydratyzowanego ma niewielki wpływ na wzrost sztywności w niskich temperaturach, co potwierdza wnioski podawane przez innych autorów [1]. Można zaobserwować, że mastyksy zawierające wapno hydratyzowane mają nieco niższą zdolność do relaksacji naprężeń niż pozostałe mastyksy z samą mączką wapienną. Obserwacja ta sugeruje, że mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające zarówno mączkę wapienną, jak i wapno hydratyzowane, mogą być podatne na porównywalne naprężenia niskotemperaturowe. Zagadnienie określania wytrzymałości mastyksów asfaltowych w niskich temperaturach wymaga dalszych badań.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania laboratoryjne przeprowadzono łącznie na 6 wariantach mastyksu. Znajdowały się wśród nich 3 kompozycje drogowego (niemodyfikowanego) asfaltu i mączki wapiennej z dodatkiem wapna hydratyzowanego (HL) w różnych proporcjach względem masy mączki wapiennej (L) – 20%, 30% oraz 50%. Pozostałe 3 kompozycje porównawcze zawierały wypełniacz złożony wyłącznie z mączki wapiennej bez wapna hydratyzowanego (asfalt modyfikowany z płynnym środkiem adhezyjnym lub bez niego; asfalt modyfikowany z płynnym środkiem adhezyjnym). Na podstawie analizy wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych na mastyksach sformułowano następujące wnioski:

1. Mastyks zawierający wypełniacz mieszany (z wapnem hydratyzowanym) jest mniej podatny na starzenie niż mastyks złożony wyłącznie z asfaltu i standardowego wypełniacza (mączki wapiennej). Względna zmiana temperatury mięknięcia spowodowana starzeniem dla mastyksu z wypełniaczem mieszanym w proporcjach HL/L = 50% wyniosła 19%; natomiast dla mastyksu z samą mączką wapienną wyniosła 25%.

thermal stresses and, in consequence, a reduction in the risk of thermal cracking of pavement structure. Long-term ageing in PAV causes an increase in complex modulus and a decrease in stress relaxation of mastics, as visible in Fig. 5, where results obtained for specimens after PAV display a notable shift in the direction of the bottom right corner of the chart. Addition of hydrated lime has a minor impact on stiffness increase at low temperature, which confirms the findings reported in previous research [1]. It can be observed that mastics with hydrated lime have slightly lower stress relaxation capacity than the remaining mastics with lime filler. The observation suggests that asphalt mixtures containing both lime filler and hydrated lime (mixed filler) may be susceptible to comparable cryogenic stresses. However, stresses do not exclusively determine the low-temperature cracking performance. More studies are required in this field to determine the low-temperature strength of asphalt mastics.

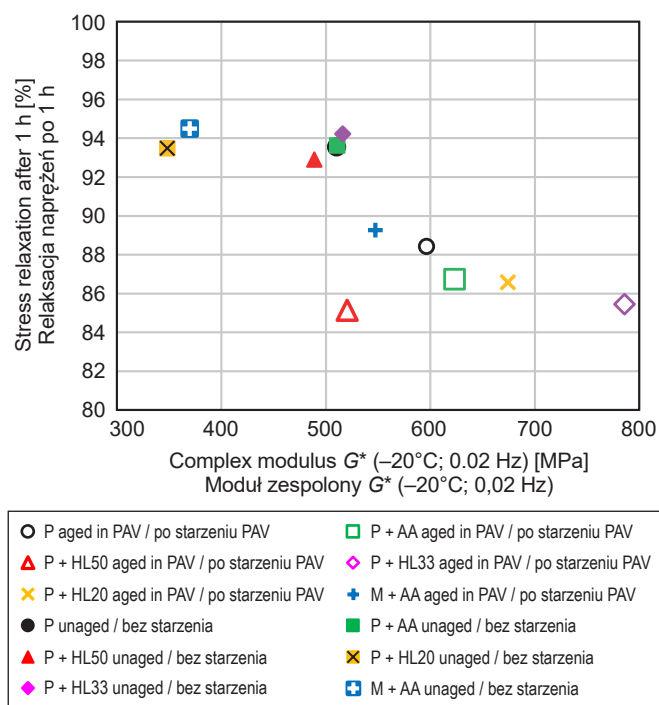


Fig. 5. Low-temperature properties of asphalt mastics expressed by complex modulus and stress relaxation at -20°C

Rys. 5. Właściwości niskotemperaturowe mastyksów asfaltowych wyrażone przez moduł zespolony i relaksację naprężeń w -20°C

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Laboratory tests were carried out on a total of 6 variants of mastics: 3 compositions of neat (unmodified) bitumen with lime filler containing an addition of hydrated lime

2. Mastyks z wapnem hydratyzowanym ma bardziej korzystne właściwości w kontekście odporności na deformacje plastyczne w wysokich temperaturach niż mastyks zawierający samą mączkę wapienną. Badania wykazały, że wszystkie parametry wyrażające odporność na deformacje trwałe w teście MSCR poprawiły się istotnie dzięki zastosowaniu wapna hydratyzowanego w wypełniaczu.
 3. Mastyksy z wapnem hydratyzowanym oraz mastyksy z płynnym środkiem adhezyjnym mają podobne właściwości w zakresie zwiększenia trwałości zmęczeniowej według testu LAS. Zaobserwowano, że zmniejszenie dodatku wapna hydratyzowanego od stosunku HL/L = 50% do stosunku HL/LV = 20% spowodowało lekki spadek trwałości zmęczeniowej mastyksu.
 4. Wyniki badania relaksacji naprężeń wykazały, że zaobserwowane usztywnienie mastyksu zawierającego wapno hydratyzowane nie spowodowało istotnego pogorszenia jego właściwości w niskich temperaturach. Dodatek wapna hydratyzowanego miał niewielki wpływ na wzrost sztywności w niskich temperaturach. W przypadku mastyksów niepoddanych starzeniu osiągnięto ten sam poziom relaksacji (bliski 94%). Można zaobserwować, że po starzeniu PAV mastyksy zawierające wapno hydratyzowane wykazywały nieco niższą zdolność do relaksacji naprężeń niż pozostałe mastyksy, zawierające wyłącznie wypełniacz wapienny (85% w porównaniu 88%).
 5. Mastyks wyprodukowany z asfaltu modyfikowanego 45/80-55 wykazuje istotnie wyższą odporność na deformacje trwałe (w teście MSCR), wyższą odporność na zmęczenie (w teście LAS) oraz wyższą odporność na spękania niskotemperaturowe (w badaniu relaksacji) niż pozostałe kombinacje mastyksów, zawierające asfalt drogowy 50/70.
 6. Niemniej jednak zaobserwowano, że odporność na deformacje trwałe mastyksu z asfaltem modyfikowanym może spaść po starzeniu, podczas gdy w przypadku mastyksów z drogowym (niemodyfikowanym) asfaltem po starzeniu ulegała ona wzrostowi. Obserwacje te wskazują na niekorzystne zjawisko, najprawdopodobniej spowodowany starzeniem rozpad sieci polimerowej w asfalcie modyfikowanym, przekładający się na obniżoną odporność na deformacje trwałe podczas eksploatacji.
- (HL) at different proportions to lime filler (L) – 20%, 30% and 50% – and 3 comparative compositions with lime filler without hydrated lime (neat bitumen with or without liquid adhesive; modified bitumen with liquid adhesive). The analysis of the results of laboratory tests performed on mastics enabled formulation of the following conclusions:
1. Mastic containing mixed filler with hydrated lime is less susceptible to ageing than mastic made from a combination of bitumen and standard lime filler. The change in softening point due to ageing when using the HL/L = 50% ratio equalled 19%, while with the lime filler it equalled 25%.
 2. Mastic with hydrated lime has more favourable properties in terms of resistance to plastic deformation at high temperatures than mastic containing only lime filler. The tests showed that all parameters of resistance to permanent deformation in the MSCR test have significantly improved due to use of hydrated lime in the filler.
 3. Mastics with hydrated lime and mastic with liquid adhesive agent have similar properties in terms of fatigue life extension obtained according to the LAS test. It was observed that a decrease in the addition of hydrated lime from HL/L = 50% to HL/L = 20% resulted in a slight decrease in the fatigue life of mastic.
 4. The observed stiffening of the mastic in which hydrated lime was used did not cause a significant deterioration of the properties at low temperatures, as expressed by the results of the stress relaxation test. Addition of hydrated lime had a minor impact on the stiffness increase at low temperatures. In the case of unaged mastics, the same level of stress relaxation was obtained (close to 94%). It can be observed that after ageing in PAV the mastics with hydrated lime displayed slightly lower capacity for stress relaxation than the remaining mastics with lime filler (85% compared to 88%).
 5. Mastic produced using modified bitumen 45/80-55 displays significantly higher resistance to permanent deformation (in the MSCR test), higher resistance to fatigue (in the LAS test) and higher resistance to low-temperature cracking (in the stress relaxation test) than the other combinations of mastics with neat bitumen 50/70.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania wpływu starzenia oraz badania reologiczne mastyków asfaltowych w wysokich i niskich wartościach temperatury zostały sfinansowane przez Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego w ramach grantu nr WILiŚ/27/BZ/002/2021, natomiast badania zmęczeniowe mastyków asfaltowych zostały sfinansowane w ramach grantu ARGENTUM nr DEC – 23/2021/IDUB/1.3.3.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Little D.N., Petersen J.C.*: Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **17**, 2, 2005, 207-218. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207)
- [2] *Jiménez F.P., Recasens R.M., Martínez A.*: Effect of Filler Nature and Content on the Behaviour of Bituminous Mastics. *Road Materials and Pavement Design*, **9**, sup1, 2008, 417-431, DOI: 10.1080/14680629.2008.9690177
- [3] *Das A.K., Singh D.*: Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers. *Construction and Building Materials*, **141**, 2017, 442-452. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.032
- [4] *Das A.K., Singh D.*: Effects of Basalt and Hydrated Lime Fillers on Rheological and Fracture Cracking Behavior of Polymer Modified Asphalt Mastic. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**, 3, 2018, ID article: 04018011, DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002196
- [5] *Rahim A., Milad A., Yusoff N.I., Airey G., Thom N.*: Stiffening effect of fillers based on rheology and micromechanics models. *Applied Sciences*, **11**, 14, 2021, ID article: 6521, DOI: 10.3390/app11146521
- [6] *Alfaqawi R.M., Airey G., Lo Presti D., Grenfell J.*: Effects of mineral fillers on bitumen mastic chemistry and rheology. In: *Transport Infrastructure and Systems, Proceedings of the AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems, TIS 2017*. CRC Press/Balkema, 359-364, <https://iris.unipa.it/handle/10447/604136>, 21.11.2024
- [7] *Cheng Y., Tao J., Jiao Y., Tan G., Guo Q., Wang S., Ni P.*: Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, **118**, 2016, 268-275, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.041
- [8] *Masad E., Jandhyala V.K., Dasgupta N., Somadevan N., Shashidhar N.*: Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14**, 2, 2002, 122-129, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(122)
- [9] *Lagos-Varas M., Movilla-Quesada D., Raposeiras A.C., Castro-Fresno D., Muñoz-Cáceres O., Andrés-Valeri V.C., Rodríguez-Esteban M.A.*: Viscoelasticity modelling of asphalt mastics under permanent deformation through the use of fractional calculus. *Construction and Building Materials* **329**, 2022, ID article: 127102, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127102
- [10] *Steineder M., Hofko B.*: Assessing the impact of filler properties, moisture, and aging regarding fatigue resistance of asphalt mastic regarding fatigue resistance of asphalt mastic. *Road Materials and Pavement Design*, **24**, 12, 2023, 2811-2826, DOI: 10.1080/14680629.2023.2172066
- [11] *Chaudhary M., Saboo N., Gupta A., Miljković M.*: Contribution of mineral filler to the fatigue damage behaviour of bituminous mastic. *Construction and Building Materials*, **334**, 2022, ID article: 127120, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127120
- [12] *Ryś D., Szydłowski C.*: Consideration of pseudo strain energy in determination of fatigue life and microdamage healing of asphalt mastics. *International Journal of Fatigue*, **181**, 2024, ID article: 108164, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108164
- [13] *Büchner J., Ryś D., Trifunović S., Wistuba M.P.*: Development and application of asphalt binder relaxation test in different dynamic shear rheometers. *Construction and Building Materials*, **364**, 2023, ID article: 129929, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129929
- [14] *Büchner J., Wistuba M.*: Analysis of low temperature relaxation properties of asphalt binder and asphalt mastic using a dynamic shear Rheometer. In: Hoff I., Mork Helge, Saba R. (eds.): *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Volume 2, CRC Press, London, 2022, 508-516, DOI: 10.1201/9781003222897-47
- [6] At the same time, it was observed that the resistance to permanent deformation of mastics with modified bitumen might decrease due to ageing, whereas in the case of mastics with neat (unmodified) bitumen, it increases. These observations indicate an unfavourable phenomenon, probably the breakdown of the polymer network in the polymer-modified bitumen as a result of ageing, which in turn leads to decreased resistance to permanent deformation during service.

ACKNOWLEDGEMENTS

The ageing influence, high- and low-temperature rheological tests of asphalt mastics were funded by the Polish Lime Association under the research grant no. WILiŚ/27/BZ/002/2021, the fatigue tests of asphalt mastics were funded under the grant ARGENTUM no. DEC – 23/2021/IDUB/1.3.3.

- [15] *Anderson D.A., Dukatz E.L., Claine Petersen J.*: The Effect of Antistrip Additives on the Properties of Asphalt Cement. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, **51**, 1982, 298-317
- [16] *Johansson L.S.*: Influence of hydrated lime on bitumen hardening. Royal Institute of Technology, Stockholm, 1995
- [17] *Kennedy T.W., Ping W.V.*: An Evaluation of Effectiveness of Antistripping Additives in Protecting Asphalt Mixtures from Moisture Damage. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, **60**, 1991, 231-263
- [18] *Little D.N., Epps J.A.*: The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, Nevada, USA, 2001
- [19] *Lesueur D., Petit J., Ritter H.-J.*: The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review. Road Materials and Pavement Design, **14**, 1, 2013, 1-16, DOI: 10.1080/14680629.2012.743669
- [20] *Jaskuła P.*: Analiza niszczącego oddziaływania wody i mrozu na mieszanki mineralno-asfaltowe. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004
- [21] *Majidzadeh K., Brovold F.*: Effect of water on bitumen – aggregate mixtures. Highway Research Board, Washington, USA, 1968
- [22] *Lesueur D., Little D.*: Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **1661**, 1999, 93-105, DOI: 10.3141/1661-14
- [23] *Iwański M., Mazurek G.*: Hydrated lime as the anti-aging bitumen agent. Procedia Engineering **57**, 2013, 424-432, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.055
- [24] *Witczak M.W., Bari J.*: Development of a E* Master Curve Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures, Arizona State University, Tempe, 2004
- [25] *Sebaaly P.E., Hitti E., Weitzel D.*: Effectiveness of Lime in Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **1832**, 1, 2003, 34-41, DOI: 10.3141/1832-05
- [26] Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych – WT-2 2014 – część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014
- [27] *Mastoras F., Varveri A., van Tooren M., Erkens S.*: Effect of mineral fillers on ageing of bituminous mastics. Construction and Building Materials, **276**, 2021, ID article: 122215, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122215
- [28] *Lesueur D., Teixeira A., Lázaro M.M., Andaluz D., Ruiz A.*: A simple test method in order to assess the effect of mineral fillers on bitumen ageing. Construction and Building Materials, **117**, 2016, 182-189, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.003
- [29] *Gardel V., Planche J., Dreessen S.*: A new performance related test method for rutting prediction: MSCRT. In: Loizos A., Partl M.N., Scarpas T., Al-Qadi I.L. (Eds.): Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, CRC Press, Boca Raton, 2009, 971-980
- [30] *Hintz C., Velasquez R., Johnson C., Bahia H.*: Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **2207**, 1, 2011, 99-106. DOI: 10.3141/2207-13
- [31] *Hintz C., Bahia H.*: Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer. Road Materials and Pavement Design, **14**, sup2, 2013, 231-251, DOI: 10.1080/14680629.2013.818818
- [32] Modified Asphalt Research Center, University of Wisconsin-Madison: Linear Amplitude Sweep, <https://uwmarc.wisc.edu/linear-amplitude-sweep.php>, 21.11.2024
- [33] *Wesołowska M., Ryś D.*: Analysis of the fatigue life of neat and modified bitumens using linear amplitude sweep test. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **17**, 4, 2018, 317-336, DOI: 10.7409/rabdim.018.020
- [34] *Hospodka M., Hofko B., Blab R.*: Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing. Materials and Structures, **51**, 2018, ID article: 46, DOI: 10.1617/s11527-018-1171-6