

MARIUSZ JACZEWSKI¹⁾BOHDAN DOŁŻYCKI²⁾JACEK ALENOWICZ³⁾PIOTR JASKUŁA⁴⁾

IMPACT OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) ON LOW-TEMPERATURE PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE

WPŁYW MATERIAŁU ODZYSKANEGO Z NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ (RAP) NA NISKOTEMERATUROWE WŁAŚCIWOŚCI BETONU ASFALTOWEGO

STRESZCZENIE. Recykling mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco umożliwia powtórne wykorzystanie materiałów uzyskanych ze starych nawierzchni asfaltowych. Aktualne polskie przepisy pozwalają użyć granulatu asfaltowy w ograniczonej ilości, tylko do zastosowania w przypadku warstw wiążących oraz podbudowy. Mieszanki mineralno-asfaltowe z udziałem granulatu asfaltowego muszą spełniać wymagania obowiązujące dla typowych mieszanek asfaltowych. W pracy określono niskotemperaturowe właściwości dwunastu różnych betonów asfaltowych z udziałem granulatu asfaltowego wyznaczone na podstawie trzypunktowego badania zginania. Mieszanki różniły się przeznaczeniem (do warstw ścieralnych, wiążących lub podbudowy), zawartością granulatu asfaltowego (od 0% do 60%), jego jakością i zastosowaniem środka odmładzającego lepiszcze. W przypadku wszystkich badanych mieszanek zawartość granulatu asfaltowego wywierała istotny wpływ na ich właściwości mechaniczne – odkształcenie graniczne i wytrzymałość na zginanie. Wartości tych parametrów zmniejszały się wraz ze wzrostem zastosowanej ilości granulatu asfaltowego. Największe spadki zanotowano w przypadku warstw ścieralnych i wiążących. W przypadku warstw podbudowy zmiany te były znacznie mniejsze, nawet gdy zwiększano w nich udział granulatu asfaltowego.

SŁOWA KLUCZOWE: badanie zginania, granulatu asfaltowy, recykling na gorąco, właściwości niskotemperaturowe, wytrzymałość na zginanie.

ABSTRACT. Hot mix recycling is a practice which enables reusing materials from old asphalt pavements. Current Polish regulations allow usage of RAP only for binder and base courses, and its amount is limited. Asphalt mixtures with RAP material have to fulfil requirements stated for typical asphalt mixtures. The research presents low-temperature properties of twelve different asphalt concretes with RAP material, determined using three-point bending test. Mixtures differed in: type (for wearing, binder or base courses), content of RAP (from 0% up to 60%), quality of RAP material and application of rejuvenator. For all mixtures, RAP content strongly influences mechanical properties – critical strain and flexural strength. Their values decreased with an increase in the used amount of RAP. The greatest decrease was observed for wearing and binder courses. The changes were much smaller for base course mixtures, even with higher amounts of RAP.

DOI: 10.7409/rabdim.019.020

KEYWORDS: bending test, flexural strength, hot mix recycling, low-temperature properties, RAP.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; mariusz.jaczewski@pg.edu.pl

²⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; bohdan.dolzycki@pg.edu.pl (✉)

³⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; jacek.alenowicz@pg.edu.pl

⁴⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; piotr.jaskula@pg.gda.pl

1. WPROWADZENIE

Produkcja mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem granulatu asfaltowego jest stosunkowo powszechną technologią w budowie dróg. Z powodów ekonomicznych i ekologicznych wskazane jest zwiększanie zawartości granulatu asfaltowego w mieszance. Wybór nowego lepiszcza i optymalizacja jego wpływu na właściwości mieszanki stanowią istotne elementy badań mieszanek o dużej zawartości granulatu asfaltowego [1-3]. Wpływ zawartości granulatu asfaltowego na zachowanie mieszanek asfaltowych jest oceniany na podstawie badań następujących właściwości:

- moduł sztywności,
- odporność na deformacje trwałe,
- odporność na spękania niskotemperaturowe,
- trwałość zmęczeniowa,
- odporność na działanie wody.

Oprócz ww. badań dla mieszanek mineralno-asfaltowych z granulem asfaltowym przeprowadza się również test Marshalla [4, 5].

Wpływ zawartości granulatu asfaltowego jest różny w odniesieniu do wymienionych powyżej właściwości mieszanki. Przeważnie obserwuje się wzrost modułu sztywności i zwiększenie odporności na deformacje trwałe. W odniesieniu do zachowania w niskich wartościach temperatury i odporności na spękania wyniki badań są niejednoznaczne, jednak w wielu przypadkach wykazują pogorszenie tych właściwości. Badania przedstawione w artykule odnoszą się do oceny wpływu zawartości granulatu asfaltowego na właściwości niskotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Ponieważ granulaty asfaltowy dodawany do mieszanki zawiera zestarzałe lepiszcze, istnieje powód do obaw, że nowa mieszanka okaże się podatna na pękanie termiczne. Wskaźniki, które są stosowane w odniesieniu do niskotemperaturowego pękania mieszanek mineralno-asfaltowych zostały wyczerpująco ocenione przez Zhu i innych w [6]. Wpływ zawartości granulatu asfaltowego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na niskotemperaturowe pękanie jest zwykle oceniany następującymi metodami:

- badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (IDT) [7-9],
- badanie zginania próbek półwalcowych (SCB) [7, 10-13],
- zmodyfikowane badanie SCB (IL-SCB, I-FIT) [12, 14],
- badanie naprężenia termicznego na skrópowanej próbce (TSRST) [15],

1. INTRODUCTION

Production of asphalt mixtures using RAP is a relatively common technology in road construction. Due to economic and ecological reasons, it is desirable to maximise RAP content in the mixture. Choice of new binder and optimizing its influence on mixture properties constitutes a vital element in research concerning mixtures containing large quantities of RAP [1-3]. The impact of RAP content on performance of asphalt mixtures is assessed basing on tests of the following properties:

- stiffness modulus,
- resistance to permanent deformations,
- resistance to low-temperature cracking,
- fatigue life,
- resistance to water action.

Apart from the above tests, the Marshall's test is also performed on asphalt mixtures with RAP [4, 5].

The influence of RAP content differs in respect to the mentioned mixture properties. Typically, an increase in stiffness modulus and greater resistance to permanent deformations is observed. In terms of low-temperature performance and cracking resistance, the results are not uniform and show deterioration of properties in many cases. Research presented in this article is focused on an assessment of the impact of RAP content on low-temperature properties of asphalt mixtures.

2. LITERATURE REVIEW

Since RAP material, which is added to the mixture, contains aged binder, there is a reason for concern that the new mixture may prove susceptible to thermal cracking. The low-temperature fracture indices which are applied for asphalt mixtures are comprehensively evaluated by Zhu et al. [6]: The impact of RAP content on asphalt mixture resistance to low-temperature cracking is usually assessed using of the following methods:

- Indirect Tension Test (IDT) [7-9],
- Semi-Circular Bending Test (SCB) [7, 10-13],
- Modified SCB Test (IL-SCB, I-FIT) [12, 14],
- Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) [15],
- Disc-Shaped Compact Tension Test (DCT) [11, 16].

New methods of assessment of asphalt mixture susceptibility to cracking are being proposed as well. The authors

– badanie rozciągania próbek tarczowych (DCT) [11, 16]. Proponowane są również nowe metody oceny podatności mieszanek mineralno-asfaltowych na pękanie. Autorzy pracy [17] przedstawili sposób prognozowania zachowania mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich wartościach temperatury oparte na badaniach rozciągania bezpośredniego próbek przygotowanych z lepiszcza i frakcji drobnociąstkowej kruszyw – tzw. test ICTD – rozciągania bezpośredniego składników wypełniających przestaw między ziarnami kruszywa.

Większość opracowań mówi o niekorzystnym wpływie dodatku granulatu asfaltowego na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na pękanie termiczne [7-11, 18-19], lecz poziom tego wpływu jest zróżnicowany. Na przykład McDaniel i inni podkreślają w [8], że temperatury krytyczne uzyskane z badania pełzania pośredniego były o 4°C wyższe dla mieszanki mineralno-asfaltowej z zawartością 25% granulatu asfaltowego i o 6°C wyższe dla mieszanki mineralno-asfaltowej z zawartością 40% granulatu asfaltowego w porównaniu z mieszankami bez granulatu. Inne badania przeprowadzone przez McDaniel i innych [9] na mieszankach mineralno-asfaltowych z analogicznymi zawartościami granulatu asfaltowego pokazują mniejsze wzrosty wartości temperatury krytycznej – odpowiednio o 1°C i 3°C – jednak wpływ dodatku granulatu jest również niekorzystny.

Negatywny wpływ granulatu asfaltowego na odporność mieszanki na pękanie termiczne może być zmniejszony przez wybór odpowiedniego nowego lepiszcza. Al-Qadi i inni [14] stwierdzają jednak, że zapewnienie właściwej odporności na pękanie „może być wyzwaniem” w przypadku wysokiej zawartości granulatu asfaltowego. Al-Qadi i inni stwierdzają w pracy [11], że dodatek granulatu asfaltowego do mieszanki mineralno-asfaltowej skutkuje spadkiem energii pękania (badanie SCB). Podobne wyniki uzyskali Johnson i inni [7]. O ile mieszanki mineralno-asfaltowe bez granulatu odznaczały się ogólnie wyższą energią pękania, to wpływ zawartości granulatu i rodzaju użytego nowego lepiszcza nie był jednolity. Stabilne tendencje i spadek energii pękania były bardziej wyraźne podczas badań prowadzonych w niskich wartościach temperatury. W pracy [10] Al-Qadi i inni przedstawiają odmienny skutek – przy niższej temperaturze (-24°C) wpływ granulatu na energię pękania próbek mieszanki mineralno-asfaltowej był umiarkowanie korzystny, lecz przy wyższej temperaturze (-12°C) był niekorzystny.

3. MATERIAŁY

Badania przedstawione w artykule dotyczą mieszanek mineralno-asfaltowych zaprojektowanych w ramach programu „Rozwój Innowacji Drogowych”. Mieszanki te zaprojektowano jako typowe betony asfaltowe stosowane w polskich

of [17] have proposed prediction of asphalt mixture performance at low temperatures based on direct tension test performed on specimens prepared from a binder and fine fractions of aggregates – the interstitial component direct tension test (ICDT).

Most studies report adverse impact of RAP addition on asphalt mixture resistance to thermal cracking [7-11, 18-19], but the extent of its influence is variable. For example, McDaniel et al. note in [8] that critical temperatures obtained from indirect tension creep test were 4°C higher for asphalt mixture with 25% RAP content and 6°C higher for asphalt mixture with 40% RAP content, as compared to mixtures without RAP. Another researches performed by McDaniel et al. [9] on asphalt mixtures with analogous RAP contents showed a lower increase in critical temperatures – by 1°C and 3°C respectively – but the influence of RAP addition was adverse as well.

The negative impact of RAP on mixture resistance to thermal cracking may be minimised by appropriate choice of new binder. Nevertheless, Al-Qadi et al. report [14] that ensuring adequate resistance to cracking “could be a challenge” if RAP content is high. In [11] Al-Qadi et al. have stated that addition of RAP material to asphalt mixture results in a decrease in fracture energy (SCB test). Similar results were obtained by Johnson et al. [7]. While asphalt mixtures without RAP were characterised by higher fracture energy in general, the influence of RAP content and type of new bitumen used was not uniform. Regular trends and a decrease in fracture energy were more evident when tests were performed at lower temperatures. Another study by Al-Qadi et al. [10] shows a different effect – at lower temperature (-24°C) the influence of RAP on fracture energy of asphalt mix specimens was moderately advantageous, while at higher temperature (-12°C) it was adverse.

3. MATERIALS

The research presented in the article focuses on asphalt mixtures designed under the Road Innovations Development programme. The mixtures were designed as typical asphalt concretes used in Polish conditions – AC 22P 35/50, AC 16W 35/50 and AC 11S 45/80-55, consistent with the Polish guidelines [20]. Within the programme, design and basic testing of the mixtures was performed by the Road and Bridge Research Institute. The mixture basic characteristics, including aggregate gradation and bitumen content, are given in Table 1 for informational purposes. They are not included in the analysis presented in the paper.

warunkach – AC 22P 35/50, AC 16W 35/50 i AC 11S 45/80-55, zgodnie z polskimi wymaganiami [20]. W ramach realizacji programu projektowanie i podstawowe badania mieszanek wykonał Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Dla celów informacyjnych podstawowe charakterystyki mieszanek, łącznie ze składem granulometrycznym i zawartością asfaltu podano w Tabl. 1. Nie są one jednak wykorzystane w analizie przedstawionej w niniejszym artykule.

Do badanych mieszanek mineralno-asfaltowych dodano następujące ilości granulatu:

- AC 22P (na warstwę podbudowy) – dodatek granulatu 20%, 40% i 60%,
- AC 16W (na warstwę wiążącą) – dodatek granulatu 20% i 40%,
- AC 11 S (na warstwę ścieralną) – dodatek granulatu 20%.

Badano również referencyjne mieszanki mineralno-asfaltowe bez granulatu.

Zastosowano dwa rodzaje granulatu asfaltowego. Granulat użyty w większości badań był materiałem dobrej jakości z korzystnymi właściwościami – grube uziarnienie, ostrokrawędziste ziarna kruszywa i względnie miękki asfalt. Granulat asfaltowy niższej jakości – oznaczony jako RAP(b) – był dodatkowo zastosowany w badaniu niektórych mieszanek do warstwy podbudowy po to, by oszacować wpływ jakości granulatu na niskotemperaturowe zachowanie badanych mieszanek. RAP(b) charakteryzowały niekorzystne właściwości – niewielka zawartość ziaren grubych, zaokrąglone kruszywo i stosunkowo twardy, zestarzały asfalt. Jakość granulatu miała wpływ na właściwości niskotemperaturowe badanych betonów asfaltowych do warstw podbudowy.

Zbadano następujące mieszanki AC 22P, zawierające niskiej jakości granulat - RAP(b):

- z dodatkiem 20% i 40% granulatu,
- z dodatkiem 40% granulatu i środka odmładzającego lepiszcze (bardzo miękki asfalt).

Parametry oryginalnych mieszanek bez granulatu, jak również mieszanek zawierających granulat asfaltowy podano w Tabl. 2. Wymienione mieszanki były zbadane pod względem ich odporności na pękanie niskotemperaturowe w Politechnice Gdańskiej.

4. LABORATORYJNE METODY BADAŃ NISKOTEMPERATUROWYCH

Niskotemperaturowe właściwości mieszanek asfaltowych określono na podstawie badania zginania trzypunktowego, opracowanego przez Judyckiego [21] i udoskonalonego przez

Table 1. Gradation and optimum asphalt content of the tested asphalt mixtures [20]

Tablica 1. Uziarnienie oraz optymalna zawartość asfaltu w badanych mieszankach mineralno-asfaltowych [20]

Gradation # [mm] Uziarnienie	AC 22P 35/50	AC 16W 35/50	AC 11S 45/80-55
31.5	100.0	100.0	100.0
22.4	99.5	100.0	100.0
16.0	78.8	98.3	100.0
11.2	68.0	76.5	98.4
8.0	57.7	63.8	81.7
5.6	51.0	56.9	64.3
2.0	30.4	31.3	53.3
0.5	17.5	13.9	39.3
0.125	7.2	7.4	10.6
0.063	5.0	5.6	9.1
Bitumen content Zawartość lepiszcza [%]	3.9	4.3	5.6

The following quantities of RAP material were added to the tested asphalt mixtures:

- AC 22P (for base course) – addition of 20%, 40% and 60% of RAP,
- AC 16W (for binder course) – addition of 20% and 40% of RAP,
- AC 11 S (for wearing course) – addition of 20% of RAP.

Asphalt mixtures without RAP content were also tested for reference purposes.

Two types of RAP material were used. The RAP used for majority of tests was a good quality material, with favourable properties – coarse gradation, angular aggregate particles and relatively soft bitumen. Lower quality RAP material – marked as RAP(b) – was additionally used in test of some mixtures for base course to evaluate the influence of RAP quality on low-temperature behaviour of the mixtures tested. The RAP(b) was characterized by unfavourable properties – only few coarse particles, rounded aggregate and relatively hard, aged bitumen. The quality of RAP proved to have influence on low temperature properties of the tested asphalt concretes for base course.

The following AC 22P mixtures with low quality RAP(b) were tested:

- with addition of 20% and 40% of RAP(b),
- with addition of 40% of RAP(b) with a rejuvenating agent (very soft bitumen).

Pszczółę i innych [22]. Głównymi właściwościami uzyskiwanymi z tego badania są: wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne, moduł sztywności i wskaźnik usztywnienia.

Parameters of the original mixtures, without RAP addition as well as the mixtures containing RAP are given in Table 2. The listed mixtures were tested in terms of their resistance to low-temperature cracking at the Gdańsk Technical University.

Table 2. Basic properties of the tested asphalt mixtures [20]

Tablica 2. Podstawowe właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych [20]

Type of mixture Rodzaj mieszanki	Content of new bitumen in the asphalt mixture [% (m/m)] Zawartość nowego asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej	Binder replacement [% (m/m)] Zastąpienie lepiszcza	Air voids in Marshall's specimens acc. to PN-EN 12697-8, based on submerged density [% {v/v}] Wolne przestrzenie w próbkach Marshalla wg PN-EN 12697-8	Resistance to permanent deformation at 60°C acc. to PN-EN 12697-22, small device, procedure B in air Odporność na deformacje trwałe, procedura B w powietrzu		Resistance to water and frost after one freezing cycle, tested at 25°C (ITSR) acc. to PN-EN 12697-12:2008 [%] Odporność na wodę i mróz po jednym cyklu zamrażania, badana w temp. 25°C (ITSR) wg PN-EN 12697-12:2008
				Wheel-tracking slope WTS, [mm/10 ³ cycles] Nachylenie krzywej koleinowania WTS	Proportional rut depth PRD [%] Proporcjonalna głębokość koleiny PRD	
AC 22P 35/50 (0% RAP)	3.9	0	4.1	0.20	7.0	81
AC 22P 35/50 (20% RAP)	2.9	25.6	4.8	0.18	7.6	83
AC 22P 35/50 (40% RAP)	2.0	48.7	5.6	0.15	7.1	90
AC 22P 35/50 (60% RAP)	1.0	74.4	4.6	0.16	6.3	85
AC 22P 35/50 (20% RAP(b))	2.9	26.2	4.1	0.12	5.7	82
AC 22P 35/50 (40% RAP(b))	2.0	52.3	4.1	0.08	4.9	95
AC 22P 35/50 (40% RAP(b) + rejuvenator / śr. odmładzający)	2.0	52.3	4.4	0.16	5.9	98
AC 16W 35/50 (0% RAP)	4.3	0	6.9	0.08	4.6	93
AC 16W 35/50 (20% RAP)	3.3	23.3	6.8	0.11	5.3	84
AC 16W 35/50 (40% RAP)	2.2	48.8	6.5	0.11	5.8	85
AC 11S 45/80-55 (0% RAP)	5.6	0	2.8	0.03	4.9	92
AC 11S 45/80-55 (20% RAP)	4.6	17.8	2.0	0.07	6.2	93

Badane mieszanki uformowano w postaci płyt o wymiarach 305×305×50 mm i następnie pocięto na pryzmatyczne belki 50×50×305 mm. Przygotowano co najmniej 30 belek dla każdej mieszanki. Do badania zginania belki wybrano losowo po 10 próbek każdej mieszanki (5 dla każdej wartości

4. LABORATORY LOW-TEMPERATURE TEST METHODS

Low-temperature properties of the asphalt mixtures were tested using three-point bending test developed by

temperatury badania). Belka z betonu asfaltowego o wymiarach 50×50×305 mm jest poddawana zginaniu ze stałą prędkością 1,25 mm/min siłą przyłożoną w środku rozpiętości belki. Siła obciążająca jest rejestrowana przez dwa czujniki pomiarowe, podczas gdy odkształcenie na spodzie próbki jest mierzone czujnikiem indukcyjnym LVDT. W podstawowej formie badanie jest przeprowadzane przy dwóch watościach temperatury +10°C i -20°C. Schemat badania i urządzenie pomiarowe przedstawia Rys. 1.

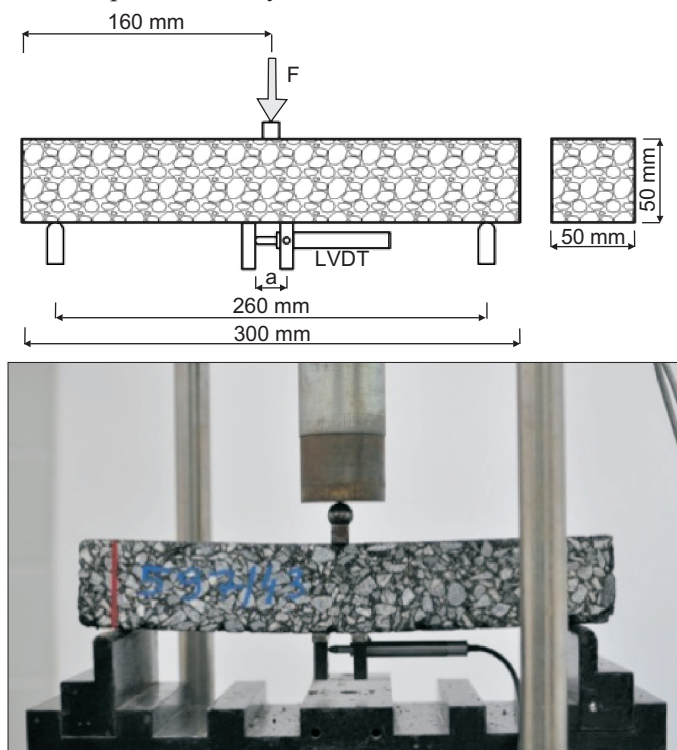


Fig. 1. The scheme of bending beam test and the specimen placed in the test apparatus

Rys. 1. Schemat badania zginania belki oraz próbka zamontowana w urządzeniu badawczym

Odkształcenie graniczne i wytrzymałość na zginanie są obliczane z zastosowaniem odpowiednio równań (1) i (2):

$$\varepsilon = \frac{p_{\max}}{e} \cdot \frac{c}{c+a}, \quad (1)$$

$$r = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (2)$$

gdzie:

- ε – odkształcenie graniczne [-],
- p_{\max} – przemieszczenie czujnika LVDT umieszczonego na spodzie belki, mierzone na długości bazy pomiarowej e przy maksymalnej sile F_{\max} [mm],
- e – długość bazy pomiarowej [mm],

Judycki [21] and improved by Pszczoła et al. [22]. The main properties derived from the test are: flexural strength, ultimate strain, stiffness modulus and stiffening ratio.

The tested mixtures were compacted into plates of dimensions 305×305×50 mm and later sawed into 50×50×305 mm prismatic beams. For each mixture at least 30 beams were prepared. For the bending beam test, 10 specimens of each mixture were randomly selected (5 for each test temperature). Asphalt concrete beam 50×50×305 mm is subjected to bending at constant deformation of rate 1.25 mm per minute applied in the middle of the beam. The applied force is recorded using two force sensors, while strain at the bottom of the specimen is measured with an LVDT sensor. In its basic form, the test is conducted at two temperatures: +10°C and -20°C. Test scheme and apparatus are presented in Fig. 1.

The ultimate strain and flexural strength are calculated using equations (1) and (2) respectively.

$$\varepsilon = \frac{p_{\max}}{e} \cdot \frac{c}{c+a}, \quad (1)$$

$$r = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (2)$$

where:

- ε – ultimate strain [-],
- p_{\max} – displacement of the LVDT sensor located on the bottom of the beam, measured over the e measurement base at maximum force F_{\max} [mm],
- e – length of measurement base [mm],
- c – half of the height of the beam [mm],
- a – distance between the bottom of the beam and the axis of the LVDT sensor [mm],
- R – flexural strength [MPa],
- F_{\max} – maximum force [kN],
- h, b – dimensions of the beam [mm],
- l – span between supports (260 mm).

The stiffness modulus is determined using eq. (3).

$$S = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (3)$$

where:

- S – stiffness modulus [MPa],
- $\Delta\varepsilon$ – strain increment [-],
- $\Delta\sigma$ – stress increment [MPa].

- c – połowa wysokości belki [mm],
 a – odległość od spodu belki do osi czujnika LVDT [mm],
 R – wytrzymałość na zginanie [MPa],
 F_{\max} – siła maksymalna [kN],
 h, b – wymiary belki [mm],
 l – rozpiętość próbki między podporami (260 mm).
 Moduł sztywności jest wyznaczany z zastosowaniem równania (3).

$$S = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (3)$$

gdzie:

- S – moduł sztywności [MPa],
 $\Delta\varepsilon$ – przyrost odkształcenia [-],
 $\Delta\sigma$ – przyrost naprężenia [MPa].

Wskaźnik usztywnienia jest wyznaczany na podstawie wyników badań poprzez równanie (4):

$$w_{ue} = \frac{\Delta S}{\Delta T}, \quad (4)$$

gdzie:

- w_{ue} – wskaźnik usztywnienia [MPa/°C],
 ΔS – różnica sztywności między wynikami uzyskanymi w dwóch wartościach temperatury badań (+10°C i -20°C) [MPa],
 ΔT – różnica między dwoma wartościami temperatury badań (+10°C i -20°C) [°C].

O lepszych właściwościach badanej mieszanki świadczą wyższe wartości wytrzymałości na zginanie i odkształceń granicznych uzyskane w temperaturze -20°C oraz niższy wskaźnik usztywnienia.

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. UWAGI OGÓLNE

W Tabl. 3 przedstawiono podsumowanie wyników badań zginania belek z betonu asfaltowego. Otrzymane podczas badań próbek w temperaturze -20°C wartości właściwości mechanicznych zamieszczono także na Rys. 2-4. Na rysunkach tych podano wartości średnie oraz odchylenie standardowe wyników badań. Przeprowadzone badania laboratoryjne pokazały, że we wszystkich przypadkach dodatek granulatu asfaltowego oznaczał spadek właściwości mechanicznych betonu asfaltowego w obu wartościach temperatury badań. Jest to szczególnie widoczne w temperaturze -20°C. W przypadku

The stiffening ratio is determined on the basis of test results using eq. (4).

$$w_{ue} = \frac{\Delta S}{\Delta T}, \quad (4)$$

where:

- w_{ue} – stiffening ratio [MPa/°C],
 ΔS – stiffness increment between the results obtained at two test temperatures (+10°C and -20°C) [MPa],
 ΔT – temperature increment between the two test temperatures (+10°C and -20°C) [°C].

Better performance of the tested mixture is indicated by: higher values of flexural strength and ultimate strain at the temperature of -20°C, lower stiffness modulus at the temperature of -20°C and lower stiffening ratio.

5. TEST RESULTS

5.1. GENERAL REMARKS

Summary of the bending beam test results is presented in Table 3. Values of properties tested at the temperature of -20°C are also presented in Figs 2-4. These figures present mean values with standard deviation of test results. Performed laboratory tests have shown that in all cases the addition of RAP resulted in decrease of mechanical properties at both test temperatures. It is visible especially well at the temperature of -20°C. In case of all the tested mixtures, values of flexural strength and ultimate strain are lower for the mixtures with addition of RAP. Changes in stiffness modulus and stiffening ratio are also visible, but the relationships are not as simple as for the first two parameters. Each property is discussed below separately. In case of asphalt concrete for base layer AC 22P, the quality of RAP material and use of rejuvenator agent is included in the discussion of test results.

5.2. FLEXURAL STRENGTH

All tested mixtures presented a decrease in flexural strength at the temperature of -20°C. In the case of AC 11S mixture for wearing course, addition of 20% of RAP material resulted in a 45% decrease. In case of AC 16W mixture for binder course, addition of RAP material resulted in a decrease of 30-35% for both 20% and 40% RAP content. In case of AC 22P mixtures, a decrease in flexural strength with an increase in RAP material content is visible for mean values, but the change is within the range of scatter of test results. The decrease is lesser in the case of good quality RAP material. Addition of low quality RAP(b) material resulted in a decrease by around 15-30%

wszystkich badanych mieszanek wartości wytrzymałości na zginanie i odkształcenia granicznego są niższe dla mieszanek z dodatkiem granulatu asfaltowego. Zmiany modułu sztywności i wskaźnik usztywnienia są również dostrzegalne, ale zależność nie jest tak prosta jak w przypadku dwóch wcześniej wymienionych parametrów. Każda właściwość została omówiona oddzielnie poniżej. W przypadku betonu asfaltowego AC 22P do warstwy podbudowy jakość granulatu i użycie środka odmładzającego lepszycze zostały uwzględnione w omówieniu wyników badań.

in comparison to the reference mixture, and of 10-20% in comparison to the mixture containing good RAP material. The addition of rejuvenator improved by around 25% flexural strength of the mixture with 40% of RAP(b) material in comparison to the same mixture without rejuvenator agent. Nevertheless, the obtained value is still lower than the one for the reference mixture and the mixture with 40% of good RAP material.

Table 3. Results of bending tests on asphalt concrete beams

Tablica 3. Wyniki badania zginania belek z betonu asfaltowego

Type of mixture Rodzaj mieszanki	Flexural strength [MPa] Wytrzymałość na zginanie		Ultimate strain [%] Odkształcenie graniczne		Stiffness modulus [GPa] Moduł sztywności		Stiffening ratio Wskaźnik usztywnienia
	-20°C	+10°C	-20°C	+10°C	-20°C	+10°C	
AC 22P 35/50 (0% RAP)	6.85	3.31	0.61	8.17	14.60	2.47	0.569
AC 22P 35/50 (20% RAP)	6.48	3.89	0.51	6.49	14.65	3.04	0.590
AC 22P 35/50 (40% RAP)	6.52	4.00	0.62	7.25	11.77	2.70	0.483
AC 22P 35/50 (60% RAP)	6.25	4.90	0.46	6.69	16.26	3.15	0.647
AC 22P 35/50 (20% RAP(b))	5.76	4.04	0.48	4.72	13.64	3.44	0.569
AC 22P 35/50 (40% RAP(b))	4.90	5.25	0.40	3.15	13.13	5.11	0.608
AC 22P 35/50 (40% RAP(b) + rejuvenator / śr. odmładzający)	6.24	4.43	0.47	5.63	13.65	3.59	0.575
AC 16W 35/50 (0% RAP)	9.99	4.37	0.75	10.02	13.78	2.15	0.531
AC 16W 35/50 (20% RAP)	6.53	3.94	0.67	5.08	12.34	3.20	0.518
AC 16W 35/50 (40% RAP)	6.89	4.80	0.60	4.65	15.95	4.62	0.686
AC 11S 45/80-55 (0% RAP)	10.56	3.60	0.89	10.64	13.64	2.07	0.524
AC 11S 45/80-55 (20% RAP)	5.72	2.97	0.60	7.16	11.57	1.93	0.450

5.2. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE

Wszystkie badane mieszanki wykazały spadek wytrzymałości na zginanie w temperaturze -20°C. W przypadku mieszanki AC 11S do warstw ścieralnych 20% dodatek granulatu asfaltowego spowodował 45% spadek, zaś w przypadku mieszanki AC16W do warstw wiążących dodatek granulatu skutkowało spadkiem na poziomie 30-35% dla obu zawartości granulatu tj. 20% i 40%. W przypadku mieszanek AC 22P spadek wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem zawartości granulatu jest zauważalny dla wartości średnich, lecz zmiana jest w zakresie rozrzutu wyników badań. Spadek jest mniejszy w przypadku granulatu dobrej jakości. Dodatek granulatu niskiej jakości – RAP(b) – skutkowało spadkami o około 15-30% w porównaniu z mieszanką odniesienia i o 10-20% w porównaniu z mieszanką zawierającą dobry granulat asfaltowy. Dodatek środka odmładzającego lepszycze poprawiał o około 25% wytrzymałość na zginanie mieszanki z 40% zawartością granulatu RAP(b) w porównaniu z taką samą mieszanką bez

In terms of absolute values, addition of RAP to the mixtures for wearing and binder courses resulted in flexural strength values similar to those of the mixtures for base layer. The decrease in value is in the range from 3.1 to 4.8 MPa. For comparison, in the case of mixture for base layer, the greatest decrease in value equals 1.9 MPa.

5.3. ULTIMATE STRAINS

Ultimate strains show similar behaviour to flexural strength at the temperature of -20°C. All the tested mixtures presented a decrease in the values of ultimate strain with an increase in amount of RAP material. In the case of AC 11S mixture for wearing course, addition of 20% of RAP material resulted in a 33% decrease of ultimate strain. In the case of AC 16W mixture for binder course, addition of RAP material resulted in a decrease by 10-20%. For AC 22P mixtures the decrease in ultimate strain ranged from 17 to 25% in the case of good quality RAP and from 22 to 35% in the case of RAP(b) material.

środka odmładzającego. Uzyskana wartość była jednak wciąż niższa niż dla mieszanki odniesienia i mieszanki z 40% zawartością dobrego granulatu asfaltowego.

The results obtained for RAP(b) material were 10 to 35% lower than for good RAP material. Addition of rejuvenator agent increased the value of ultimate strain for the mixture with 40% of RAP(b) material by around 15%.

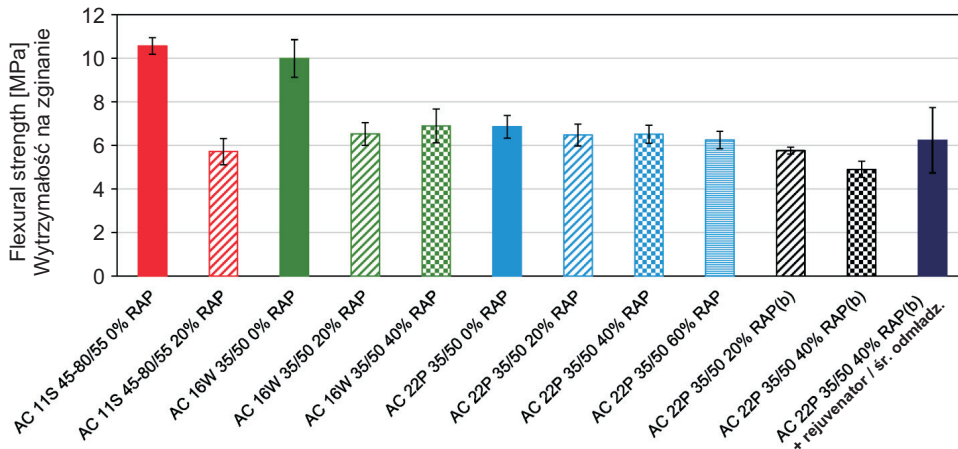


Fig. 2. Flexural strength, temperature -20°C
Rys. 2. Wytrzymałość na zginanie, temperatura -20°C

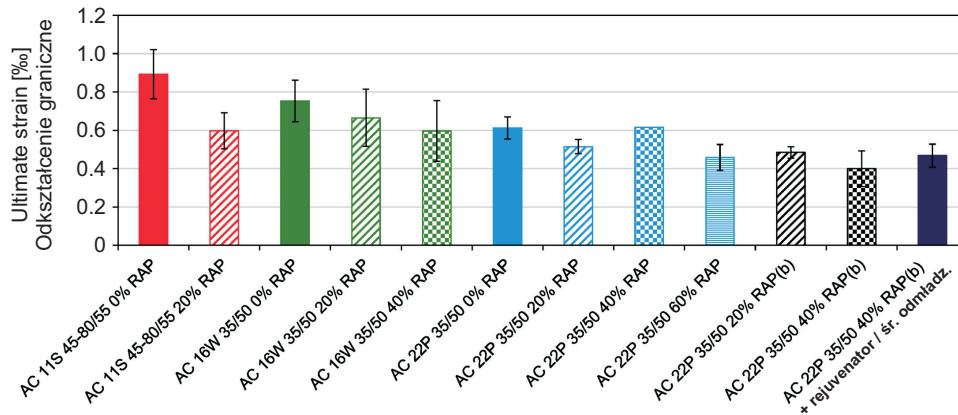


Fig. 3. Ultimate strain, temperature -20°C
Rys. 3. Odształcenie graniczne, temperatura -20°C

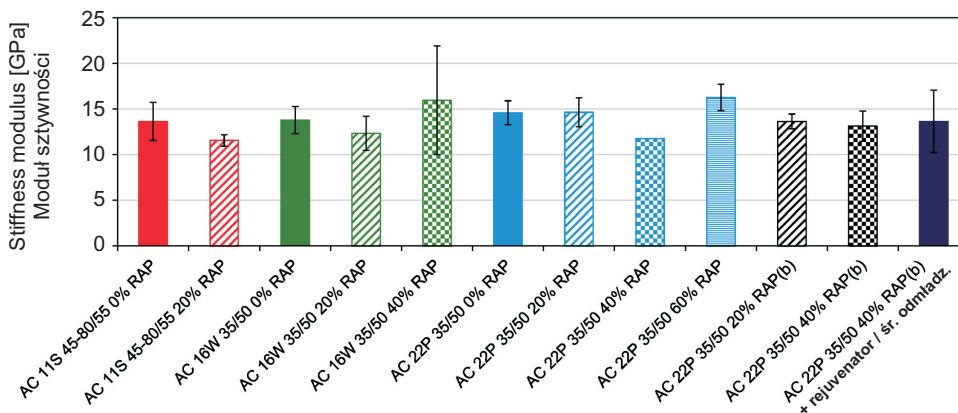


Fig. 4. Stiffness modulus, temperature -20°C
Rys. 4. Moduł sztywności, temperatura -20°C

Biorąc pod uwagę wartości bezwzględne dodatek granulatu do mieszanki do warstw ściernych i wiążących skutkowało w odniesieniu do wytrzymałości na zginanie wartościami zbliżonymi do tych dla mieszanki do warstw podbudowy.

5.4. STIFFNESS MODULUS

For the stiffness modulus correlations are not as clear as in the case of mechanical properties discussed in p. 5.2 and p. 5.3. While some mixtures presented a decrease in the

Spadki wartości mieściły się w zakresie od 3,1 do 4,8 MPa. Dla porównania, w przypadku mieszanki do warstw podbudowy największy spadek wartości wynosił 1,9 MPa.

5.3. ODKSZTAŁCENIE GRANICZNE

Odkształcenia graniczne wykazują podobną zależność jak wytrzymałość na zginanie w temperaturze -20°C . Wszystkie badane mieszanki wykazały spadki wartości odkształceń granicznych wraz ze wzrostem zawartości granulatu asfaltowego. W przypadku mieszanki AC 11S do warstw ścieralnych 20% dodatek granulatu spowodował 33% spadek odkształceń granicznych, zaś w przypadku mieszanki AC 16W do warstw wiążących dodatek granulatu skutkowało spadkiem 10-20%. Dla mieszanek AC 22P spadki w odkształceniach granicznych zawierały się w granicach od 17 do 25% w przypadku dobrej jakości granulatu i od 22 do 35% w przypadku granulatu RAP(b). Wyniki uzyskane dla granulatu RAP(b) były od 10% do 35% niższe niż dla granulatu dobrej jakości. Dodatek środka odmładzającego lepiszcze podwyższył wartości odkształceń granicznych mieszanki z 40% udziałem granulatu RAP(b) o około 15%.

5.4. MODUŁ SZTYWNOŚCI

W odniesieniu do modułu sztywności zależności nie są tak czytelne jak w przypadku właściwości mechanicznych omówionych w 5.2 i p. 5.3. Podczas, gdy niektóre mieszanki wykazywały spadki wartości modułu (AC 11S do warstw ścieralnych), w przypadku innych notowano lekki wzrost (AC 16W do warstw wiążących z 40% granulatu). Ogólnie nawet jeśli mieszanki różniły się pod względem tendencji zmian, to najczęściej zmiany te w temperaturze -20°C były mniejsze niż rozrzut wyników badań, a uzyskane wartości były podobne. Większe zmiany odnotowano w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$, przy której wszystkie mieszanki wykazywały wzrosty modułu sztywności wraz ze wzrostem ilości granulatu. Należy zauważyć, że inne badania laboratoryjne (nie omówione w tym artykule) mieszanek z zawartością granulatu asfaltowego wykazywały wzrost wartości modułu sztywności w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$ oraz -20°C . Wzrosty te mieściły się w przedziale od 1000 MPa do 3000 MPa. Tak niewielka zmiana modułu sztywności mogłaby wynikać z nadmiernego starzenia lepiszcza w granulacie asfaltowym, jego większej sztywności i w konsekwencji szybszego przejścia w stan szklisty.

6. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań wskazują, że wszystkie badane mieszanki zawierające granulaty asfaltowe wykazują pogorszenie właściwości mechanicznych w niskich wartościach temperatury – spadek wytrzymałości na zginanie oraz odkształcenia granicznego. Niektóre mieszanki wykazały również niewielki

value (AC 11S for wearing course), some presented a slight increase (AC 16W for binder course with 40% of RAP material). Generally, even if the mixtures differed in the trends of change, in most cases the changes at the temperature of -20°C were lesser than the scatter of test results and the obtained values were similar. Greater changes are visible at the temperature of $+10^{\circ}\text{C}$, at which all mixtures presented an increase in stiffness modulus as the amount of RAP material increased. It should be also noted that in other laboratory tests (not presented in this article) mixtures with RAP material presented an increase in the values of stiffness modulus at temperatures of $+10^{\circ}\text{C}$ and -20°C . The increase ranged from 1,000 up to 3,000 MPa. Such a small change of modulus could have resulted from excessive ageing of binder in RAP material, its higher stiffness and, as a consequence, faster glass transition.

6. DISCUSSION OF TEST RESULTS

Test results indicate that all tested mixtures with RAP content show deterioration of mechanical properties at low temperatures – a decrease of flexural strength and ultimate strain. Some mixtures also presented a small increase of stiffness modulus. Probable causes of this changes include: decreased amount of virgin bitumen, which is partly replaced by an old binder in the mixtures with RAP, lack of full activation of bitumen contained in the RAP material [23], difference in the properties of virgin and reclaimed bitumen and excessive ageing of the reclaimed binder in case of RAP(b).

It should be noted that mechanical properties presented in this paper should be analysed together with viscoelastic properties of the mixtures, which are not discussed in this study. Generally, a decrease in flexural strength results in higher temperatures at which thermal cracks occur in asphaltic course. When all the results of all the tested mixtures are compared, the results of ultimate strain and flexural strength of mixtures for binder and wearing courses with addition of RAP material present values similar to those of the reference mixture for base course without RAP material. While such values are acceptable for base course, it is debatable for wearing and binder courses, where materials are subjected to more severe climatic conditions [24]. Mixtures for binder and wearing courses (with higher bitumen content) present higher stiffness modulus. All these factors lead to earlier appearance of thermal cracking.

Another factor which influences and shows susceptibility of an asphalt mixture to thermal cracking is the scatter of test results. Mixtures with RAP material present higher

modułu sztywności. Prawdopodobne przyczyny tych zmian to: zmniejszona ilość nowego asfaltu, który jest częściowo zastępowany starym asfaltem zawartym w granulacie, brak pełnej aktywacji asfaltu zawartego w granulacie [23], różnice właściwości asfaltu nowego i odzyskanego oraz nadmierne starzenie asfaltu odzyskanego w przypadku granulatu niższej jakości – RAP(b).

Należy zauważyć, że właściwości mechaniczne przedstawione w artykule powinny być analizowane łącznie z lepko-sprężystymi właściwościami mieszanek, które nie są tutaj omówione. Ogólnie rzecz biorąc, spadek wytrzymałości na zginanie skutkuje wzrostem temperatur, w których pojawiają się spękania termiczne w warstwie asfaltowej. Porównanie wszystkich wyników dla wszystkich badanych mieszanek pozwala na stwierdzenie, że wyniki badań odkształcenia granicznego i wytrzymałości na zginanie dla warstw wiążącej i ścieralnej z dodatkiem granulatu asfaltowego mają wartości podobne do uzyskanych dla mieszanki referencyjnej do warstwy podbudowy, bez dodatku granulatu. Choć takie wartości są do przyjęcia w warstwie podbudowy, to są dyskusyjne w odniesieniu do warstw ścieralnych i wiążących, gdzie materiały są narażone na bardziej surowe warunki klimatyczne [24]. Mieszanki do warstw wiążących i ścieralnych (z większą zawartością asfaltu) odznaczają się wyższymi modułami sztywności. Wszystkie te czynniki prowadzą do wcześniejszego pojawienia się spękań termicznych.

Innym czynnikiem mającym wpływ i pokazującym wrażliwość mieszanki mineralno-asfaltowej na spękania temperaturowe jest rozrzut wyników badań. Mieszanki z granulatem asfaltowym wykazują większy rozrzut zarówno w odniesieniu do właściwości mechanicznych jak i lepko-sprężystych. Jest to widoczne zwłaszcza w przypadku mieszanek AC 16W do warstw wiążących. Niejednorodność materiału w warstwie i większy rozrzut wartości parametrów mogą zwiększyć prawdopodobieństwo powstawania spękań termicznych i spowodować wzrost temperatury pęknięcia nawet o 2-3°C [25].

7. WNIOSKI

Przeprowadzone badania laboratoryjne pozwalają sformułować następujące wnioski:

- Zastosowanie granulatu asfaltowego w betonach asfaltowych doprowadziło do pogorszenia właściwości mechanicznych w niskich wartościach temperatury w odniesieniu do warstw nawierzchni, we wszystkich badanych przypadkach. Największe zmniejszenie wytrzymałości na zginanie nastąpiło w temperaturze -20°C dla betonów asfaltowych w warstwach ścieralnych i wiążących, odpowiednio o 45% i 31-35%. Najmniejszą redukcję zanotowano w przypadku betonu asfaltowego do warstw podbudowy.

scatter for both mechanical and viscoelastic properties. It is especially visible in the case of AC 16W mixtures for binder course. Heterogeneity of material within the layer and higher scatter of the values of parameters can lead to greater probability of thermal cracking and an increase of cracking temperature even by 2-3°C [25].

7. CONCLUSIONS

The conducted laboratory tests enable formulation of the following conclusions:

- Usage of RAP material in asphalt concretes led to deterioration of mechanical properties at low temperatures for all pavement layers in all cases tested. The largest reduction of flexural strength was visible at the temp. of -20°C for asphalt concretes for wearing and binder courses, by 45% and 31-35% respectively. The lowest reduction was visible in the case of asphalt concrete for base layer.
- Lower quality of RAP material had unfavourable effect on low-temperature properties of base course asphalt mixture. Mixtures with low-quality RAP material presented worse mechanical properties in comparison to the mixtures with the same amount of better RAP material. The obtained values of flexural strength and ultimate strain at -20°C were reduced by 6% to 10% when 20% of RAP(b) was used, and by 25% to 35% when 40% of RAP(b) was used.
- Usage of rejuvenator improved low-temperature mechanical properties of the mixture with RAP(b) material. The results of laboratory test were better than those for the same mixture without rejuvenator. The increase in the values of flexural strength and ultimate strain at the temperature of -20°C amounted to 21% and 15% respectively.
- In the case of stiffness modulus, the results obtained in a specific group of mixtures (i.e. for wearing, binder and base courses separately) were slightly higher for the mixtures with RAP content, but the change was within the scatter of test results for a given mixture.

The conducted laboratory tests have shown that increasing the amount of RAP material in an asphalt concrete can lead to premature pavement deterioration originating from influence of low temperatures. This phenomenon calls for due attention, as low-temperature cracks may appear more often in asphalt mixtures with RAP than in those without RAP. The performed test proved that three-point bending test of asphalt mixture beams can be successfully used to distinguish between better and worse mixtures in terms of low temperature effects.

- Niższa jakość granulatu asfaltowego miała niekorzystny wpływ na niskotemperaturowe właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej w warstwie podbudowy. Mieszanki z granulatem asfaltowym niskiej jakości wykazywały gorsze właściwości mechaniczne w porównaniu z mieszankami zawierającymi tę samą ilość lepszego granulatu. Uzyskane wartości wytrzymałości na zginanie i odkształcenia granicznego w temperaturze -20°C były zmniejszone o 6% do 10%, gdy użyto 20% granulatu niższej jakości RAP(b) i o 25% do 35%, gdy użyto 40% tego granulatu.
- Użycie środka odmładzającego lepiszcze poprawiło niskotemperaturowe mechaniczne właściwości mieszanki z granulatem niższej jakości – RAP(b). Wyniki badań laboratoryjnych były lepsze niż uzyskane dla takiej samej mieszanki bez odświeżacza jako środka odmładzającego. Wzrost wartości wytrzymałości na zginanie i odkształcenia granicznego w temperaturze -20°C wynosił odpowiednio 21% i 15%.
- W przypadku modułu sztywności wyniki uzyskane dla wybranej grupy mieszanek (tj. oddzielnie dla warstw ścieżalnej, wiążącej i podbudowy) były nieco wyższe dla mieszanek zawierających granulaty, ale zmiana ta mieściła się w rozrzucie wyników badań dla danej mieszanki.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że zwiększenie ilości granulatu asfaltowego w betonie asfaltowym może prowadzić do przedwczesnego uszkodzenia nawierzchni na skutek wpływu niskich wartości temperatury. To zjawisko wymaga należytej uwagi ponieważ niskotemperaturowe spękania mogą pojawiać się częściej w mieszankach mineralno-asfaltowych z granulatem asfaltowym niż w tych bez jego zawartości. Przeprowadzone badania potwierdziły, że test trzypunktowego zginania belek wyciętych z mieszanki mineralno-asfaltowej może być z powodzeniem użyty do rozpoznania lepszych i gorszych mieszanek w warunkach oddziaływania niskich wartości temperatury.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania były wykonane w zakresie realizacji projektu RID-1A „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu” finansowanego przez Krajowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach wspólnego przedsięwzięcia „Rozwój Innowacji Drogowych”.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] *Bańkowski W., Król J., Gałazka K., Liphardt A., Horodecka R.*: Design and verification of bituminous mixtures with the increased content of reclaimed asphalt pavement. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 356, 2018, 012009, DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012009

ACKNOWLEDGEMENTS

The research project was supported by the project RID-1A financed by the National Centre for Research and Development and the General Directorate for National Roads and Motorways under the programme “Road Innovations Development”.

- [2] *Bańkowski W.*: Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement. Applied Sciences, 8, 3, 2018, 469, DOI: 10.3390/app8030469
- [3] *Kowalski K.J., Król J.B., Bańkowski W., Radziszewski P., Sarnowski M.*: Thermal and Fatigue Evaluation of Asphalt Mixtures Containing RAP Treated with a Bio-Agent. Applied Sciences, 7, 3, 2017, 216, DOI: 10.3390/app7030216
- [4] *Izaks R., Haritonovs V., Klasa I., Zaumanis M.*: Hot Mix Asphalt With High RAP Content. Procedia Engineering, 114, 2015, 676-684
- [5] *West R.C., Copeland A.*: High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice - Lessons Learned. National Asphalt Pavement Association, Information Series, 139, December 2015
- [6] *Zhu Y., Dave E.V., Rahbar-Rastegar R., Daniel J.S., Zofka A.*: Comprehensive evaluation of low-temperature fracture indices for asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design, 18, 4, 2017, 467-490, DOI: 10.1080/14680629.2017.1389085
- [7] *Johnson E., Watson M., Olson R., Moon K.H., Tuross M., Marasteanu M.*: Recycled Asphalt Pavement: Study of High-RAP Asphalt Mixtures on Minnesota County Roads. Minnesota Department of Transportation, Report No. MN/RC 2013-15, May 2013
- [8] *McDaniel R.S., Kowalski K.J., Shah A.*: Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement for Surface Mixtures. North Central Superpave Center, Joint Transportation Research Program, Report No. FHWA/IN/JTRP-2012/06, March 2012
- [9] *McDaniel R.S., Shah A., Huber G.A., Copeland A.*: Effects of Reclaimed Asphalt Pavement Content and Virgin Binder Grade on Properties of Plant Produced Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 81, 2012, 369-401
- [10] *Al-Qadi I.L., Aurangzeb Q., Carpenter S.H., Pine W.J., Trepanier J.*: Impact of High RAP Contents on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures. University of Illinois, Department of Civil and Environmental Engineering, Research Report No. FHWA-ICT-12-002, June 2012

- [11] *Al-Qadi I.L., Carpenter S.H., Roberts G.L., Ozer H., Aurangzeb Q., Elseifi M.A., Trepanier J.*: Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP. University of Illinois, Department of Civil and Environmental Engineering, Report No. FHWA-ICT-09-031, January 2009
- [12] *Al-Qadi I.L., Ozer H., Lambros J., El Khatib A., Singhvi P., Khan T., Rivera-Perez J., Doll B.*: Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS. University of Illinois, Department of Civil and Environmental Engineering, Research Report No. FHWA-ICT-15-017, December 2015
- [13] *West R., Willis J.R., Marasteanu M.*: Improved Mix Design, Evaluation and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with high Reclaimed Asphalt Pavement Content. NCHRP Report 752, Transportation Research Board, Washington D.C., 2013
- [14] *Al-Qadi I.L., Wu S., Lippert D.L., Ozer H., Barry M.K., Safi F.R.*: Impact of High Recycled Mixes on HMA Overlay Crack Development Rate. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, **86**, 2017, 427-447
- [15] *Hajj E.Y., Sebaaly P.E., Shrestha R.*: A Laboratory Evaluation on the Use of Recycled Asphalt Pavements in HMA Mixtures. University of Nevada, January 2007
- [16] *Roque R., Yan Y., Cocconcelli C., Lopp G.*: Perform an Investigation of the Effects of Increased Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Levels in Dense Graded Friction Courses. University of Florida, Department of Civil and Coastal Engineering, April 2015
- [17] *Yan Y., Roque R., Hernando D., Lopp G.*: Development of a New Methodology to Effectively Predict the Fracture properties of RAP Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, **86**, 2017, 507-525
- [18] *Islam Md.R., Mannan U.A., Rahman ASM.A., Tarefder R.A.*: Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Hot-mix Asphalt. Advances in Civil Engineering Materials, **3**, 1, 2014, 291-307
- [19] *Newcomb D.E., Epps J.A., Zhou F.*: Use of RAP & RAS in High Binder Replacement Asphalt Mixtures: A Synthesis. National Asphalt Pavement Association, Special Report 213, 2016
- [20] Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. WT-2:2014. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne. GDDKiA, Warszawa 2014.
- [21] *Judycki J.*: Bending test of asphaltic mixtures under static loading. Proceedings of the Fourth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control, Budapest, 1990, 207-227
- [22] *Pszczola M., Jaczewski M., Ryś D., Jaskula P., Szydłowski C.*: Evaluation of Asphalt Mixture Low-Temperature Performance in Bending Beam Creep Test. Materials, **11**, 1, 100, 2018, DOI: 10.3390/ma11010100
- [23] *Liphardt A., Radziszewski P.*: Analysis of viscoelastic properties of binders recovered from bituminous mixtures containing addition of reclaimed asphalt pavement. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **18**, 1, 2019, 39-50, DOI: 10.7409/rabdim.019.003
- [24] *Pszczola M., Ryś D., Jaskula P.*: Analysis of climatic zones in Poland with regard to asphalt performance grading. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 4, 2017, 245-264, DOI: 10.7409/rabdim.017.016
- [25] *Judycki J., Jaskula P., Dołżycki B., Pszczola M., Jaczewski M., Ryś D., Stienss M.*: Investigation of low-temperature cracking in newly constructed high-modulus asphalt concrete base course of a motorway pavement. Road Materials and Pavement Design, **16**, 1, 2015, 362-388, DOI: 10.1080/14680629.2015.1029674