

PIOTR ZIELIŃSKI¹⁾

TESTING OF ASPHALT MIXTURES CONTAINING AN ADDITION OF RECLAIMED ASPHALT SHINGLES

BADANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH Z DODATKIEM ODPADOWYCH PAP BITUMICZNYCH

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości betonu asfaltowego z dodatkiem ścinków bitumicznych gontów papowych (RAS), będące uzupełnieniem wcześniejszych prac. Jako mieszankę referencyjną przyjęto AC 16 W 50/70, do której odniesiono wyniki uzyskane dla mieszanki laboratoryjnej z dodatkiem 4% RAS oraz mieszanki z dodatkiem 1% RAS (wyprodukowanej w wytwórni). Analiza statystyczna w zakresie zawartości wolnych przestrzeni w mieszankach mineralno-asfaltowych nie wykazała istotnych różnic, co pozwala porównać cechy eksploatacyjne mieszank bez obciążenia wpływem cech fizycznych. Badania potwierdziły istotny wzrost sztywności mieszank wraz ze zwiększeniem dodatku RAS, zwłaszcza w średnich (15°C) wyższych (30°C) temperaturach użytkowych. Mieszanki z dodatkiem RAS wykazały wzrost w stosunku do mieszanki referencyjnej także w zakresie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie. Jednocześnie stwierdzono mniejszą wrażliwość termiczną mieszank z RAS, zarówno w aspekcie modułu sztywności jak i wytrzymałości na rozciąganie pośrednie. Badania zmęczeniowe potwierdziły pozytywny efekt dodatku gontów papowych do mieszanki na uzyskaną wartość odkształcenia odpowiadającego trwałości 1 miliona cykli obciążeń.

SŁOWA KLUCZOWE: charakterystyka zmęczeniowa, mieszanki mineralno-asfaltowe, moduł sztywności sprężystej, odpadowa papa bitumiczna (RAS), trwałość zmęczeniowa, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (ITS).

ABSTRACT. The article presents test results of chosen properties of asphalt concrete mixtures with addition of asphalt shingle offcuts (reclaimed asphalt shingles, RAS). The presented research supplements previous works on the subject. Asphalt concrete AC 16 W 50/70 was adopted as the reference mixture. Results obtained for laboratory-produced mixture containing 4% RAS and plant-produced mixture containing 1% RAS were compared with the results of the reference mixture. Statistical analysis of void content in asphalt mixtures did not indicate significant differences; therefore, performance properties of mixtures may be compared without concern about the influence of physical properties. The research confirmed a significant increase in mixture stiffness with an increase in RAS content, especially at medium (15°C) and high (30°C) service temperatures. Compared to the reference mixture, mixtures incorporating RAS displayed an increase in indirect tensile strength as well. Lower temperature sensitivity of mixtures with RAS was also observed, both in terms of stiffness modulus and indirect tensile strength. Fatigue tests confirmed the positive effect of RAS on the obtained value of strain corresponding to fatigue life of 1 million load cycles.

KEYWORDS: asphalt mixtures, elastic stiffness modulus, fatigue characteristics, fatigue life, indirect tensile strength (ITS), reclaimed asphalt shingles (RAS).

1. WPROWADZENIE

W dobie zrównoważonego rozwoju konieczne jest efektywne gospodarowanie zasobami, co można realizować m.in. poprzez zwiększenie udziału stosowania materiałów z recyklingu [1]. Dotyczy to także budownictwa drogowego, gdzie coraz powszechniej wykorzystuje się materiały uzyskane z rozbiórki istniejących konstrukcji nawierzchni w postaci: destruktu asfaltowego (RAP), betonowego czy kruszywa ze starych podbudów. Ponadto coraz silniej rozwija się w świecie nurt stosowania do budowy dróg materiałów poprodukcyjnych, będących odpadami z produkcji materiałów budowlanych czy z innych gałęzi przemysłu. Materiały te mogą być stosowane w nasypach komunikacyjnych, jak również w ulepszonym podłożu i warstwach konstrukcyjnych nawierzchni drogowych. W przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) stosowanych w warstwach nawierzchniowych, podstawowym materiałem z recyklingu jest granulata asfaltowa, pochodzący z rozbiórki starej nawierzchni asfaltowej. Ponadto stosuje się np. kruszywa z żużli hutniczych (stalownicze, pomiedziowe), granulata ze zużytych opon samochodowych (jako kruszywo i modyfikator asfaltu), stłuczkę szklaną (jako zamiennik kruszywa), piaski formierskie z przemysłu odlewniczego (jako zamiennik części frakcji piaskowej), granulowane odpady tworzyw sztucznych itp. Duży potencjał wykazuje wykorzystanie odpadowych pap bitumicznych (RAS - ang. Reclaimed Asphalt Shingles), które zawierają w swoim składzie ok. 20-35% asfaltu, a ponadto posypkę mineralną, welon nośny (np. szklany), wypełniacze czy folię polipropylenową (jako warstwę zapobiegającą sklejanemu się papy w roli). Tak duży udział lepiszcza powoduje, że już niewielki dodatek RAS, w zakresie 3-4% MMA, pozwala znacząco zmniejszyć ilość dozowanego nowego asfaltu, np. z 4,5% do 3,5%. Zależnie od pochodzenia RAS wyróżniamy odpady poprodukcyjne, np. ścinki z produkcji gontów bitumicznych, oraz materiały zużyte, zdarte z pokryć dachowych. Badania nad wykorzystaniem RAS jako składnika MMA są prowadzone od ponad 30 lat [2], przede wszystkim w USA i Kanadzie. Od ponad 10 lat istnieją już w tych krajach odpowiednie specyfikacje techniczne dotyczące mieszanek z RAS. W praktyce wykonawczej częściej stosuje się dodatek RAS w metodzie na sucho, tj. dozując go i mieszając z gorącym kruszywem, a dopiero potem dodając nowy asfalt. Ilość materiału RAS wykorzystanego do mieszanek mineralno-asfaltowych w USA w ciągu ostatnich 10 lat wynosiła 0,7-2,0 mln ton rocznie, podczas gdy zużycie RAP wynosi tam ok. 70 mln ton rocznie [3]. Hansen i Copeland [4] podają, że zastosowanie RAS jako dodatku do MMA w USA wzrosło z poziomu 0,70 mln ton w 2009 r. do 1,93 mln ton w roku 2015. Technologia stosowania materiałów RAS w Europie nie jest równie popularna

1. INTRODUCTION

In the age of sustainable development, it is necessary to exercise effective resource management, which encompasses intensified usage of recycled materials [1]. This also pertains to road construction – increasingly often recycled pavement materials are used, including reclaimed asphalt pavements (RAP), reclaimed concrete pavements and aggregate from old base courses. Moreover, there is a growing international trend in road construction that consists in usage of waste from manufacture of construction materials and other industry sectors. Such waste material may be used in embankments, improved subgrade and structural layers of road pavements. In the case of asphalt mixtures for pavement layers, the primary recycled material originates from reclaimed and reprocessed asphalt pavements. Other recycled materials used in road construction include: furnace slag (steel, copper), crumb rubber (both as aggregate and bitumen modifier), glass cullet (as aggregate replacement), waste foundry sand (as partial replacement of the sand fraction), granulated plastic waste etc. Considerable potential is associated with usage of reclaimed asphalt shingles (RAS), which contain 20-35% of bitumen, along with mineral surfacing, reinforcement (e.g. glass fiber), fillers or polypropylene film (to prevent the shingles from sticking in rolls). Due to high bitumen content, even a small addition of RAS, such as 3-4%, enables a significant reduction in the quantity of new bitumen used in the asphalt mixture - e.g. from 4.5% to 3.5%. Depending on its source, RAS may be divided into manufacture waste (such as offcuts from production of shingles) or tear-off material (reclaimed from roofing). Usage of RAS in asphalt mixtures has been the subject of research for over 30 years [2], primarily in the USA and Canada. In these countries appropriate technical specifications regarding mixtures incorporating RAS have been in force for over 10 years. In practical applications, RAS addition is more often dosed using the “dry mixing” method, i.e. RAS is mixed with hot aggregate before new bitumen is added. The quantity of RAS material used in asphalt mixtures in the USA in the last 10 years ranged from 0.7 to 2.0 million ton per year, whereas usage of RAP in the USA reaches approx. 70 million ton per year [3]. Hansen and Copeland [4] report that usage of RAS in asphalt mixtures in the USA increased from 0.7 million ton in 2009 to 1.93 million ton in 2015. Usage of RAS materials in Europe is not as popular. There are no detailed data on application of RAS; however, products consisting of granulated RAS are available on the market and used, e.g. in Germany and Italy. In Poland known applications

i brakuje szczegółowych danych dotyczących ich wykorzystania, niemniej produkty w postaci granulatu RAS są dostępne i stosowane np. na rynku niemieckim czy włoskim. W Polsce znane są nieliczne zastosowania RAS w MMA, chociaż potencjalna dostępność tego materiału wynosi około 70-90 tysięcy ton rocznie (wg danych GUS), co przy zastosowaniu dodatku RAS w ilości 2% do MMA umożliwiłoby wyprodukowanie ok. 3,5-4,5 miliona ton mieszanki mineralno-asfaltowej z dodatkiem RAS oraz zaoszczędzenie ok. 20-30 tysięcy ton asfaltu. Dodatkową korzyścią byłoby zmniejszenie zużycia kruszywa drobnego o około 50-60 tysięcy ton i równoczesne zagospodarowanie wszystkich odpadów z papy bitumicznej.

Dotychczasowe badania własne mieszanek z dodatkiem ścinaków z produkcji bitumicznych gontów papowych (RAS) [5-8] prowadzą do następujących wniosków:

- dodatek RAS nie zmienia istotnie cech fizycznych mieszanki (gęstość, gęstość objętościowa, zawartość wolnych przestrzeni),
- wraz ze wzrostem dodatku RAS następuje poprawa odporności na koleinowanie mieszanki mineralno-asfaltowej,
- mimo dodania RAS nie zaobserwowano zmiany odporności MMA na spękania niskotemperaturowe, zarówno temperatura pęknięcia jak i naprężenie przy pęknięciu były na zbliżonym poziomie,
- dodatek RAS może nieznacznie pogorszyć odporność MMA na działanie wody i mrozu, rozwiązaniem tego problemu jest zadbanie o zapewnienie szczelności mieszanki poprzez odpowiednią korektę składu,
- opracowane krzywe wiodące modułu sztywności wskazują na mniejszą wrażliwość termiczną mieszanek z RAS, tj. minimalna sztywność mieszanki z dodatkiem 4% RAS jest około dwukrotnie wyższa od sztywności mieszanki referencyjnej, podczas gdy sztywność maksymalna obu mieszanek jest zbliżona,
- wyniki odporności na zmęczenie są niejednoznaczne, badania powinny być uzupełnione o testy przy stałym poziomie odkształcenia.

W artykule przedstawiono wyniki badań uzupełniających dla mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem RAS i bez tego dodatku, obejmujące – oprócz cech fizycznych – moduł sztywności sprężystej i wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w funkcji temperatury, jak również odporność na zmęczenie, badaną w trybie stałego poziomu odkształcenia metodą belki czteropunktowo zginanej.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Kluczem do oceny właściwości MMA jest w pierwszym kroku określenie właściwości zastosowanego lepiszcza asfaltowego.

of RAS in asphalt mixtures are few, despite the potential availability of such material ranging from 70 to 90 thousand ton per year (according to the data collected by Central Statistical Office in Poland). Assuming addition of 2% of RAS, such quantities would enable yearly production of 3.5 to 4.5 million ton of asphalt mixtures incorporating RAS, resulting in yearly savings on 20 to 30 thousand ton of new bitumen. Additional advantages would include reduction in yearly usage of fine aggregates by around 50-60 thousand ton and disposal of all asphalt shingle waste.

Previous research performed by the author on asphalt mixtures containing offcuts from asphalt shingle production (RAS) [5-8] led to the following conclusions:

- addition of RAS does not significantly change the physical properties of the mixture (maximum density, bulk density, air voids),
- rutting resistance of the mixture improves with an increase in RAS content,
- despite addition of RAS, no change in resistance to low-temperature cracking was observed – both the cracking temperature and cracking stress remained on comparable levels,
- RAS addition may slightly deteriorate the resistance of mixture to water and frost action – the problem may be mitigated by providing water-tightness through adequate adjustments in mixture composition,
- the obtained stiffness modulus master curves indicate a lower thermal sensitivity of the mixtures with RAS, i.e. the minimum stiffness of mixture with 4% RAS is about twice as high as the stiffness of the reference mixture, while the maximum stiffness values of the two mixtures are similar,
- fatigue test results were inconclusive, the research should be supplemented with fatigue tests in strain-controlled mode.

This work presents the results of supplementary tests performed on asphalt mixtures with and without RAS. The tests – apart from determination of physical properties – encompassed elastic stiffness modulus, indirect tensile strength (as a function of temperature) and fatigue resistance determined in four-point bending beam (prismatic) test in strain-controlled mode.

2. LITERATURE REVIEW

The primary element in evaluation of asphalt mixture characteristics is determination of the properties of bitumen. As stated in the SHRP report [9], bitumen affects the properties of the asphalt mixture to the greatest degree:

Jak wynika z raportu SHRP [9], asfalt odpowiada za właściwości MMA w następującym stopniu: 40% w przypadku odporności na koleinowanie, 60% dla właściwości zmęczeniowych i 90% w zakresie odporności na spękania niskotemperaturowe. Prowadzone przez Zhou z zespołem [10, 11] badania lepiszcza zawierającego RAS wskazują na jego znacznie wyższą sztywność w porównaniu do asfaltów drogowych, przy czym wzrost sztywności jest wyższy dla pap poeksploatacyjnych (TOAS) niż dla odpadów z produkcji (MWAS). Foxlow, Daniel i Swamy [12], badając lepiszcze z RAS, stwierdzili jego większą sztywność w wysokich temperaturach eksploatacyjnych niż w przypadku asfaltu z recyklingu nawierzchni (RAP) oraz wyższą odporność na spękania niskotemperaturowe.

W przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem RAS mamy do czynienia z lepiszczem asfaltowym mieszanym, powstałym z połączenia lepiszcza pochodzącego z RAS z asfaltem dodanym podczas produkcji mieszanki w wytwórni. Podczas projektowania mieszanki z takim dodatkiem istotne jest ustalenie, jaka część lepiszcza z RAS łączy się z nowo dodanym asfaltem oraz jakie będą właściwości lepiszcza mieszanego. Zhou z zespołem [11] ustalili, że do poziomu 30% udziału lepiszcza z RAS właściwości asfaltu mieszanego można przyjmować jako liniową kombinację cech lepiszcza oryginalnego oraz pochodzącego z RAS. Amerykańskie wytyczne projektowe dla mieszanek z RAS (AASHTO-PP-78-14 [13]) podają, że współczynnik dostępności asfaltu zawartego w RAS wynosi 0,7-0,85, tj. tylko 70-85% asfaltu z RAS może być efektywnie wykorzystane jako lepiszcze w MMA.

Badania lepiszcza mieszanego prowadzone przez Williamsa z zespołem na Uniwersytecie w Iowa [14] pokazują, że dodatek RAS podwyższa zarówno górną jak i dolną temperaturę krytyczną asfaltu wg klasyfikacji amerykańskiej (PG). Badając asfalt mieszany z dodatkiem RAS, Wen z zespołem [15] stwierdzili poprawę odporności na koleinowanie, porównywalne właściwości zmęczeniowe oraz pogorszenie odporności na spękania niskotemperaturowe w stosunku do asfaltu drogowego. Wobec powyższego należało stworzyć kryteria bezpiecznego stosowania dodatku RAS ze względu na odporność MMA na spękania niskotemperaturowe. W tym celu Johnson z zespołem [16] zweryfikowali wymagania dotyczące minimalnego udziału nowego lepiszcza w MMA zawierających RAS. Wymagany udział nowego lepiszcza w lepiszczu mieszanym ustalili na poziomie 70%, ograniczając udział lepiszcza pochodzącego z RAS do maksymalnie 30%.

Alvergue [17] badał lepiszcza mieszane powstałe poprzez wymieszanie asfaltu z RAS z asfaltem drogowym (metoda na mokro) i stwierdził, że wzrost dodatku RAS powoduje zwiększenie liczby cykli do zniszczenia próbki w teście liniowego zwiększania amplitudy (LAS), co może świadczyć o poprawie

40% for rutting resistance, 60% for fatigue characteristics and 90% for low-temperature cracking. Research by Zhou et al. [10, 11] indicates that binder containing RAS displays greater stiffness than neat road bitumen; the increase in stiffness is greater for tear-off shingles (TOAS) than for manufacture waste shingles (MWAS). Foxlow, Daniel and Swamy [12] tested bitumen obtained from RAS and noted its greater stiffness at high service temperatures and greater resistance to low-temperature cracking, as compared to bitumen obtained from reclaimed pavement material (RAP).

Asphalt mixtures incorporating RAS contain a mixed binder created from bitumen coming from RAS and new bitumen added during mixture production. When designing such mixtures, it is necessary to evaluate the percentage of bitumen from RAS that will mix with the new bitumen; the final properties of the mixed binder should be determined. Zhou et al. [11] observed that the properties of the mixed binder may be adopted as a linear combination of the properties of two bitumens, as long as the share of RAS-obtained bitumen is up to 30%. The American guidelines regarding mixtures incorporating RAS (AASHTO-PP-78-14 [13]) state that the binder availability factor in RAS is 0.70-0.85, i.e. only 70-85% of bitumen contained in RAS may be effectively used as binder in an asphalt mixture.

Research on mixed binders performed by Williams et al. at the Iowa State University [14] indicates that addition of RAS increases both the low and high Performance Grade temperatures of bitumen. Comparing mixed binder incorporating RAS with neat road bitumen, Wen et al. [15] noted an improvement in rutting resistance, comparable fatigue properties and a decrease in resistance to low-temperature cracking. Therefore, it proved necessary to create adequate criteria for safe application of RAS addition due to low-temperature cracking resistance of the obtained mixture. To this end, Johnson et al. [16] verified the requirements concerning the minimum proportion of new bitumen in mixtures incorporating RAS. The required percentage of new bitumen in the obtained mixed binder was determined as 70%; therefore, content of bitumen originating from RAS was limited to a maximum of 30%.

Alvergue [17] researched binders obtained through mixing of bitumen from RAS with neat road bitumen ("wet mixing" method) and observed that an increase in RAS content results in an increase in the number of cycles to specimen failure in the linear amplitude sweep test (LAS), which might indicate an improvement in fatigue

właściwości zmęczeniowych. Równocześnie w badaniach cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCR) wraz ze zwiększeniem dodatku RAS uzyskano zmniejszenie parametru J_{nr} , co odpowiada poprawie odporności na koleinowanie mieszanki z większą zawartością RAS.

Z jednej strony badania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem RAS [10, 11, 18-24] wykazują możliwość poprawy cech mieszanki związanych z jej pracą w wysokich temperaturach użytkowych (podwyższona odporność na deformacje trwałe), z drugiej strony mieszanki te mogą być bardziej podatne na powstawanie spękań niskotemperaturowych, co wynika przede wszystkim z obecności w RAS bardzo twardego lepiszcza asfaltowego o temperaturze mięknięcia przekraczającej zazwyczaj 100°C [10, 11]. Szczególnie podatne na ten rodzaj uszkodzenia są lepiszcza zawarte w TOAS [11, 20, 25], co wynika z ich wysokiego utlenienia po kilkudziesięcioletnim okresie eksploatacji na dachu. Badania Johnsona z zespołem [16] pokazały, że mieszanki z dodatkiem TOAS cechują się większą wrażliwością na działanie wody od mieszanek z dodatkiem MWAS. W pracy Zhou z zespołem [11] na podstawie uzyskanych wyników zalecono stosowanie asfaltów miększych niż używane standardowo w danej warstwie nawierzchni i lokalizacji, jak również ograniczenie ilości dodatku RAS, zwłaszcza przy stosowaniu dodatku TOAS. Alvergue [17] nie stwierdził pogorszenia odporności na zmęczenie ani odporności na spękania niskotemperaturowe mieszanki z dodatkiem RAS dozowanym metodą na mokro. Foxlow z zespołem [12], badając mieszanekę z RAS, stwierdził pogorszenie jej odporności na zmęczenie oraz zbliżone do mieszanki referencyjnej właściwości niskotemperaturowe. Badając MMA z dodatkiem RAS, Kanaan [20] oprócz poprawy odporności na koleinowanie uzyskał poprawę właściwości zmęczeniowych, natomiast w zakresie spękań niskotemperaturowych różnice w wynikach poszczególnych serii mieszanek z RAS i mieszanki referencyjnej były nieistotne. Ozer i in. [22] badali mieszanki, w których lepiszcze pochodzące z RAS miało ponadstandardowy udział (43-64% całego lepiszcza) i stwierdzili, że badane mieszanki zachowują się gorzej w aspekcie spękań zmęczeniowych i spękań niskotemperaturowych niż mieszanki ze standardową zawartością lepiszcza z RAS (22% udziału w lepiszczu). Wen i in. [15] stwierdzili brak istotnych różnic we właściwościach zmęczeniowych oraz odporności na spękania niskotemperaturowe mieszanek z dodatkiem RAS i bez niego. Williams z zespołem [14] stwierdzili poprawę odporności mieszanek z RAS na koleinowanie w stosunku do mieszanki referencyjnej, jak również brak wpływu na zmęczenie i spękania niskotemperaturowe. Ponadto badania terenowe prowadzone w powyższej pracy potwierdziły lepsze zachowanie nawierzchni wykonanych z dodatkiem RAS bardziej rozdrobnionego

properties. At the same time, an increase in RAS content resulted in a decrease in the J_{nr} parameter in the multiple stress creep recovery test (MSCR), indicating an improvement in rutting resistance of the mixture.

While tests of asphalt mixtures incorporating RAS [10, 11, 18-24] suggest a possible improvement in mixture properties representing its performance at high service temperatures (increased resistance to permanent deformation), such mixtures may also be more prone to low-temperature cracking, primarily due to presence of very stiff bitumen in RAS, with softening point often exceeding 100°C [10, 11]. Binders found in TOAS are particularly susceptible to this type of distress [11, 20, 25], as they are highly oxidized after several decades of exposure on the roof. Research by Johnson et al. [16] indicated that mixtures incorporating TOAS are characterized by greater moisture susceptibility than mixtures incorporating MWAS. Based on the obtained results, Zhou et al. [11] recommended usage of softer bitumen than that typically used for the given location and pavement layer, in combination with a limit on the quantity of RAS, especially in the case of TOAS. Alvergue [17] did not observe deterioration of resistance to fatigue or low-temperature cracking in an asphalt mixture that contained RAS introduced using the “wet mixing” method. Foxlow et al. [12] tested a mixture incorporating RAS and noted a deterioration in its fatigue resistance; low-temperature properties were similar to those of the reference mixture. Kanaan [20] observed improvement of both fatigue properties and rutting resistance; in the case of low-temperature properties the differences in results for particular mixtures incorporating RAS and the reference mixture were insignificant. Ozer et al. [22] tested mixtures in which the proportion of bitumen originating from RAS was non-standard (43-64% of the total binder in the mixture); they reported that the tested mixtures displayed inferior performance in terms of fatigue cracking and low-temperature cracking, as compared to mixtures with typical content of RAS bitumen (22% of the total bitumen in the mixture). Wen et al. [15] noted lack of significant differences in fatigue properties and in resistance to low-temperature cracking between mixtures with and without RAS. Williams et al. [14] noted that addition of RAS improved rutting resistance of mixtures and had no influence on fatigue and low-temperature cracking. Moreover, field tests performed in their work confirmed better performance of pavements incorporating finer ground RAS. Zhou et al. [10] discussed the problem of optimum preparation of RAS, including its collection, sorting, grinding, sieving, storage and dosage. They also

przed zastosowaniem. W pracy Zhou i zespołu [10] został omówiony problem optymalnego przygotowania dodatku RAS, obejmujący zbieranie odpadów papy, sortowanie, rozdrabnianie, przesiewanie, przechowywanie i dozowanie. Autorzy ci zwrócili także uwagę na potrzebę oceny zachowania mieszanek z RAS w długim okresie eksploatacji, a jako narzędzie oceny zaproponowali zastosowanie analizy kosztów w cyklu życia nawierzchni (LCA). W kolejnej publikacji Zhou z poszerzonym zespołem [11] zaobserwowano, że zwiększenie zawartości asfaltu w MMA lub poprawa zagęszczenia warstwy może efektywnie poprawić odporność na pękanie mieszanek z RAS. Ponadto autorzy ocenili wykonane odcinki próbne nawierzchni, stwierdzając, że mieszanki z RAS mogą być stosowane z powodzeniem nawet w warstwie ścieralnej nowej nawierzchni, o ile pozwalają na to parametry podbudowy.

Wpływ dodatku RAS jest badany nie tylko dla typowych mieszanek o ciągłym uziarnieniu (typu beton asfaltowy), lecz również dla mieszanek SMA. W badaniach mieszanki SMA z dodatkiem RAS [19] uzyskano poprawę odporności na działanie wysokich temperatur, przy niejednoznacznych wynikach w zakresie odporności na zmęczenie oraz niskie temperatury. Ostatecznie autor zaleca stosowanie RAS do SMA tylko przy bardzo starannym procesie projektowania, produkcji i układania warstwy. Vavrik z zespołem [26] przedstawili badania mieszanki SMA z dodatkiem drobno zmielonego RAS (o wskaźniku zastąpienia lepiszcza równym 15%), w których uzyskali poprawę odporności na zmęczenie oraz na spękania niskotemperaturowe badanej mieszanki.

Podstawową technologią, w której wykorzystuje się dodatek RAS, jest produkcja MMA na gorąco, jednak wobec potrzeby spełnienia wymagań zrównoważonego rozwoju technologią obecnie wdrażaną jest produkcja mieszanek przy obniżonych temperaturach, tj. na ciepło (WMA). Technologia WMA przyczynia się do zmniejszenia zapotrzebowania na energię i redukcji emisji podczas wykonania warstw asfaltowych nawierzchni, przy jednoczesnym ograniczeniu starzenia technologicznego asfaltu i poprawie zagęszczenia MMA. W tym celu stosuje się zasadniczo 2 grupy rozwiązań: dodatki obniżające lepkość asfaltu w temperaturach technologicznych lub produkcję MMA w technologii asfaltu spienionego, która jest obecnie najpopularniejsza w Stanach Zjednoczonych. West z zespołem w swoim raporcie [24] ocenili, że mieszanki z RAS produkowane w technologii WMA mają właściwości nie gorsze od mieszanek produkowanych w technologii na gorąco. Stwierdzono, że mieszanki z RAS produkowane na ciepło (WMA) mają niższą sztywność i wykazują lepszą odporność na spękania niż porównywalne mieszanki na gorąco. Zwrócono także uwagę na możliwość zwiększenia aktywacji

stressed the need for evaluation of long-term performance of mixtures incorporating RAS and proposed usage of life cycle analysis (LCA) to that end. In another publication Zhou and his team [11] reported that an increase in bitumen content or improvement of layer compaction may effectively improve cracking resistance of mixtures incorporating RAS. They also assessed the constructed test sections and noted that mixtures with RAS may be successfully applied even in the wearing course of new pavement, as long as the parameters of the base course are adequate.

The influence of RAS content has been investigated not only for typical continuously graded mixtures (such as asphalt concrete), but also for stone mastic asphalt mixtures (SMA). Research work on SMA mixtures incorporating RAS [19] indicated improvement in resistance to high temperatures, with inconclusive results regarding resistance to fatigue and low temperatures – therefore, the author recommended usage of RAS in SMA only when a very detailed control over the design, production and placement was ensured. Vavrik et al. [26] presented research on SMA mixture with addition of finely ground RAS (with a binder replacement ratio of 15%) – the authors observed improvement in resistance to fatigue and low-temperature cracking.

While production of hot mix asphalt (HMA) is the basic technology in which RAS is used, current requirements regarding sustainable development encourage further development of mixture production technology using lower temperatures, i.e. warm mix asphalt (WMA). The WMA technology contributes to reduction in energy demand and emissions during placement of asphalt courses, with simultaneous reduction in technological aging and improvement of mixture compaction. Two basic groups of solutions are applied: additives that reduce viscosity at technological temperatures and production of mixtures using foamed bitumen technology. The latter solution is currently the most widespread in the United States. West et al. noted in their report [24] that WMA mixtures with RAS are not inferior to HMA mixtures with RAS in terms of their parameters. It was observed that WMA mixtures incorporating RAS have lower stiffness and higher resistance to cracking than comparable HMA mixtures. It was also noted that higher temperatures and longer mixing time contribute to greater activation of bitumen present in RAS material. Stroup-Gardiner states in the NCRHP report [3] that usage of RAS material ground into fragments of maximum size of 3/8 inch result in more uniform distribution of the additive in the asphalt mixture.

lepiszczą z RAS poprzez podniesienie jego temperatury i wydłużenie czasu mieszania. Stroup-Gardiner w raporcie NCRHP [3] stwierdza, że stosowanie RAS rozdrobnionego na kawałki o maksymalnym wymiarze 3/8 cala prowadzi do bardziej jednorodnego rozprowadzenia tego dodatku w mieszance mineralno-asfaltowej.

3. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

3.1. ŚCINKI PAPY (RAS)

Do badania wykorzystano ścinki pochodzące z produkcji bitumicznych gontów papowych na osnowie z welonu szklanego z posypką z piasku kwarcowego. Widok badanego materiału przedstawia Rys. 1.

Badanie rozpoczęto od poddania ścinków z bitumicznych gontów papowych procesowi ekstrakcji w ekstraktorze ultradźwiękowym, zgodnie z normą PN-EN12697-1. W wyniku działania impulsów ultradźwiękowych oraz rozpuszczalnika oddzielono asfalt od osnowy szklanej i posypki mineralnej. Pierwszym etapem badań było określenie składu gontów papowych. Badanie ekstrakcji wykazało, że zawartość asfaltu w ścinkach papy była na poziomie ok. 29%. Przesiew pozostałości po ekstrakcji papy opisano w Tabl. 1.

Table 1. Composition of the asphalt shingle offcuts
Tablica 1. Skład rozdrobnionych gontów papowych

Sieve size [mm] Rozmiar sita	Grading curve (passing [%]) Krzywa uziarnienia (przesiew [%])	
	Sample / Próbką I	Sample / Próbką II
4.0	100	100
2.0	99.9	100
1.0	77.2	71.9
0.5	56.3	50.1
0.25	50.4	46.8
0.125	45.8	41.7
0.063	37.2	36.6
Binder content in RAS [%] Zawartość lepiszcza w RAS	29.2	29.3

3.2. MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE (MMA)

W ramach badań zaprojektowano referencyjną receptę laboratoryjną dla betonu asfaltowego do warstwy wiążącej AC 16 W 50/70. Następnie skorygowano tę receptę poprzez zastąpienie części lepiszcza i drobnych frakcji mineralnych (frakcja 0/4 mm) dodatkiem ścinków z produkcji bitumicznych gontów papowych, tak aby uzyskać maksymalne dopasowanie składu przedmiotowych mieszanek. Zawartość dodatku RAS

3. MATERIALS AND TEST METHODS

3.1. SHINGLE OFFCUTS (RAS)

Tests were performed using offcuts from manufacturing of asphalt roof shingles with glass fiber reinforcement and quartz sand coating. The tested material is presented in Fig. 1.



Fig. 1. Offcuts of asphalt shingles (RAS) used in the tests
Rys. 1. Ścinki bitumicznych gontów papowych (RAS) przeznaczone do badania

At the beginning of the test procedure, RAS offcuts were subjected to binder extraction in an ultrasonic extractor according to the PN-EN12697-1 standard. Bitumen was separated from the glass fiber reinforcement and mineral coating by solvent and ultrasonic impulses. First stage of the tests consisted in determination of the composition of RAS. Extraction indicated that bitumen content in the RAS offcuts was at the level of approx. 29%. The results of sieve analysis of the material remaining after binder extraction are presented in Table 1.

3.2. ASPHALT MIXTURES

The tests encompassed design of the reference asphalt concrete mixture for binder courses AC 16 W 50/70. For the asphalt concrete incorporating RAS, the design was adjusted to allow for partial replacement of bitumen and fine mineral fractions (fraction 0/4 mm) due to presence of RAS offcuts, so that the resulting composition would be as similar to the reference mixture as possible. While RAS content in the mixture equaled 4%, new 50/70 bitumen was used in quantity that ensured the same total binder content in the obtained mixtures. Mixture with 1% of RAS was additionally tested – the mixture was produced and

wynosiła 4%, przy równoczesnym zastosowaniu asfaltu 50/70 w ilości pozwalającej uzyskać taką samą całkowitą zawartość lepiszcza w badanych mieszankach. Dodatkowo wykonano badania mieszanki z dodatkiem 1% RAS, dostarczonej z wytwórni RBDiM Krosno. Skład badanych MMA przedstawiono w Tabl. 2, natomiast krzywe uziarnienia mieszanek mineralnych w Tabl. 3.

Table 2. Composition of the tested mixtures
Tablica 2. Skład badanych MMA

No. Lp.	Component Składniki	Content in the asphalt mixture [%] Udział w MMA		
		REF	4% RAS	1% RAS
1	limestone filler mączka wapienna	4.3	3.8	4.1
2	sand 0/2 piasek 0/2	9.6	9.5	9.4
3	dolomite 0/4 dolomit 0/4	27.7	25.9	27.4
4	dolomite 4/8 dolomit 4/8	17.2	16.7	17.2
5	dolomite 8/16 dolomit 8/16	36.8	36.7	36.9
6	RAS	–	4.0	1.0
7	bitumen 50/70 asfalt 50/70	4.4	3.3	4.1
8	Teramin 14	0.2 A ^{*)}	0.2 A ^{*)}	0.2 A ^{*)}

^{*)} quantity of adhesion promoter given relative to the mass of bitumen
ilość dodatku adhezyjnego podano w odniesieniu do masy lepiszcza

3.3. METODY BADAŃ

Z podanych w Tabl. 2 i 3 składników przygotowano w laboratorium zaroby dwóch mieszanek zgodnie z wymaganiami WT-2 2014 [27]. Dodatkowy zarób mieszanki z 1% RAS dostarczony został z wytwórni. Dla przedmiotowych mieszanek przygotowano następujące próbki:

- mieszanki luźnej do badania gęstości w piknometrze wg PN-EN 12697-5,
- cylindryczne o średnicy 101,6 mm i wysokości około 63,5 mm, zagęszczane w ubijaku Marshalla przy energii 2×75 uderzeń wg PN-EN 12697-30,
- próbki belkowe o wymiarach $50 \times 63 \times 400$ mm, wycięte piłą dwutarczową z płyt wykonanych w urządzeniu wałującym wg PN-EN 12697-33.

Program badań MMA podsumowano w Tabl. 4. Oprócz cech fizycznych, modułu sztywności i wytrzymałości na rozciąganie pośrednie obejmował on też odporność na zmęczenie. Sztywność mieszanki oraz wykonanej z niej warstwy nie jest właściwością przesądzającą o trwałości konstrukcji, ponieważ

supplied by the RBDiM Krosno plant. Compositions of the tested mixtures are given in Table 2. Grading curves of the aggregate used in the mixtures are presented in Table 3.

Table 3. Grading of aggregate in the mixtures
Tablica 3. Uziarnienie mieszanek mineralnych

Sieve size [mm] Wymiar sita	Passing [%] Przesiew			Limiting curves Krzywe graniczne	
	REF	4% RAS	1% RAS	lower dolna	upper górną
22	100	100	100	100	100
16	99	99	100	90	100
11.2	80	81	79	70	90
8.0	63	63	62	55	85
5.6	51	52	50	-	-
4.0	43	44	43	-	-
2.0	32	33	31	25	50
0.5	15	15	14	-	-
0.125	8	8	7	4	12
0.063	7.0	7.3	6.2	4	10

3.3. TEST METHODS

Using the components listed in Tables 2 and 3, two mixtures were prepared in the laboratory in accordance with the Polish technical requirements WT-2 2014 [27]. The additional mixture (1% RAS) was delivered by the producer. The following samples were prepared using the aforementioned mixtures:

- loose mixture samples for determination of the maximum density in pycnometer, according to PN-EN 12697-5,
- cylindrical specimens with diameter of 101.6 mm and height of approx. 63.5 mm, compacted in a Marshall compactor at 2×75 blows, according to PN-EN 12697-30,
- prismatic specimens with dimensions of $50 \times 63 \times 400$ mm, cut out from roller-compacted plates with a dual blade circular saw, according to PN-EN 12697-33.

The testing program is summarized in Table 4. Apart from physical properties, stiffness modulus and indirect tensile strength, the tests also encompassed fatigue resistance. Stiffness of the mixture and the constructed pavement layer does not determine its actual life, as fatigue characteristics are of crucial importance as well [28]. Fatigue testing device is shown in Fig. 2. For properties that were tested at least 5 times in a series, statistical analysis was performed in Statgraphics Plus v. 5.1 software, according

bardzo istotną rolę odgrywa jej charakterystyka zmęczeniowa [28]. Na Rys. 2. przedstawiono widok stanowiska do badania właściwości zmęczeniowych. Dla cech, przy których badaniu uzyskano minimum 5 powtórzeń w seriach, przeprowadzono analizy statystyczne w programie Statgraphics Plus v. 5.1 zgodnie z procedurami podanymi w pracy Dobosza [29]. Celem analiz była weryfikacja hipotezy dotyczącej istotności różnic pomiędzy mieszankami z RAS a mieszanką referencyjną. W celu określenia, które mieszanki różnią się istotnie od innych, wykorzystano analizę porównań wielokrotnych z zastosowaniem najmniejszych kwadratów różnic (LSD). W przypadku badań zmęczeniowych liczba próbek została zmniejszona z 18 sztuk (podanych w normie PN-EN 12697-24 wg metody pełnej) do 6-9 sztuk. Ograniczenie to wynikało z dużej czasochłonności badań zmęczeniowych, niemniej w ocenie autora uzyskane wyniki pozwalają na porównanie właściwości badanych mieszanek. W przyszłości badania zmęczeniowe zostaną poszerzone celem uzyskania większej liczby próbek.

to the procedures presented by Dobosz [29]. The aim of the analysis was to verify the hypothesis regarding significance of differences between mixtures incorporating RAS and the reference mixture. Determination of statistical significance of the differences between mixtures was based on multiple comparison analysis using least square difference (LSD). In the case of fatigue testing, the number of specimens was reduced from 18 (given in the PN-EN 12697-24 standard according to the full method) to 6-9 pieces. The reduction was introduced due to very long duration of fatigue tests; however, the author is convinced that the obtained results enable comparison of mixture properties. Future fatigue tests will be extended to include greater number of specimens.

Table 4. The asphalt mixture testing program, including the number of specimens
Tablica 4. Program badań MMA wraz z liczebnością próbek

No. Lp.	Tested property Badana cecha	PN-EN standard Norma PN-EN	REF	4% RAS	1% RAS
1	Maximum density / Gęstość	12697-5	3	3	3
2	Bulk density of cylindrical (prismatic) specimens Gęstość objętościowa próbek cylindrycznych (belkowych)	12697-6	6 (9)	6 (6)	6 (6)
3	Air voids in cylindrical (prismatic) specimens Wolne przestrzenie w próbkach cylindrycznych (belkowych)	12697-8	6 (9)	6 (6)	6 (6)
4	Stiffness modulus <i>ITCY</i> at three temperatures: 5°C, 15°C and 30°C Moduł sztywności <i>ITCY</i> w trzech temperaturach: 5°C, 15°C i 30°C	12697-26	6	5	6
5	Indirect tensile strength <i>ITS</i> at 25°C (40°C) / Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie <i>ITS</i> w temp. 25°C (40°C)	12697-23	4 (2)	4 (2)	4 (-)
6	Fatigue at 10°C and 10 Hz, three strain levels (4PB-PR) / Zmęczenie w 10°C i 10 Hz, trzy poziomy odkształcenia (4PB-PR)	12697-24	9	6	6

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. CECHY FIZYCZNE

Przed wykonaniem badań cech mechanicznych sprawdzono cechy fizyczne próbek MMA, tj. zbadano gęstość oraz gęstość objętościową, a następnie obliczono zawartość wolnych przestrzeni w MMA. Wyniki badań cech fizycznych MMA podano w Tabl. 5, natomiast analizy istotności ich różnic w Tabl. 6.

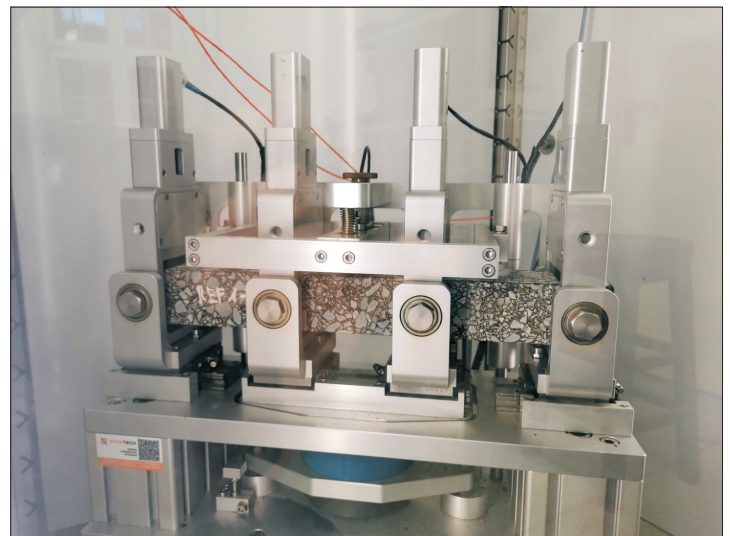


Fig. 2. View of the 4PB-PR fatigue testing device
Rys. 2. Widok stanowiska do badania zmęczenia MMA metodą 4PB-PR

Table 5. Results of air void content in asphalt mixture samples [%]
 Tablica 5. Wyniki badań zawartości wolnych przestrzeni w próbkach MMA [%]

Mixture type Typ MMA	Number of specimens Liczebność	Mean value Średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe	Coefficient of variation Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Range Rozstęp
Cylindrical specimens, compacted with 2 × 75 blows Próbki cylindryczne zagęszczone 2 × 75 uderzeń							
REF	6	4.0	0.08	2.0	3.9	4.1	0.2
4% RAS	6	3.7	0.29	7.8	3.4	4.2	0.8
1% RAS	6	3.9	0.25	6.4	3.7	4.4	0.7
Prismatic specimens compacted in a roller device Próbki belkowe zagęszczone w urządzeniu waluującym							
REF	9	3.3	0.49	14.8	2.6	4.1	1.5
4% RAS	6	3.2	0.27	8.4	2.9	3.6	0.7
1% RAS	6	3.6	0.22	6.1	3.2	3.8	0.6

Table 6. Significance of differences between air void content in specimens
 Tablica 6. Wyniki wyznaczania istotności różnic dla zawartości wolnych przestrzeni w próbkach

Comparison Porównanie	Cylindrical specimens / Próbki cylindryczne		Prismatic specimens / Próbki belkowe	
	Difference / Różnica	Limit / Granica	Difference / Różnica	Limit / Granica
REF vs. 4% RAS	0.3 ^{*)}	±0.28	0.1	±0.40
REF vs. 1% RAS	0.1	±0.28	-0.3	±0.40
4% RAS vs. 1% RAS	-0.2	±0.28	-0.4	±0.44

^{*)} the observed difference is statistically significant / stwierdzono statystycznie istotną różnicę

4.2. MODUŁ SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ (IT-CY)

Badania wykonano na cylindrycznych próbkach Marshalla zagęszczonych 2 × 75 uderzeń, metodą rozciągania pośredniego w trzech temperaturach: 5°C, 15°C i 30°C. Na każdej próbce wykonano badania na dwóch prostopadłych do siebie średnicach z wykorzystaniem pięciu pulsów obciążenia. Na potrzeby oceny wrażliwości termicznej badanych MMA wyznaczono stosunek sztywności uzyskanej w najniższej badanej temperaturze (5°C) do wyniku w najwyższej badanej temperaturze (30°C). Wyniki te podano w Tabl. 7, natomiast analizę testów istotności ich różnic zamieszczono w Tabl. 8.

Table 7. Stiffness modulus results /TCY [MPa]
 Tablica 7. Wyniki wyznaczania modułu sztywności /TCY [MPa]

Mixture type Typ MMA	Number of specimens Liczebność	Mean value Średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe	Coefficient of variation [%] Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Range Rozstęp
Test temperature / Temperatura badania: 5°C							
REF	6	14 745	667	4.5	13 615	15 632	2 017
4% RAS	5	15 704	330	2.1	15 294	16 095	801
1% RAS	6	14 694	751	5.1	14 222	16 164	1 942

4. TEST RESULTS

4.1. PHYSICAL PROPERTIES

Prior to testing of mechanical properties of the mixtures, their physical properties were determined – air void content was calculated based on the measured maximum density and bulk density. The obtained results are given in Table 5. Analysis of significance of their differences is presented in Table 6.

4.2. ELASTIC STIFFNESS MODULUS (IT-CY)

Indirect tension tests were conducted on cylindrical Marshall specimens (compacted with 2 × 75 blows) at three temperatures: 5°C, 15°C and 30°C. Every specimen was subjected to two tests (along two perpendicular diameters), consisting of five loading pulses each. In order to assess temperature sensitivity of the mixtures, the ratio of stiffness at the lowest temperature (5°C) vs. stiffness at the highest tested temperature (30°C) was calculated. The results are shown in Table 7. The analysis of significance of their differences is shown in Table 8.

Table 7 (continued). Stiffness modulus results *ITCY* [MPa]Tablica 7 (ciąg dalszy). Wyniki wyznaczania modułu sztywności *ITCY* [MPa]

Mixture type Typ MMA	Number of specimens Liczebność	Mean value Średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe	Coefficient of variation [%] Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Range Rozstęp
Test temperature / Temperatura badania: 15°C							
REF	6	8 229	272	3.3	7 948	8 683	735
4% RAS	5	9 247	181	2.0	9 138	9 566	428
1% RAS	6	8 068	861	10.7	7 116	9 511	2 395
Test temperature / Temperatura badania: 30°C							
REF	6	2 026	108	5.3	1 872	2 162	290
4% RAS	5	2 900	92	3.2	2 754	2 990	236
1% RAS	6	2 260	270	11.9	1 955	2 694	739
Calculated thermal sensitivity index / Wyniki wskaźnika wrażliwości termicznej E_5/E_{30} [-]							
REF – 7.28							
4% RAS – 5.42							
1% RAS – 6.50							

Table 8. Significance of differences between the results of stiffness modulus

Tablica 8. Wyniki wyznaczania istotności różnic dla modułu sztywności

Comparison Porównanie	5°C		15°C		30°C	
	Difference / Różnica	Limit / Granica	Difference / Różnica	Limit / Granica	Difference / Różnica	Limit / Granica
REF vs. 4% RAS	-959 ^{*)}	±813	-1018 ^{*)}	±712	-874 ^{*)}	±235
REF vs. 1% RAS	51	±775	161	±679	-234*	±224
4% RAS vs. 1% RAS	1 010 ^{*)}	±813	1 179 ^{*)}	±712	640*	±235

^{*)} the observed difference is statistically significant / stwierdzono statystycznie istotną różnicę

4.3. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE POŚREDNIE (ITS)

Badania wykonano metodą rozciągania pośredniego w dwóch temperaturach (25°C i 40°C) na próbkach cylindrycznych zagęszczonych w ubijaku Marshalla 2 × 75 uderzeń. Na potrzeby oceny wrażliwości termicznej badanych MMA wyznaczono stosunek *ITS* uzyskanej w najniższej badanej temperaturze (25°C) do wyniku w najwyższej badanej temperaturze (40°C). Wyniki przedmiotowych badań podano w Tabl. 9.

4.3. INDIRECT TENSILE STRENGTH (ITS)

The tests were performed at two temperatures (25°C and 40°C) by applying indirect tension to cylindrical specimens compacted in a Marshall compactor with 2 × 75 blows. In order to assess temperature sensitivity of the mixtures, the ratio of *ITS* at lower temperature (25°C) to *ITS* at higher temperature (40°C) was calculated. The results are given in Table 9.

Table 9. Indirect tensile strength *ITS* results [kPa]Tablica 9. Wyniki wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie *ITS* [kPa]

Mixture type Typ MMA	Number of specimens Liczebność	Mean value Średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe	Coefficient of variation Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Range Rozstęp
Specimens compacted with 2 × 75 blows, +25°C / Próbkę zagęszczoną 2 × 75 uderzeń, +25°C							
REF	4	898	34	3.8 %	850	926	76
4% RAS	4	1251	58	4.6 %	1 195	1 331	136
1% RAS	4	1004	66	6.6%	938	1 095	157
Specimens compacted with 2 × 75 blows, +40°C / Próbkę zagęszczoną 2 × 75 uderzeń, +40°C							
REF	2	360	–	–	343	385	42
4% RAS	2	619	–	–	589	650	61
Calculated thermal sensitivity index / Wyniki wskaźnika wrażliwości termicznej ITS_{25}/ITS_{40}							
REF - 2.49							
4% RAS - 2.02							

4.5. ODPORNOŚĆ NA ZMĘCZENIE

Badania wykonano metodą belek czteropunktowo zginanych (4PB-PR) wg PN-EN 12697-24, w temperaturze 10°C i przy częstotliwości 10 Hz. Zastosowano sterowanie badaniem zmęczeniowym wg stałego poziomu odkształcenia, przyjmując trzy poziomy odkształcenia: 120 $\mu\text{m/m}$, 160 $\mu\text{m/m}$ oraz 200 $\mu\text{m/m}$. Wynikiem badania jest liczba cykli obciążeń do wystąpienia zmęczenia N (trwałość zmęczeniowa), rozumianego jako spadek początkowego modułu sztywności próbki o 50%. Na podstawie otrzymanych wyników badań wyznaczono charakterystykę zmęczeniową, tj. trwałość zmęczeniową N w funkcji odkształcenia ε . Zależność ta opisana jest równaniem:

$$N = A \cdot \varepsilon^b, \quad (1)$$

gdzie wartości A i b są współczynnikami określonymi w regresji liniowej.

Wyniki w formie zależności trwałości zmęczeniowej od przyjętego poziomu odkształcenia (tzw. wykres Wöhlera) wraz z dopasowaną krzywą zmęczeniową przedstawiono na Rys. 3. W Tabl. 10 przedstawiono parametry zmęczeniowe uzyskane z regresji liniowej, współczynniki determinacji R^2 oraz wartości odkształcenia odpowiadającego trwałości 1 miliona cykli obciążeń ε_6 wyznaczone z dopasowanych krzywych.

4.5. FATIGUE RESISTANCE

Tests were performed on prismatic specimens in the scheme of four-point bending (4PB-PR), according to PN-EN 12697-24, at the temperature of 10°C and frequency of 10 Hz. Strain-controlled test mode was adopted, with three strain levels: 120 $\mu\text{m/m}$, 160 $\mu\text{m/m}$ and 200 $\mu\text{m/m}$. The result of the test (fatigue life) is the number of load cycles to fatigue failure, defined as the point at which the stiffness modulus decreases to 50% of its initial value. Fatigue characteristics, i.e. fatigue life N as a function of strain ε , were determined based on the obtained results. The relationship is expressed by:

$$N = A \cdot \varepsilon^b, \quad (1)$$

where A and b are regression coefficients.

Results in the form of relationship between fatigue life and the adopted strain level (referred to as Wöhler curve) with a fitted fatigue curve are presented in Fig. 3. Fatigue parameters obtained from regression, coefficients of determination R^2 and strain values corresponding to fatigue life of 1 million load cycles ε_6 determined from the plot are shown in Table 10.

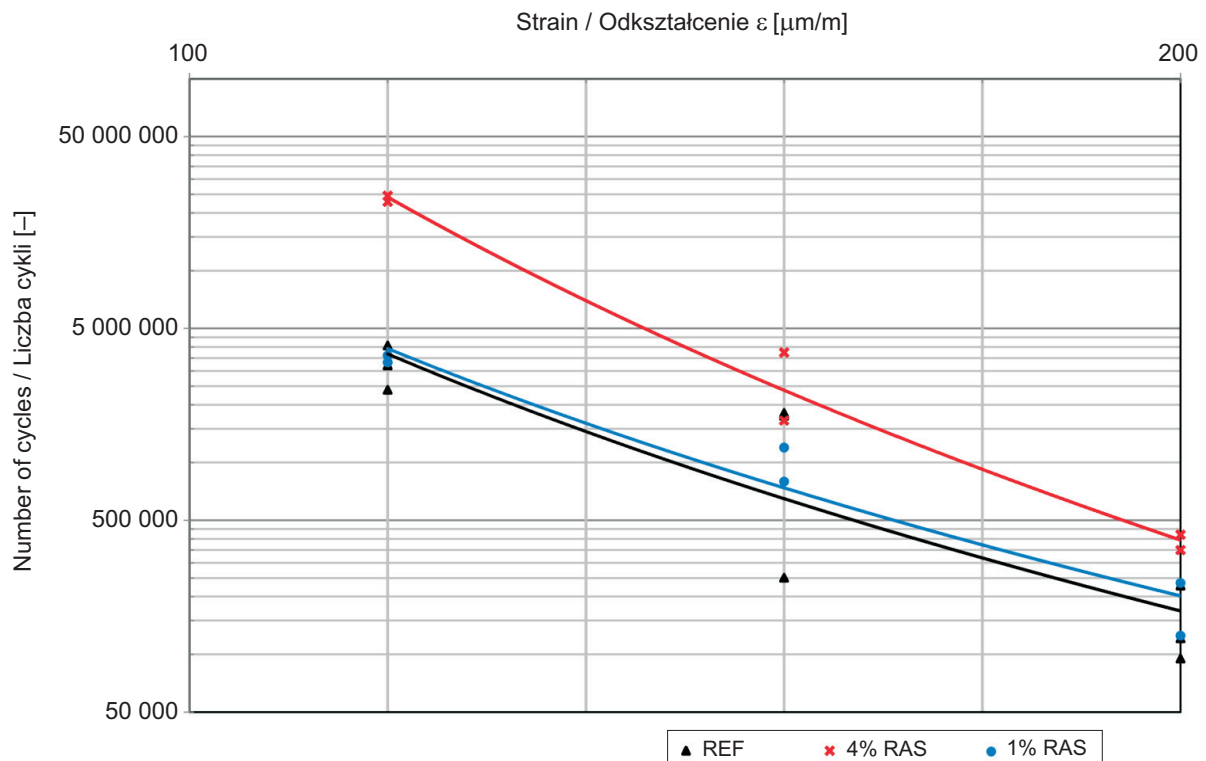


Fig. 3. Results of the fatigue tests of asphalt mixtures
Rys. 3. Wyniki badań zmęczeniowych MMA

4.7. DYSKUSJA WYNIKÓW

W próbkach badanych mieszanek stwierdzono zawartość wolnych przestrzeni na tym samym poziomie, badane różnice są statystycznie nieistotne (Tabl. 5 i 6). Powyższy fakt umożliwia porównanie cech eksploatacyjnych mieszanek bez obaw o ewentualny wpływ cech fizycznych próbek na uzyskane wyniki badań.

W przypadku modułu sztywności sprężystej testy statystyczne wykazały, że mieszanka z dodatkiem 4% RAS jest sztywniejsza od mieszanki referencyjnej, zwłaszcza w przypadku temperatur 15°C i 30°C (Tabl. 7 i 8). Takie wyniki są zgodne z oczekiwaniami, ponieważ asfalt zawarty w RAS jest twardszy i sztywniejszy od asfaltów drogowych. W przypadku badania w 5°C sztywność mieszanki z 4% RAS rośnie w stosunku do sztywności mieszanki referencyjnej w mniejszym stopniu. Powyższa zależność znajduje potwierdzenie w mniejszej wrażliwości termicznej mieszanek z RAS, co jest efektem pozytywnym, obserwowanym np. w mieszankach z asfaltem modyfikowanym polimerami. W przypadku wykonanej w wytwórni mieszanki z dodatkiem 1% RAS uzyskana sztywność jest zbliżona do sztywności mieszanki referencyjnej, jedynie w temperaturze 30°C otrzymano istotnie wyższą sztywność.

Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (Tabl. 9) rośnie wraz z udziałem dodatku RAS, przy czym większy wzrost zanotowano dla wyższej temperatury badania (40°C). Zgodnie z publikacjami badaczy amerykańskich [30, 31] wyniki *ITS* w podwyższonej temperaturze dobrze odzwierciedlają odporność MMA na deformacje trwałe, co potwierdzono we wcześniejszych publikacjach autora [32, 33].

Badania zmęczeniowe wykonane metodą stałego poziomu odkształcenia (Rys. 3 i Tabl. 10) wykazały dla mieszanki z 4% RAS poprawę trwałości zmęczeniowej w stosunku do mieszanki referencyjnej (ϵ_6 wzrosło z poziomu 150 $\mu\text{m/m}$ do poziomu 177 $\mu\text{m/m}$). Dla mieszanki z dodatkiem 1% RAS (wyprodukowanej w wytwórni) uzyskane właściwości zmęczeniowe są zbliżone do tych otrzymanych dla mieszanki referencyjnej ($\epsilon_6 = 152 \mu\text{m/m}$).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zastosowanie do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych materiałów z recyklingu – takich jak odpadowe papy bitumiczne (RAS) – jest tematem wymagającym rozwoju w zakresie przetwarzania tych materiałów, metod badań i projektowania mieszanek, warunków ich wbudowania oraz oceny zachowania w długim okresie eksploatacji. Wyniki przedstawionych badań wykazują potencjał odpadowych pap bitumicznych jako dodatku do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych. Zarówno bieżące, jak i poprzednie badania [7]

Table 10. Fatigue parameters of the tested asphalt mixtures
Tablica 10. Parametry zmęczeniowe mieszanek mineralno-asfaltowych

Asphalt mixture Mieszanka mineralno-asfaltowa	Parameters / Parametry			
	<i>A</i>	<i>b</i>	R^2	ϵ_6
REF	1.3E+19	-6.0	0.80	150
4% RAS	1.4E+24	-8.1	0.98	177
1% RAS	4.8E+18	-5.8	0.94	152

4.7. DISCUSSION OF THE RESULTS

It was determined that air void content in the tested mixtures was at the same level; the analyzed differences proved statistically insignificant (Tables 5 and 6). Due to this fact, it is possible to perform comparisons of performance parameters of the mixtures without concern that they may be affected by differences in their physical properties.

In the case of elastic stiffness modulus, statistical tests indicated that the mixture with 4% of RAS is stiffer than the reference mixture, especially at the temperatures of 15°C and 30°C (Tables 7 and 8). Such results are in agreement with expectations, since bitumen coming from RAS is harder and stiffer than new road bitumens. In the case of tests performed at 5°C, relative difference between stiffness of the mixture with 4% of RAS and the reference mixture is less pronounced. This relationship is confirmed by lower thermal sensitivity of mixtures incorporating RAS, which is a positive effect, observed also in mixtures based on polymer-modified binders. For the plant-produced mixture with 1% of RAS, the obtained stiffness was similar to that of the reference mixture – stiffness proved significantly greater only at 30°C.

Indirect tensile strength (Table 9) increases with an increase in RAS content, with greater growth observed at the higher test temperature (40°C). According to the investigations of American researchers [30, 31], values of *ITS* at high temperatures are a good indicator of resistance to permanent deformations. This was also confirmed in previous research by the author [32, 33].

Fatigue testing in strain-controlled mode (Fig. 3 and Table 10) indicated an improvement in fatigue life of the mixture with 4% of RAS, as compared to the reference mixture (ϵ_6 increased from the level of 150 $\mu\text{m/m}$ to 177 $\mu\text{m/m}$). For the mixture with 1% of RAS (produced in the plant) the obtained fatigue characteristics were similar to those obtained for the reference mixture ($\epsilon_6 = 152 \mu\text{m/m}$).

betonu asfaltowego do warstwy wiążącej (AC 16 W 50/70) z dodatkiem RAS wynoszącym 4% pokazują, że mieszanka spełnia wszystkie wymagania wyszczególnione w WT-2 [24]. Mieszanka wykazała poprawę zachowania zarówno w podwyższonych temperaturach eksploatacyjnych (sztywność i odporność na rozciąganie pośrednie), jak i w średnich temperaturach eksploatacyjnych (zmęczenie). Wyniki wcześniejszych badań przeprowadzonych metodą TSRST [6, 7] wskazują również na brak efektu pogorszenia odporności mieszanki na spękania niskotemperaturowe wskutek dodania ścinków bitumicznych gontów papowych.

Szczegółowe wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- mieszanki z dodatkiem RAS nie zmieniają istotnie cech fizycznych (zawartości wolnych przestrzeni w MMA),
- wraz ze wzrostem zawartości RAS następuje wzrost modułu sztywności i wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanki, zwłaszcza w zakresie wyższych temperatur eksploatacyjnych, co przyczynia się do poprawy odporności na koleinowanie mieszanki mineralno-asfaltowej, jak wskazano w poprzednich pracach [6, 7],
- wyniki odporności na zmęczenie mieszanek z RAS są pozytywne i wskazują na poprawę tej właściwości,
- badania powinny być kontynuowane także dla innych typów mieszanek, z uwzględnieniem innego udziału i pochodzenia zastosowanych odpadowych pap bitumicznych,
- w przyszłości badania mieszanek z RAS powinny zostać poszerzone o testy odporności na pękanie (np. SCB), także dla różnych warunków starzenia MMA.

INFORMACJE DODATKOWE

Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule powstały w ramach grantu dziekańskiego Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej pt.: „Problemy trwałości nawierzchniowych MMA z dodatkiem materiałów z recyklingu zawierających asfalt”.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Pouranian M.R., Shishehbor M.*: Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. *Environments*, 6, 6, 2019, 73, DOI: 10.3390/environments6060073
- [2] *Paulsen G., Stroup-Gardiner M., Epps J.*: Roofing waste in asphalt paving mixtures – economic consideration, Report No. 6-331-709-1. Center for Construction Materials Research, University of Nevada, Reno, 1986
- [3] *Stroup-Gardiner M.*: Use of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Mixtures, NCHRP Synthesis 495. Transportation Research Board, Washington, 2016, DOI: 10.17226/23641

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Production of asphalt mixtures incorporating recycled materials – such as reclaimed asphalt shingles (RAS) – is an area that requires further development in terms of material processing, mixture testing and design, construction conditions and long-term performance assessment. Results of the presented tests confirm the potential of asphalt shingles as an additive to asphalt mixtures. Both the current and previous research works [7] on asphalt concrete for binder courses (AC 16 W 50/70) with 4% of RAS demonstrated that the mixture meets all the requirements established in the Polish document WT-2 [24]. The mixture displayed improvement of performance at high service temperatures (stiffness and indirect tensile strength) and medium service temperatures (fatigue). The results of previous research based on TSRST method [6, 7] indicated no deterioration in resistance to low-temperature cracking due to addition of asphalt shingle offcuts to the mixture.

Based on the detailed test results, the following conclusions may be formulated:

- physical properties (air void content) of mixtures do not change significantly due to addition of RAS,
- as the content of RAS increases, stiffness modulus and indirect tensile strength increase as well, especially at higher service temperatures, thus contributing to improvement of rutting resistance of the asphalt mixture – as reported in previous works [6, 7],
- the obtained fatigue characteristics of mixtures incorporating RAS are positive and indicate improvement in fatigue resistance,
- research should be continued to encompass different mixture types, incorporating various RAS content originating from different sources,
- future testing of mixtures with RAS should be broadened by including fracture resistance tests (e.g. SCB) and varied mixture aging conditions.

ACKNOWLEDGEMENT

Tests presented in this article were performed under the grant from the dean of Faculty of Civil Engineering at the Cracow University of Technology: “Problems of service life of pavement asphalt mixtures with recycled materials containing bitumen”.

- [4] *Hansen K.R., Copeland A.*: Asphalt Pavement industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2015. National Asphalt Pavement Association, Lanham, 2017

- [5] *Zieliński P.*: Badanie mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem odpadów z produkcji bitumicznych gontów papowych (RAS). Zadanie w ramach działalności statutowej pt.: „Trwałe i przyjazne środowisku nawierzchnie drogowe”, nr: L2/282/2016/DS, Politechnika Krakowska, 2016
- [6] *Zieliński P., Mach A., Kostecka K.*: Testing of the influence of manufacture waste asphalt shingles on the properties of hot mix asphalt. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*, **17**, 41, 2017, 245-252, DOI: 10.5593/sgem2017/41/S18.032
- [7] *Zieliński P.*: Study of the possibility of increasing manufacture waste asphalt shingles additive to hot mix asphalt. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*, **18**, 4.2, 2018, 191-198, DOI: 10.5593/sgem2018/4.2/S18.025
- [8] *Zieliński P.*: Effect of reclaimed asphalt shingles addition on asphalt concrete dynamic modulus master curves. *Archives of Civil Engineering*, **67**, 3, 2021, 109-122, DOI: 10.24425/ace.2021.138046
- [9] *Kennedy T.W., Huber G.A., Harrigan E.T., Cominsky R.J., Hughes C.S., Von Quintus H., Moulthrop J.S.*: Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. National Research Council, Washington, 1994
- [10] *Zhou F., Button J.W., Epps J.*: Best practice for using RAP in HMA, Report No. FHWA/TX-12/0-6614-1. Texas Transportation Institute, College Station, 2012
- [11] *Zhou F., Li H., Hu S., Button J.W., Epps J.A.*: Characterization and best use of recycled asphalt shingles in hot-mix asphalt, Report No. FHWA/TX-13/0-6614-2. Texas A&M Transportation Institute, College Station, 2013
- [12] *Foxlow J.J., Daniel J.S., Swamy A.K.*: RAP or RAS? The differences in performance of HMA containing reclaimed asphalt pavement and reclaimed asphalt shingles. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **80**, 2011, 347-376
- [13] AASHTO PP 78-14 Standard Practice for Design Considerations When Using Reclaimed Asphalt Shingles (RAS) in Asphalt Mixtures, 2016
- [14] *Williams R.C., Cascione A., Yu J., Haugen D., Marasteanu M., McGraw J.*: Performance of recycled asphalt shingles in hot mix asphalt. Institute for Transportation, Iowa State University, Ames, 2013
- [15] *Wen H., Wu S., Zhang K., DeVol J., Kelsey K.*: Performance evaluation of hot mix asphalt containing recycled asphalt shingles in Washington State. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington, 2014
- [16] *Johnson E., Johnson G., Dai S., Linell D., McGraw J., Watson M.*: Incorporation of Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mixed Asphalt Pavement Mixtures, Report No. MN/RC 2010-08. Minnesota Department of Transportation, St. Paul, 2010
- [17] *Alvergue A.*: Laboratory evaluation of asphalt mixtures and binders with reclaimed asphalt shingle prepared using wet process. LSU Master's theses, 1205, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Baton Rouge, 2014, DOI: 10.31390/gradschol_theses.1205
- [18] *Darnell J., Bell C.A.*: Performance based selection of RAP/RAS in asphalt mixtures, Report No. FHWA/OR-RD-16-08. Oregon Department of Transportation, Salem, 2015
- [19] *Diefenderfer S.D.*: Evaluation of Stone-Matrix Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles (RAS), Report No.: FHWA/VTRC 17-R22. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, 2017
- [20] *Kanaan A.I.*: Impact of recycled asphalt shingles on asphalt concrete characteristics. Master of Science thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2013, <http://hdl.handle.net/2142/45354>
- [21] *Koehl K.*: Impact of recycling agents on the design of asphalt mixtures containing roofing shingles. 56th Annual IHEEP Conference, New Orleans, 2014
- [22] *Ozer H., Al-Qadi I.M., Kanaan A.*: Laboratory Evaluation of High Asphalt Binder Replacement with Recycled Asphalt Shingles (RAS) for a Low N-Design Asphalt Mixture, Report No. FHWA-ICT-12-018. Illinois Center for Transportation, Rantoul, 2012
- [23] *Tighe S., Hanasoge N., Eyers B., Essex R., Damp S.*: Who thought recycled asphalt shingles (RAS) needed to be landfilled: Why not build a road? 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, 2008
- [24] *West R., Leiva F., Julian G., Taylor A., Brown E., Willis J.R.*: Using Recycled Asphalt Shingles with Warm Mix Asphalt Technologies, NCHRP Research Report 890. Transportation Research Board, Washington, 2018
- [25] *McGraw J., Zofka A., Krivit D., Schroer J., Olson R., Marasteanu M.*: Recycled asphalt shingles in hot mix asphalt. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, **76**, 2007, 235-274
- [26] *Vavrik W.R., Haugen D., Carpenter S.H., Gillen S., Behnke J., Garrott F.*: Evaluation of HMA modified with recycled asphalt shingles (RAS) mixtures, Illinois State Toll Highway Authority, 2010

- [27] WT-2 część I, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Wymagania Techniczne. GDDKIA, Warszawa, 2014
- [28] *Bańkowski W.*: Analiza trwałości zmęczeniowej betonów asfaltowych z uwzględnieniem typu mieszanki i rodzaju lepiszcza. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 4, 2018, 253-270, DOI: 10.7409/rabdim.018.016
- [29] *Dobosz M.*: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001
- [30] *Zaniewski J.P., Srinivasan G.*: Evaluation of indirect tensile strength to identify asphalt concrete rutting potential. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 1465, West Virginia University, Morgantown, 2003, DOI: 10.33915/etd.1465
- [31] *Christensen D.W., Bonaquist R.*: Using the Indirect Tension Test to Evaluate Rut Resistance in Developing Hot-Mix Asphalt Designs. *Transportation Research Circular*, E-C124, 2007, 62-77
- [32] *Zieliński P.*: Indirect tensile test as a simple method for rut resistance evaluation of asphalt concrete. *Archives of Civil Engineering*, **65**, 3, 2019, 31-44, DOI: 10.2478/ace-2019-0032
- [33] *Zieliński P.*: Indirect tensile test as a simple method for rut resistance evaluation of asphalt mixtures – Polish experience. *Road Materials and Pavement Design*, **23**, 1, 2022, 112-128, DOI: 10.1080/14680629.2020.1820894