

JOANNA SZOŁTYŚ¹⁾
WOJCIECH SOROCIAK²⁾
SŁAWOMIR KWIECIEŃ³⁾

EXAMINATION OF THE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES CONSISTING OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT WITH POLYMER MODIFIED BINDER AND HIGHLY MODIFIED ASPHALT BINDER

BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH WYKONANYCH Z DESTRUKTU ZAWIERAJĄCEGO ASFALT MODYFIKOWANY I WYSOKOMODYFIKOWANY

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia wyniki badań właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wyprodukowanych z dwóch rodzajów destruktu, zawierających asfalt modyfikowany oraz wysokomodyfikowany. Oba rodzaje destruktu pozyskano w warunkach rzeczywistych, a wyprodukowane z nich mieszanki nie zawierały dodatków środków odmładzających. Mieszanki doprowadzono do temperatury zagęszczenia wg wymagań krajowych, a także poddano dodatkowym procesom starzenia w tym w temperaturze przekraczającej temperaturę degradacji obecnego w ich strukturze polimeru SBS (200°C). Wyniki badań zawartości wolnych przestrzeni oraz odporności na działanie wody i mrozu ITSr wykonanych po kondycjonowaniu w temperaturze zagęszczenia zgodnej z wymaganiami krajowymi wykazały korzystniejsze właściwości mieszanki zawierającej destruktu z asfaltem wysokomodyfikowanym (wartości ITSr w zakresie 87-90%) w porównaniu do mieszanki zawierającej destruktu z asfaltem modyfikowanym. Kondycjonowanie w 200°C ujawniło znaczące różnice w zachowaniu mieszanek. Mieszanka zawierająca asfalt modyfikowany umożliwiała rozkładanie i zagęszczanie, podczas gdy mieszanka zawierająca asfalt wysokomodyfikowany utraciła urabialność oraz możliwość zagęszczenia, uniemożliwiając uzyskanie próbek do badań.

SŁOWA KLUCZOWE: asfalt, asfalt wysokomodyfikowany, destruktu asfaltowy, mieszanka mineralno-asfaltowa, recykling.

ABSTRACT. The article presents an investigation of properties of asphalt mixtures produced from two types of reclaimed asphalt pavement material – one containing typical modified binder and one containing highly modified binder. Both types of reclaimed asphalt pavement material were obtained in field from real asphalt layers. The new test mixtures in which they were used contained no rejuvenators. The mixtures were heated to compaction temperature according to the national requirements; moreover, they were subjected to additional aging processes, including temperatures that exceed the degradation temperature of the SBS polymer used in their structure (200°C). Measurements of air voids and resistance to water and frost ITSr, which were performed after conditioning in compaction temperature conforming with national requirements, indicated that the mixture consisting of reclaimed asphalt pavement material with highly modified asphalt binder displayed more advantageous properties (ITSr in the range 87-90%) than the mixture consisting of reclaimed asphalt pavement material with typical polymer modified binder. Conditioning at 200°C demonstrated considerable differences between the tested mixtures. While the asphalt mixture containing typical polymer modified bitumen enabled placement and compaction, the mixture with highly modified binder lost its workability and compactibility, rendering it impossible to produce test specimens.

KEYWORDS: asphalt mixture, binder, highly modified asphalt binder, reclaimed asphalt pavement, recycling.

DOI: 10.7409/rabdim.024.002

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Geotechniki i Dróg, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; joanna.szoltyś@polsl.pl (✉)

²⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Geotechniki i Dróg; wojciech.sorociak@polsl.pl

³⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Geotechniki i Dróg; slawomir.kwiecien@polsl.pl

1. WPROWADZENIE

Technologia wykonania nawierzchni asfaltowych pełni istotną rolę w dzisiejszym budownictwie drogowym i transporcie. W 2021 roku w Unii Europejskiej oraz krajach nieprzynależących do Unii (takich jak Wielka Brytania, Norwegia itd.) wyprodukowano 290,6 mln ton mieszanek mineralno-asfaltowych, co wskazuje na wzrost produkcji w stosunku do roku 2020 o 5,9%. Według danych EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) na terenie Europy w ostatnich latach wzrastają ilości mieszanek produkowanych w technologiach na ciepło (*Warm Mix Asphalt* – WMA) oraz na zimno, co wpływa na ograniczenie emisji szkodliwych substancji oraz lepsze wykorzystanie energii. W przypadku obu tych technologii przodującym krajem jest Francja, gdzie w 2021 roku wyprodukowano ponad 6,5 mln ton mieszanki w technologii na ciepło oraz ponad 2 mln ton w technologii na zimno. Zważywszy na to, że tego roku sumaryczna ilość wyprodukowanych we Francji mieszanek na gorąco oraz na ciepło wynosiła niecałe 35 mln ton, wykorzystanie technologii obniżającej szkodliwy wpływ na środowisko w ponad 20% masy rocznej produkcji jest obiecującym wynikiem [1]. Należy jednak zwrócić uwagę nie tylko na wpływ stosowanej technologii, ale także na wykorzystywanie w inżynierii drogowej nieodnawialnych surowców, jakimi są między innymi produkty ponaftowe.

Problem recyklingu materiałów to temat istotny we wszelkich gałęziach przemysłu w XXI wieku ze względu na potrzebę ograniczenia konsumpcji energii oraz emisji gazów cieplarnianych. W roku 2009 sektor transportu odpowiadał za niemal 20% globalnego zużycia energii oraz 25% emisji szkodliwych substancji. Wśród tych emisji za 75% odpowiedzialny był sektor transportu drogowego [2]. Sama produkcja asfaltu do budowy nowych nawierzchni znacząco przyczynia się do emisji dwutlenku węgla. Gruber i Hofko [3] uzyskali szacowaną średnią wartość emisji dwutlenku węgla przy produkcji asfaltów (z wykluczeniem asfaltów modyfikowanych) na poziomie 365 kg na tonę asfaltu. Autorzy wykorzystali także pochodzące z 3 kamieniołomów dane dotyczące zużycia energii, materiałów wybuchowych, wody oraz innych czynników wpływających na emisję dwutlenku węgla na przestrzeni 5 lat, uzyskując średnią emisję 2,51 kg na tonę kruszywa. W przypadku klasycznych mieszanek typu beton asfaltowy, które składają się z około 5% lepiszcza oraz 95% kruszywa, emisja dwutlenku węgla związana z wydobyciem materiałów na tonę mieszanki wynosi ponad 20 kg, co w przełożeniu na dane z 2021 roku dotyczące produkcji mieszanek w Europie daje prawie 6 mln ton dwutlenku węgla pochodzącego jedynie z poboru materiałów, nie wliczając w to produkcji mieszanki na wytwórni.

1. INTRODUCTION

Asphalt pavement construction technology is an important factor in contemporary road engineering and transportation. In 2021, the European Union and other non-EU European countries (Great Britain, Norway etc.) produced 290.6 million tons of asphalt mixtures, which constitutes a production increase by 5.9% since 2020. According to European Asphalt Pavement Association (EAPA), the quantities of mixtures produced in Europe as warm mix asphalt (WMA) and cold mix asphalt have been rising in the recent years, which contributes to better energy usage and a reduction in emissions. France is the leader in terms of the two technologies – in 2021 it produced 6.5 million tons of warm mix asphalt and over 2 million tons of cold mix asphalt. Taking into account that the total quantity of hot and warm mix asphalt mixtures produced in France amounted to nearly 35 million tons, usage of more environmentally friendly technology in over 20% of annual production by mass is a promising result [1]. However, apart from the environmental impact of the technology itself, one should also take into account the usage of non-renewable resources, including petroleum products, in road engineering.

In the 21st century, problem of material recycling is essential in all the sectors of industry due to the need for reductions in energy consumption and greenhouse gas emissions. In 2009 the transportation sector was responsible for nearly 20% of the global energy consumption and 25% of pollutant emissions; 75% of those emissions may be attributed to the road transportation sector [2]. Production of bitumen for new pavements considerably contributes to carbon dioxide emissions. Gruber and Hofko [3] evaluated the average carbon dioxide emission due to bitumen production (excluding modified binders) as 365 kg per ton of bitumen. They also used data from 3 quarries pertaining to usage of energy, explosives, water and other factors affecting carbon dioxide emissions over a period of 5 years; the average emission equaled 2.51 kg per ton of aggregate. In the case of classic asphalt concrete mixtures, which contain about 5% of binder and 95% of aggregate, carbon dioxide emissions due to obtaining of materials exceed 20 kg per ton of mixture. In combination with the 2021 data on mixture production in Europe, this gives almost 6 million tons of carbon dioxide emitted due to obtaining of the materials, excluding production of mixture in processing plant.

In order to limit exploitation of resource deposits, reclaimed asphalt pavement material is used in production

W celu ograniczenia eksploatacji złóż materiałów wykorzystywanych do produkcji nowych mieszanek mineralno-asfaltowych rozpoczęto stosowanie granulatu asfaltowego. Ze względu na właściwości destruktu, które po procesach starzeniowych są odmienne od właściwości oryginalnej mieszanki, polskie Wymagania Techniczne [4] dopuszczają wykorzystanie granulatu przy produkcji betonu asfaltowego (AC) oraz betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC WMS), z wyłączeniem warstwy ścieralnej, w ilości zaledwie 20% w metodzie „na zimno” oraz 30% w metodzie „na gorąco” ze wstępnym ogrzewaniem granulatu. Pojawia się jednak coraz więcej przesłanek świadczących o zasadności wykorzystania większej ilości granulatu przy produkcji nowych nawierzchni ze względu na aspekty środowiskowe [5-7]. Celem częściowego przywrócenia właściwości granulatu po procesach starzeniowych wprowadzono wykorzystanie środków odmładzających [8, 9]. Są to środki wpływające na przywrócenie równowagi frakcji lepiscza, które w mieszance mineralno-asfaltowej jest materiałem podlegającym procesom starzeniowym. Najczęściej wykorzystywanym obecnie podziałem frakcji lepiscza jest podział na [10, 11]:

- asfaltyny,
- malteny:
 - żywice,
 - oleje nienasycone (aromatyczne),
 - oleje nasycone.

Wymienione frakcje są mieszaninami węglowodorów o różnej masie, polarności oraz podatności na utlenianie. W czasie procesów starzeniowych, zarówno technologicznych jak i eksploatacyjnych, w asfaltowym układzie koloidalnym ciężkie frakcje asfaltenu rozproszone są w strukturze maltenowej, która ulega reakcjom chemicznym. Do reakcji tych należy utlenianie pierścieni benzenowych, polikondensacja związków aromatycznych, które zwiększają swoją masę cząsteczkową, oraz tworzenie grup karbonylowych i sulfotlenkowych [12, 13]. Dodatkowo zachodzi przerywanie słabych wiązań lotnych związków lekkich frakcji, ulatniających się pod wpływem wysokich temperatur [14]. Procesy te wpływają na zakres pracy lepkością lepiscza oraz podwyższenie temperatury mięknięcia i temperatury łamliwości Fraassa. Co więcej, podczas wzrostu związków węglowodorowych o wyższej masie cząsteczkowej oraz utraty lekkich frakcji stosunek asfaltenu do maltenu zaczyna rosnąć. Malteny przestają efektywnie rozpraszać cięższe związki, które mają tendencję do grupowania i segregacji, zaburzającej stabilność układu [15]. Wspomniane wcześniej środki odmładzające mają za zadanie uzupełnić w tym układzie frakcje maltenowe, celem przywrócenia lepisczu odpowiednich właściwości lepkościowych.

of new asphalt mixtures. Taking into consideration the properties of reclaimed asphalt, which differ from the properties of the original mixture due to aging processes, the Polish technical requirements WT-2 [4] permit the usage of recycled asphalt feedstock in production of asphalt concretes (AC) and high modulus asphalt concretes (HMAC) – excluding wearing courses – at the quantity of only 20% in the cold dosing method and 30% in the hot dosing method (with preliminary heating of the reclaimed asphalt feedstock). However, there is a growing number of factors that indicate it is justified to use greater quantities of reclaimed asphalt feedstock in production of new pavement layers due to environmental aspects [5-7]. In order to enable partial restoration of the properties of reclaimed asphalt after aging, rejuvenators were introduced [8, 9]. These agents contribute to restoration of the balance between component fractions in bitumen, which is the part of the asphalt mixture that actually undergoes aging. The most common division of bitumen component fractions is as follows [10, 11]:

- asphaltenes,
- maltenes:
 - resins,
 - unsaturated (aromatic) oils,
 - saturated oils.

The above fractions comprise mixtures of hydrocarbons of varying mass, polarity and oxidizability. During the aging processes – both short- and long-term - the colloidal structure of bitumen changes; the maltenes, in which heavy asphaltenes are dispersed, undergo chemical reactions. Such reactions include oxidation of benzene rings, polycondensation of aromatics (with an increase in their molecular mass) and creation of carbonyl and sulfoxide compounds [12, 13]. Additionally, breaking of weak bonds in volatile components of light fractions leads to their volatile release at high temperatures [14]. These processes affect the viscoelastic range of the binder and lead to an increase in the softening point and Fraass breaking point. Moreover, growth of hydrocarbon compounds of greater molecular mass and loss of light fractions result in growing proportion of asphaltenes to maltenes. Maltenes no longer effectively act as the continuous phase in which the heavier compounds are dispersed; they exhibit tendencies toward grouping and segregation, thus affecting the stability of the system [15]. The role of the aforementioned rejuvenators is to supplement the maltene fractions in the system in order to restore the desired viscoelastic properties.

Zachowanie układu ulega znaczącej zmianie w obecności modyfikującego go polimeru SBS (styren-butadien-styren), składającego się z trzech bloków merów, w których polistyren odpowiada za podwyższenie wytrzymałości, a podatny polibutadien, zawierający nienasycone wiązania węglowe, za zachowanie elastyczności układu (Rys. 1) [16, 17]. W przypadku małych ilości modyfikatora (2-3%) lepiszcze w dalszym ciągu stanowi matrycę układu, w której malteny odpowiadają za rozpraszanie zarówno asfaltenów, jak i cząstek polimeru. Dla asfaltów wysokomodyfikowanych (HiMA), w których zawartość polimeru sięga 6-8%, następuje odwrócenie faz – składniki lepiszcza o wysokiej masie rozproszone są w sieci polimerowej utworzonej dzięki oddziaływaniom międzycząsteczkowym pomiędzy blokami polistyrenu oraz wiązaniami kowalencyjnym utworzonym dzięki podwójnym wiązaniami węglowym w bloku polibutadienu [16].

Procesy starzeniowe postępujące w asfalcie wysokomodyfikowanym są uzależnione od wielu czynników, co skutkuje złożonymi reakcjami prowadzącymi do degradacji lepiszcza, a tym samym nawierzchni. Do tych czynników należą:

- pochodzenie asfaltu (udział poszczególnych frakcji) [18],
- udział modyfikatora [19],
- rodzaj modyfikatora (łańcuchowy lub pierścieniowy) [20],
- stosowanie dodatków sieciujących (np. siarka) [21],
- utlenianie [18, 22],
- wysoka temperatura [18],
- promieniowanie UV [23, 24].

Przeprowadzone prace badawcze dotyczące starzenia asfaltów opierają się głównie na metodach laboratoryjnych starzenia lepiszczy asfaltowych. Liczba badań na mieszankach mineralno-asfaltowych jest znacznie bardziej ograniczona. Powodem jest przede wszystkim fakt, że metody starzeniowe dla mieszanek nie są ustandaryzowane. Podobnie jak w przypadku lepiszczy, wykorzystuje się aparaty RTFOT oraz PAV. Potrzeba zwiększenia badań nad mieszankami spowodowana jest bezpośrednim wpływem ich parametrów fizycznych na postępowanie procesów starzenia. Do takich parametrów zalicza się przede wszystkim zawartość wolnych przestrzeni, która determinuje dostęp tlenu (głównego czynnika starzeniowego) do lepiszcza w trakcie eksploatacji [25]. Wpływ na starzenie ma również zjawisko adsorpcji lepiszcza przez kruszywo; pochłanianie lekkich frakcji z asfaltu wpływa na stabilność całego układu koloidalnego [26]. Dotychczasowe badania starzeniowe na mieszankach mineralno-asfaltowych prowadzone były na zasadzie ekstrakcji i odzysku lepiszcza, a następnie obserwacji jego struktury tymi samymi metodami, co w przypadku badań RTFOT oraz PAV [27]. Ekstrakcję lepiszcza wykorzystywano także podczas badań nad starzeniem

Performance of the system changes significantly upon addition of the modifying SBS (styrene-butadiene-styrene) polymer, comprising of three mer unit blocks; with polystyrene contributing to improved strength and flexible polybutadiene, which includes unsaturated carbon bonds, contributing to elasticity of the system (Fig. 1) [16, 17]. In the case of low quantities of the modifier (2-3%), the bitumen still comprises the matrix of the system, with maltenes acting as the continuous phase in which the asphaltenes and the polymer molecules are dispersed. For highly modified binders, in which the polymer content reaches 6-8%, a reversal of the phases occurs – bitumen components with high mass are dispersed in continuous polymer matrix, which emerges due to intermolecular interactions between polystyrene blocks and due to covalent bonds created owing to the double bonds between carbon atoms in the polybutadiene block [16].

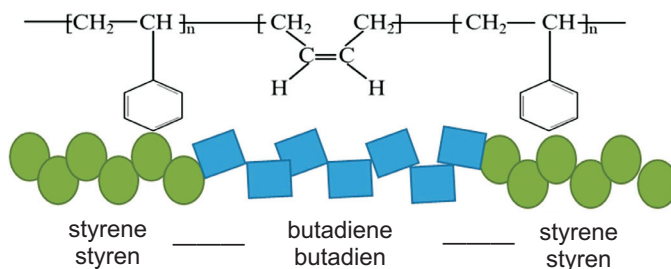


Fig. 1. Structure of the SBS polymer [17]
Rys. 1. Budowa cząstki polimeru SBS [17]

Advancement of aging processes in a highly-modified binder depends on multiple factors, resulting in complex reactions that lead to degradation of the binder and, consequently, the pavement. These factors include:

- origin of the bitumen (proportion of component fractions) [18],
- modifier content [19],
- modifier type (chain or ring) [20],
- use of cross-linking agents (e.g. sulfur) [21],
- oxidation [18, 22],
- high temperature [18],
- UV radiation [23, 24].

The available research works on asphalt aging are primarily focused on laboratory methods of bituminous binder aging. The number of such studies on asphalt mixtures is limited. This is mainly due to the fact that aging methods for asphalt mixtures are not standardized. As in the case of binders, RTFOT and PAV devices are used. The need for more comprehensive studies on asphalt mixture aging is associated with the direct relationship between physical

asfaltów wysokomodyfikowanych, jednak zauważono negatywny wpływ wykorzystywanych podczas ekstrakcji rozpuszczalników na strukturę polimeru SBS, szczególnie w przypadku dichlorometanu [28]. W związku z tym ustandaryzowane metody badawcze dla lepkości, takie jak temperatura mięknięcia, penetracja lub badania reologiczne, mogą być niemiarodajne dla asfaltu modyfikowanego z odzysku. Należy przeprowadzić obserwację parametrów fizyko-mechanicznych mieszanki, szczególnie w przypadku mieszanek zawierających asfalt modyfikowany polimerami.

W przypadku asfaltów wysokomodyfikowanych wykazano, że normowa temperatura starzenia krótkoterminowego RTFOT nie wpływa na strukturę materiału tak znacząco, jak w przypadku asfaltów drogowych. Analiza zmian przy użyciu metody spektroskopowej FTIR wykazuje, że przy 163°C nie zauważa się powstania grup karbonylowych oraz sulfotlenkowych, będących typowym efektem starzenia asfaltów. Znaczące zmiany w tych grupach zauważono po podwyższeniu temperatury starzenia do 210°C. Zauważono jednak również, że asfalty pochodzące z mieszanek mineralno-asfaltowych starzonych w 163°C charakteryzują się zwiększoną ilością utlenionych substancji w porównaniu do starzenia laboratoryjnego asfaltu RTFOT, co dowodzi wpływu parametrów fizycznych mieszanki na spadek odporności starzeniowej asfaltu [29]. Ponadto, badanie FTIR wykazało zakres temperatur, dla którego postępuje degradacja obecnego w asfalcie modyfikowanym polibutadienu, będącego składnikiem polimeru odpowiadającym za sieciowanie, starzenie oraz podatność na reakcje z innymi związkami. Zauważalna degradacja polibutadienu rozpoczyna się w temperaturze około 200°C [30]. Zważywszy na to, że temperatura produkcji mieszanek zawierających asfalt wysokomodyfikowany wynosi zazwyczaj około 180°C, normowa temperatura badania RTFOT jest za niska do przeprowadzenia miarodajnych obserwacji struktury starzejącego się asfaltu HiMA.

W związku z wysoką trwałością zmęczeniową mieszanek zawierających asfalt wysokomodyfikowany oraz ich niewielkim wiekiem wynikającym ze stosunkowo niedawnej implementacji technologii w branży drogowej, rzadkością jest możliwość pracy ze sfrezowanym destruktem eksploatowanym w warunkach rzeczywistych oraz przeprowadzenia na nim badań określających jego przydatność do ponownego wykorzystania. Niniejsza praca skupia się na wytworzeniu mieszanki mineralno-asfaltowej w 100% z destruktu zawierającego asfalt wysokomodyfikowany oraz mieszanki w 100% z destruktu zawierającego asfalt modyfikowany, celem porównania zmian zachodzących w ich strukturze pod wpływem wysokich temperatur przekraczających temperatury degradacji polimeru, co może w przyszłości okazać się

parametrów mieszanki i postępów procesów starzenia. Najważniejsze parametry to zawartość powietrza, która determinuje stopień, do jakiego klej jest narażony na tlen (główny czynnik starzenia) podczas eksploatacji [25]. Starzenie jest również wpływowane przez adsorpcję kleju do agregatów; utrata frakcji lekkich wpływa na stabilność całego koloidu [26]. Testy starzenia na mieszankach asfaltowych przeprowadzono na podstawie ekstrakcji i odzyskania kleju, którego strukturę obserwowano za pomocą tych samych metod, co w przypadku testów RTFOT i PAV [27]. Ekstrakcja kleju była używana w badaniach nad zmodyfikowanymi klejami; jednakże, negatywny wpływ rozpuszczalników na strukturę polimeru SBS został zauważony, szczególnie w przypadku dichlorometanu [28]. Dlatego, standaryzowane metody testowania kleju – takie jak mięknięcie, penetracja lub testy reologiczne – mogą być niewystarczające w przypadku odzyskanego modyfikowanego bitumu. Obserwacje parametrów fizyko-mechanicznych mieszanki są konieczne, szczególnie w przypadku mieszanek zawierających klej modyfikowany polimerami.

Dla klejów modyfikowanych polimerami zostało udowodnione, że standardowa temperatura krótkoterminowego starzenia RTFOT nie wpływa na strukturę materiału tak znacząco, jak w przypadku bitumu drogowego. Analiza zmian przy użyciu metody spektroskopowej FTIR wykazuje, że przy 163°C nie obserwuje się powstania grup karbonylowych ani sulfotlenkowych, które są typowymi wskaźnikami starzenia bitumu. Zmiany w tych grupach zostały zauważone po podwyższeniu temperatury starzenia do 210°C. Zauważono jednak również, że kleje odzyskane z mieszank asfaltowych, które były starzone w 163°C, zawierały więcej utlenionych substancji niż kleje testowane w RTFOT, co potwierdza wpływ parametrów mieszanki na zmniejszenie odporności starzeniowej kleju [29]. Ponadto, badania FTIR wskazały na zakres temperatur, w którym następuje degradacja polibutadienu, który jest odpowiedzialny za sieciowanie, starzenie i podatność na reakcje z innymi związkami. Zauważalna degradacja polibutadienu rozpoczyna się w temperaturze około 200°C [30]. Biorąc pod uwagę, że temperatura produkcji mieszanek zawierających klej modyfikowany wynosi zazwyczaj około 180°C, standardowa temperatura badania RTFOT jest zbyt niska do przeprowadzenia miarodajnych obserwacji struktury starzejącego się asfaltu HiMA.

Ze względu na wysoką żywotność mieszank zawierających klej modyfikowany i młody wiek istniejących nawierzchni (wynikający z niedawnej implementacji technologii HiMA), okazuje się, że istnieje potrzeba badań nad wykorzystaniem HiMA w nawierzchniach, które zostały wykonane w ostatnich latach. Wyniki z badań nad HiMA w warunkach rzeczywistych mogą być cenne dla inżynierów i badaczy.

istotnym problemem, z którym branża drogowa będzie musiała się zmierzyć.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE

Do badań zastosowano dwa rodzaje mieszanek pochodzących w 100% z destruktu – mieszanek na asfalcie modyfikowanym PMB 25/55-60 oraz na wysokomodyfikowanym PMB 45/80-80 (HiMA). W niniejszym artykule wykorzystywany jest termin „destrukt”, ponieważ zgodnie z WT-2 [4] mieszanek produkowane były na nieprzetworzonym, sfrezowanym materiale o nieudokumentowanych właściwościach, którego przydatność jako „granulatu” jest opisana dopiero w ramach później przeprowadzonych badań. Obie mieszanek były poddane sfrezowaniu po wieloletniej eksploatacji. Ze względu na niszczące działanie frezowania na kruszywo i zmianę udziału poszczególnych frakcji, dla porównania właściwości oryginalnych mieszanek i ich odpowiedników składających się w 100% z pozyskanego z nich destruktu (na których przeprowadzone były badania laboratoryjne) przeprowadzono ekstrakcję oraz porównanie składu ziarnowego (Rys. 2-3).

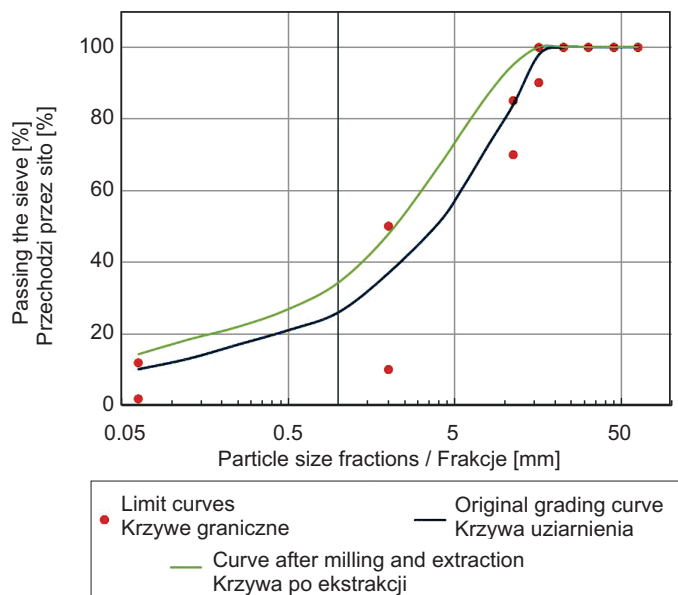


Fig. 2. Grading curves of the mixture containing the PMB 25/55-60 bitumen: from the original design, after milling and extraction, limit curves

Rys. 2. Krzywa uziarnienia mieszanki z asfaltem PMB 25/55-60 z receptury, krzywa z ekstrakcji po frezowaniu oraz krzywe graniczne

Fig. 3. Grading curves of the mixture containing the PMB 45/80-80 bitumen: from the original design, after milling and extraction, limit curves

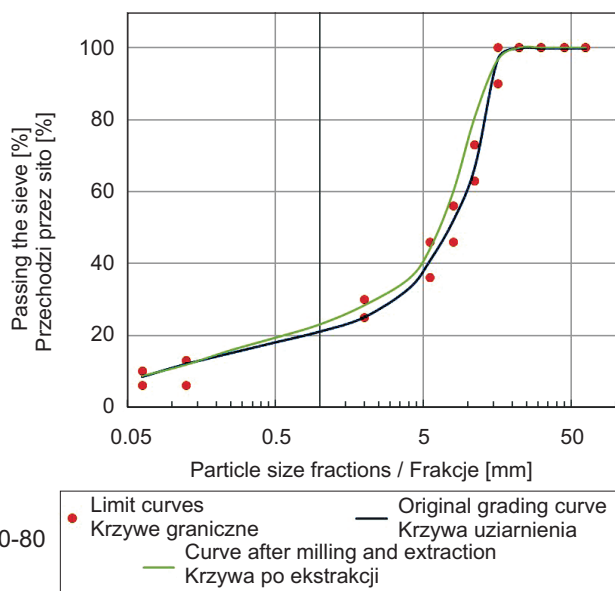
Rys. 3. Krzywa uziarnienia mieszanki z asfaltem PMB 45/80-80 z receptury, krzywa z ekstrakcji po frezowaniu oraz krzywe graniczne

still scarce. The presented work was focused on production of an asphalt mixture comprising 100% of RAP in which highly modified binder had been used and a mixture comprising 100% of RAP in which typical polymer modified binder had been used. The aim was to compare the changes that occur in their structure at high temperatures exceeding the polymer degradation temperature; this problem may pose a significant challenge for the road engineering industry in future.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. ASPHALT MIXTURES

The tests were performed on two types of mixtures comprising 100% of RAP material – one reclaimed asphalt mixture contained polymer modified binder PMB 25/55-60, while the other reclaimed mixture contained highly modified binder PMB 45/80-80 (HiMA). In the light of the WT-2 requirements [4], the site-won material was not a “feedstock of reclaimed asphalt”, since it was used for mixture production without processing or prior classification of its properties. Its usability as “feedstock” was assessed only later, based on the tests conducted on the produced specimens. Both mixtures were milled after several of service. Due to the destructive effect of milling on aggregate and the change in its particle size distribution, comparisons were made between the original mixtures and their counterparts containing 100% of milled material (produced as specimens for laboratory testing) – based on particle size distribution of aggregates obtained after extraction (Figs. 2-3).



Krzywe uziarnienia destruktu po frezowaniu i ekstrakcji w przypadku obu mieszanek różnią się od krzywej uziarnienia z oryginalnej receptury i nie mieszczą się w krzywych granicznych. W przypadku destruktu zawierającego asfalt PMB 45/80-80 zauważalny jest znaczący wzrost udziału ziaren przechodzących przez sito 11,2 mm (około 12% różnicy), przy jednoczesnym zmniejszeniu ilości frakcji 11-16 mm. Zawartość frakcji drobnych jest porównywalna. Po ekstrakcji sfrezowanej mieszanki zawierającej asfalt PMB 25/55-60 zauważalne są znacznie większe różnice w poszczególnych frakcjach, sięgające nawet 15% masy kruszywa przechodzącego przez wybrane sита. Dotyczy to także drobnych frakcji, w tym zwiększonej ilości pyłów. Tendencja ta została odnotowana w literaturze [31].

Należy zwrócić uwagę na trudność w uzyskaniu destruktu z poddanych eksploatacji mieszanek o podobnych do siebie parametrach – w szczególności w przypadku mieszanek zawierających asfalt wysokomodyfikowany, ze względu na niewielką dostępność tego materiału. W związku z tym badane mieszanki różnią się nie tylko rodzajem wykorzystanego asfaltu, ale także uziarnieniem, rodzajem kruszywa oraz deklarowanymi parametrami fizycznymi. Niniejsza praca nie skupia się więc na bezpośrednim porównaniu właściwości dwóch mieszanek wyprodukowanych z destruktu o różnych parametrach, lecz na studium przypadku tych dwóch materiałów i zmianach ich właściwości wynikłych z poddania ich wysokim temperaturom. W Tabl. 1 zestawiono cechy dwóch pobranych destruktu.

For both mixture types, grading curves after milling and extraction differ from the originally designed curves and exceed the limit curves. In the case of RAP containing the PMB 45/80-80 bitumen, a significant increase in the share of particles passing the 11.2 mm sieve is observed (approx. difference of 12%), in combination with a decrease in the share of the 11-16 mm fraction. The content of fine fractions is comparable. After extraction of the milled mixture containing the PMB 25/55-60 bitumen, much greater differences are visible in particular fractions, even reaching 15% (by mass) of particles passing chosen sieves. This also pertains to fine fractions, including an increased content of silts. This tendency has been described in the literature [31].

It should be noted how difficult it is to obtain RAP originating from mixtures of comparable parameters – especially in the case of mixtures containing highly modified bitumen, due to their low availability. The mixtures tested in this study differ not only in the type of the binder used, but also in aggregate type, particle size distribution and the declared physical parameters. Therefore, this study is not focused on direct comparisons of the two mixtures produced from RAP of varying parameters; it is rather a case study of the two materials and the changes in their properties resulting from exposure to high temperatures. Table 1 presents the properties of the two obtained RAP materials.

Table 1. Properties of the two RAP materials used
Tablica 1. Porównanie właściwości obu destruktu

Parameter / Parametr	Properties of the RAP material Właściwości destruktu	
	PMB 25/55-60	PMB HiMA 45/80-80
Mixture type / Typ mieszanki	AC WMS 16	SMA 16
Course / Warstwa	Binder / Wiążąca	Wearing / Ścieralna
Years of service / Lata eksploatacji	3	5
Designed binder content [%] / Zawartość lepiszcza wg receptury [%]	4.9	5.7
Binder content measured after extraction [%] / Zawartość lepiszcza po ekstrakcji [%]	5.0	5.5

2.2. STARZENIE MIESZANEK

Obie mieszanki mineralno-asfaltowe poddano dodatkowym procesom starzenia bez ingerencji w strukturę lepiszcza (bez przywracania udziału frakcji poprzez użycie środków odmładzających). Umożliwia to obserwację ich fizykomechanicznych właściwości przy użyciu ich do produkcji nowych mieszanek z uwzględnieniem długotrwałego przetrzymywania w warunkach podwyższonej temperatury starzenia technologicznego oraz zaistnienia miejscowych przegrzań doprowadzających do „przepalenia” lepiszcza asfaltowego.

2.2. MIXTURE AGING

Both asphalt mixtures were subjected to additional aging processes, without intervening in the binder structure (without restoration of bitumen fraction proportions through usage of rejuvenators). This approach enables observation of their physico-mechanical properties after their usage in production of new mixtures, taking into account prolonged exposure to increased technological aging temperatures and occurrence of local overheating, leading to “overburning” of the binder.

Właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych zbadano dla destruktu doprowadzonego do temperatury zagęszczenia ($145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) bez dodatkowych procesów starzeniowych oraz destruktu starzonego w 150°C oraz 200°C z obiegiem powietrza w czasie 6 godzin (4 godzin od momentu osiągnięcia docelowej temperatury, w nawiązaniu do metod starzenia mieszanek mineralno-asfaltowych wg SHRP-A-383 [32]).

2.3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Po podzieleniu obu mieszanek na 3 serie starzeniowe, wykonano w ubijaku Marshalla po 10 próbek (2×35 uderzeń) przeznaczonych do badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie oraz po 3 próbki (2×75 uderzeń) przeznaczone do oznaczenia gęstości objętościowej i zawartości wolnych przestrzeni wg PN-EN 12697-30 [33]. Z badań wykluczono mieszanekę na destrukcie asfaltowym zawierającym asfalt HiMA po starzeniu w 200°C , ze względu na osiągnięcie przez lepszycze struktury uniemożliwiającej swobodne formowanie próbek.

2.4. ZAWARTOŚĆ WOLNYCH PRZESTRZENI

Dla porównania zmian właściwości fizycznych zachodzących w mieszance mineralno-asfaltowej pod wpływem postępujących procesów starzeniowych niezbędne jest określenie zawartości wolnych przestrzeni. Parametr ten stanowi bezpośredni wskaźnik zdolności do zagęszczania próbek, obniżającej się w miarę postępowania starzenia ze względu na zmiany zachodzące we frakcjach lepszycza asfaltowego wpływających na jego lepkość i przydatność jako spoiwa. Określenia zawartości wolnych przestrzeni dokonano wg normy PN-EN 12697-8 [34], wyników gęstości właściwej mieszanek wg normy PN-EN 12697-5 [35], a gęstości objętościowej wg PN-EN 12697-6 [36] i danych z receptur obu destruktyw. Zwiększona zawartość drobnych frakcji w mieszance mineralno-asfaltowej po frezowaniu powinna prowadzić do zmniejszenia zawartości wolnych przestrzeni poprzez lepsze ich wypełnienie. Porównanie zawartości wolnych przestrzeni mieszanki składającej się w 100% ze sfrezowanego destruktu z oryginalną recepturą może jednak wykazać negatywny wpływ starzenia lepszycza na jej zagęszczenie – pomimo uziarnienia umożliwiającego osiągnięcie bardziej zwartej struktury.

2.5. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE POŚREDNIE ORAZ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE WODY I MROZU (ITS / ITSR)

Badanie *ITS* przeprowadzono na próbkach uformowanych wcześniej w ubijaku Marshalla, po podzieleniu serii na dwa zestawy – „suchy” oraz „mokry” (drugi był kondycjonowany

Properties were tested for asphalt mixtures obtained from RAP heated to compaction temperature ($145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) without additional aging processes, as well as from RAP aged for 6 hours at 150°C and 200°C with air circulation (4 hours from the moment the target temperature was reached, based on the asphalt mixture aging methods given in SHRP-A-383 [32]).

2.3. SPECIMEN PREPARATION

Upon division of both RAP materials into three aging series, test specimens were produced in a Marshall compactor: 10 indirect tensile strength test specimens per series (2×35 blows) and 3 bulk density/air void test specimens (2×75 blows) according to PN-EN 12697-30 [33]. Portion of the reclaimed mixture with HiMA binder that was aged at 200°C was excluded from further testing at this point, since its structure after aging rendered it impossible to form test specimens.

2.4. AIR VOID CONTENT

In order to compare the changes in physical properties of an asphalt mixture due to aging processes, it is necessary to determine its air void content. This parameter is a direct indicator of mixture compactibility, which decreases as the aging progresses and causes changes to the balance of component fractions in bitumen, affecting its viscosity and performance. Air void content was determined in accordance with PN-EN 12697-8 [34], maximum mixture density was measured in accordance with PN-EN 12697-5 [35], while bulk density was determined based on PN-EN 12697-6 [36] and data from the original mixture designs. The increased content of fine particles in the milled asphalt mixture should lead to better filling of voids and a resultant decrease in air void content in the produced mixture. However, comparison of air void content provided in the original design with that of the produced specimens comprising 100% of RAP may indicate negative effect of binder aging on their compaction, despite the particle size distribution that potentially enables obtaining of structure with less voids.

2.5. TESTING OF INDIRECT TENSILE STRENGTH AND RESISTANCE TO WATER AND FROST (ITS / ITSR)

Indirect tensile strength *ITS* was tested on specimens formed in Marshall compactor, after division of each series into two sets – “dry” and “wet” (the latter was conditioned in water bath and frozen in accordance with PN-EN 12697-12 [37]). The values of indirect tensile strength

łaźni wodnej i zamrażany wg normy PN-EN 12697-12 [37]). Na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie obu zestawów dla wszystkich serii mieszank wg PN-EN 12697-23 [38] wyliczono wartości *ITSR*.

3. WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

3.1. STARZENIE

Przed porównaniem wyników badań przeprowadzonych dla zagęszczonych próbek Marshalla wykluczono starzoną w 200°C mieszankę zawierającą asfalt wysokomodyfikowany HiMA. „Przepalona” w taki sposób mieszanka mineralno-asfaltowa nie nadawała się do zagęszczenia ze względu na skamieniałą strukturę, wymagającą mechanicznego rozdzielania poszczególnych ziaren celem przeprowadzenia dalszych badań, co z perspektywy produkcji na wytwórni wyklucza możliwość wykorzystania takiej mieszanki. Przeprowadzono próbę mechanicznego rozdzielania tak uformowanej mieszanki w celu jej zagęszczenia, co skutkowało koniecznością wykorzystania około 20% mniej masy mieszanki do wykonania zagęszczonej próbki o wysokości zbliżonej do pozostałych serii. Świadczy to o bardzo wysokiej zawartości wolnych przestrzeni i stanowi znaczące przeciwwskazanie do wykorzystania mieszanki w warunkach rzeczywistych (Rys. 4). Biorąc pod uwagę fakt, że temperatura produkcji mieszank zawierających asfalty modyfikowane wynosi zazwyczaj około 180°C i możliwe jest ich miejscowe przegrzanie do temperatur powyżej 200°C, wskazane jest zachowanie ostrożności ze względu na możliwą degradację polimeru uniemożliwiającą poprawne zagęszczenie warstwy nawierzchni.

Mieszanka stworzona w 100% z destruktu zawierającego tradycyjny asfalt modyfikowany po starzeniu w 200°C, pomimo „przepalenia” lepiszcza i częściowej utraty właściwości lepko-sprężystych, zachowała „sypki” charakter i nadawała się do dalszych badań oraz uformowania próbek w ubijaku Marshalla. Zarówno w przypadku serii niestarzonych, jak i starzonych w 150°C, obie mieszanki mineralno-asfaltowe nie wykazywały problemów w trakcie zagęszczania. Wyniki badań właściwości fizykomechanicznych wskazują natomiast na istotne różnice pomiędzy mieszankami zależne od zastosowanego lepiszcza.

3.2. ZAWARTOŚĆ WOLNYCH PRZESTRZENI

Pomimo spowodowanych niszcącym procesem rozbiórki nawierzchni różnic w krzywych uziarnienia pomiędzy oryginalnymi recepturami oraz wynikami ekstrakcji, zarówno gęstości właściwie jak i objętościowe obu mieszank niepoddanych dodatkowym działaniom starzenia są do siebie zbliżone (Tabl. 2, Tabl. 3). Tym samym zawartości wolnych przestrzeni mieszank niestarzonych spełniają warunki oryginalnej receptury.

ratio *ITSR* were calculated based on *ITS* values in accordance with PN-EN 12697-23 [38].

3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

3.1. AGING

The portion of reclaimed mixture containing HiMA binder that had been aged at 200°C was excluded from further comparisons at the stage of Marshall compaction. The “overburned” RAP was unfit for compaction due to hardened structure that required mechanical separation of particles before compaction and testing. This fact rendered the material useless in terms of potential mixture production in a plant. Attempts were made to mechanically separate the connected particles and compact the material. The obtained compacted specimens of comparable height incorporated about 20% less material (by mass), which suggested very high void content and served as a strong indication against using such mixture in real conditions (Fig. 4). Considering the fact that production temperature of mixtures containing highly modified binders is usually around 180°C, it is possible to locally overheat the mixture to 200°C. Therefore, caution is advised due to the possible degradation of the polymer that would render adequate compaction of the pavement course impossible.

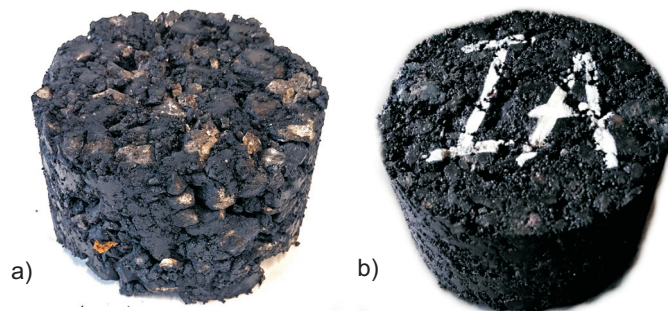


Fig. 4. Comparison of two specimens compacted in a Marshall device: a) mixture containing PMB 45/80-80 binder after aging at 200°C, b) mixture not subjected to additional conditioning
Rys. 4. Porównanie próbek zagęszczonych w ubijaku Marshalla: a) próbka mieszanki zawierającej asfalt PMB 45/80-80 po starzeniu w 200°C, b) próbka zagęszczona bez dodatkowego kondycjonowania

Mixture comprising 100% of RAP with typical polymer modified binder after aging at 200°C – despite binder “overburning” and partial loss of viscoelastic properties – retained “loose” character and suitability for compaction in the Marshall device and further testing. Unaged series and series aged at 150°C displayed no problems during compaction, regardless of binder type. However, testing of physico-mechanical properties indicated significant

Table 2. Density results for calculations of air void content in mixtures with the PMB 25/55-60 bitumen
 Tablica 2. Wyniki badań gęstości mieszanki zawierającej asfalt PMB 25/55-60 do obliczeń zawartości wolnych przestrzeni

Mixture with: Mieszanka zawierająca: PMB 25/55-60		Density Gęstość [Mg/m ³]	Bulk density Gęstość objętościowa [Mg/m ³]
Design / Receptura		2.570	2.496
RAP Destrukt	unaged / niestarzony	2.600	2.500
	150°C		2.423
	200°C		2.204

Na Rys. 5 zestawiono zawartości wolnych przestrzeni dla wszystkich serii mieszank. Mieszanka wykonana z destruktu zawierającego asfalt PMB 25/55-60 wykazuje tendencję do wzrostu zawartości wolnych przestrzeni po starzeniu. Seria starzona w 150°C przez 6 godzin wykazuje zawartość wolnych przestrzeni o niemal 4% wyższą od oryginalnej receptury. Zawartość wolnych przestrzeni serii starzonej w 200°C sięga 15,2%, co jest wartością 5-krotnie wyższą względem oryginalnej receptury. W przypadku mieszanki zawierającej asfalt PMB HiMA 45/80-80, zarówno seria niestarzona, jak i starzona w 150°C, przedstawia zawartość wolnych przestrzeni podobną do założonej w recepturze. Jedynie seria starzona w 200°C wykazuje znacząco wyższą wartość. Pomimo podobnej zawartości wolnych przestrzeni serii niestarzonych obu rodzajów mieszank, mieszanka zawierająca asfalt HiMA starzona w 200°C wykazuje niższą zawartość wolnych przestrzeni od starzonej mieszanki zawierającej PMB 25/55-60.

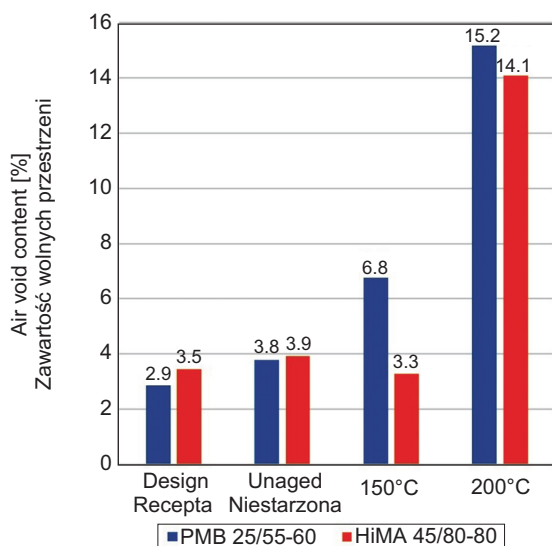


Fig. 5. Comparison of air void content [%] in asphalt mixtures
 Rys. 5. Porównanie zawartości wolnych przestrzeni [%] dla mieszank mineralno-asfaltowych

differences between asphalt mixtures, depending on the type of the binder contained in RAP.

3.2. AIR VOID CONTENT

Despite the differences between the originally designed grading curves and grading established after milling, both the maximum (voidless) density and bulk density of both mixtures that were not additionally aged are comparable (Tables 2 and 3). Therefore, the air void content values of both unaged mixtures fulfil the requirements of the original designs.

Table 3. Density results for calculations of air void content in mixtures with the PMB 45/80-80 bitumen
 Tablica 3. Wyniki badań gęstości mieszanki zawierającej asfalt PMB 45/80-80 do obliczeń zawartości wolnych przestrzeni

Mixture with: Mieszanka zawierająca: PMB 45/80-80		Density Gęstość [Mg/m ³]	Bulk density Gęstość objętościowa [Mg/m ³]
Design / Receptura		2.455	2.370
RAP Destrukt	unaged / niestarzony	2.460	2.359
	150°C		2.375
	200°C		2.110 ^{*)}

^{*)} Bulk density of mixture aged at 200°C was tested for one specimen; the results given for the remaining series are mean values from three measurements.
 Gęstość objętościowa mieszanki starzonej w 200°C została zbadana dla jednej próbki; wyniki pozostałych serii są średnią wyciągniętą z pomiarów dla trzech próbek.

Fig. 5. presents air void content for all the specimen series. Mixture produced from RAP containing the PMB 25/55-60 bitumen shows a tendency towards an increase in air void content after aging. The series aged for 6 hours at 150°C displays air void content greater by almost 4% than in the original design. Air void content of the series aged at 200°C reaches 15,2%, a value greater than the originally designed air void content by a factor of 5. In the case of mixture containing the binder PMB HiMA 45/80-80, both the unaged series and series aged at 150°C show air void contents similar to the original design. Only the series aged at 200°C displays considerably greater value. Despite comparable air void contents of unaged series of both mixture types, mixture with HiMA aged at 200°C shows lower air void content than the aged mixture containing PMB 25/55-60.

RAP material with the PMB 25/55-60 bitumen displayed less resistance to aging, as its properties deteriorated even after conditioning at 150°C. However, after aging at 200°C this mixture retained structure that enabled better

Destrukt zawierający asfalt PMB 25/55-60 wykazał mniejszą odporność na starzenie, prezentując pogorszone właściwości już przy przechowywaniu w 150°C. Jednakże w przypadku starzenia w 200°C mieszanka zachowała strukturę bardziej podatną na obróbkę, podczas gdy mieszanka zawierająca asfalt HiMA uzyskała zwartą strukturę wymagającą mechanicznego rozdzielania. Mieszanka zawierająca HiMA wykazuje lepszą odporność na starzenie, co może być związane z pochłanianiem części maltenów podatnych na starzenie oraz ich ochroną przed ulatnianiem lub utlenianiem, jednak struktura uzyskiwana w wyniku „przepalenia” asfaltu jest istotnym negatywnym efektem występującym w wyniku degradacji asfaltu i sieci polimerowej.

3.3. ITS / ITR

Pomimo wzrastającej zawartości wolnych przestrzeni w mieszance zawierającej tradycyjny asfalt modyfikowany, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie nie zmieniła się znacząco pomiędzy serią niestarzoną oraz starzoną w 150°C, zarówno dla zestawu suchego, jak i mokrego po kondycjonowaniu (Rys. 6-7). Za wyjątkiem próbek starzonych w 200°C, zestaw mokry po kondycjonowaniu wykazuje znacznie większe odchylenia standardowe wyników mimo względnie niedużych zmian średnich wyników wytrzymałości pomiędzy etapami starzenia (dotyczy to obu mieszanek, zarówno zawierającej PMB, jak i HiMA). Starzenie miało jednak znaczący wpływ na odporność na działanie wody i mrozu – dla serii niestarzonej ITR wynosi niewiele ponad 80%, wykazując niewielki spadek w stosunku do wartości w recepturze przed eksploatacją, wynoszącej 86%, zaś po starzeniu w 150°C ITR spada do 68% (Rys. 8). W przypadku mieszanki zawierającej HiMA, wartość ITR bez kondycjonowania wyniosła ponad 90%, również wykazując niewielki spadek w porównaniu do receptury, gdzie deklarowana wartość ITR wynosiła 93%, natomiast seria starzona w 150°C osiąga wyniki nieznacznie poniżej tej wartości bez stosowania na niej odświeżaczy. Wytrzymałości próbek na rozciąganie pośrednie po kondycjonowaniu w 200°C są znacząco obniżone ze względu na „przepalenie” lepischer asfaltowego; tak zmieniony materiał nie nadaje się do zastosowania w warunkach rzeczywistych bez dodatkowej ingerencji.

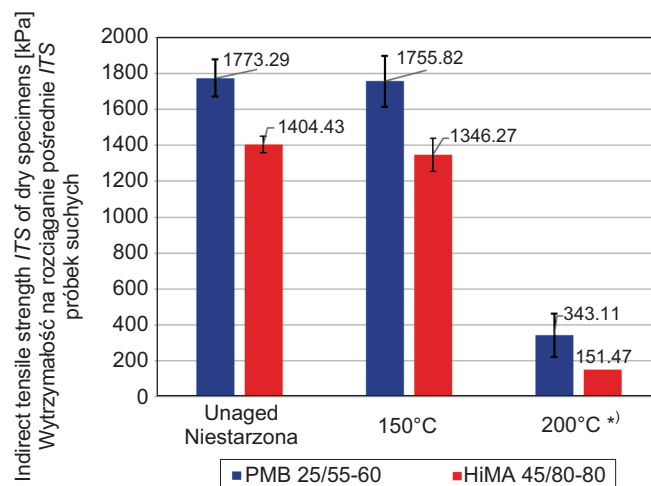
Fig. 6. Indirect tensile strength of dry specimens of mixtures containing PMB 25/55-60 and PMB 45/80-80 binders, with marked standard deviations (*) – result for HiMA 45/80-80 given for only one specimen)

Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek suchych mieszanek zawierających asfalt PMB 25/55-60 oraz PMB 45/80-80, z naniesionym odchyleniem standardowym (*) – wynik dla HiMA 45/80-80 podany dla jednej próbki)

processing and compaction, in contrast to the mixture with HiMA, which required mechanical separation. The mixture with HiMA displays better resistance to aging, which may be related to partial loss of aging-susceptible maltenes and their better protection from volatilization or oxidation; nevertheless, the structure resulting from bitumen “overburning” is a significant negative effect occurring due to degradation of bitumen and polymer structure.

3.3. ITS / ITR

Despite the growing air void content in the mixture with typical modified bitumen, indirect tensile strength did not change considerably between the unaged series and series aged at 150°C – this was true both for the dry and wet conditioned specimen sets (Figs 6 and 7). With the exception of specimens aged at 200°C, the wet set after conditioning displays much greater standard deviations of the results, despite the relatively low changes in mean values of strength between successive aging levels (this pertains to both mixtures, both with typical PMB and HiMA). However, aging did considerably affect the resistance to water and frost – ITR of the unaged series slightly exceeds 80%, which is only a small decrease from 86% noted for the designed mixture before service. However, after aging at 150°C, ITR decreases to 68% (Fig. 8). In the case of the mixture containing HiMA, ITR of the unaged series exceeded 90%, only a slight decrease in comparison to the designed mixture, whose declared ITR equaled 93%. However, the series aged at 150°C displays results that are only slightly lower, without the use of any rejuvenators. Indirect tensile strength values of specimens conditioned at 200°C are considerably decreased due to “overburning” of the binder; material changed in this manner is unfit for use in real conditions without additional intervention.



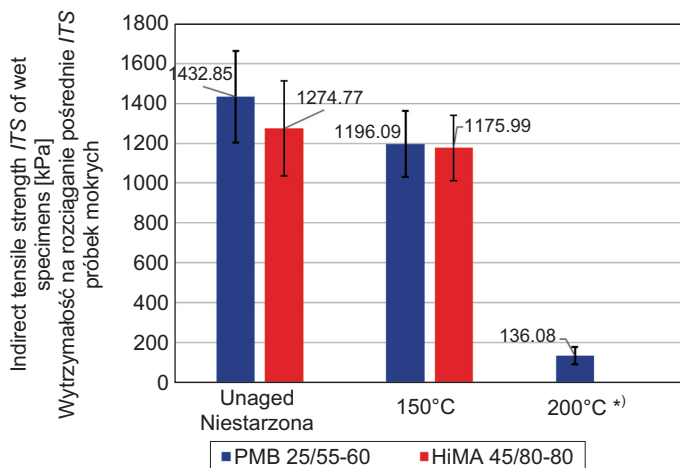


Fig. 7. Indirect tensile strength *ITS* of wet specimens of mixtures containing PMB 25/55-60 and PMB 45/80-80 binders, with marked standard deviations (*) – HiMA 45/80-80 aged at 200°C was excluded)

Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie *ITS* próbek mokrych mieszanek zawierających asfalt PMB 25/55-60 oraz PMB 45/80-80, z naniesionym odchyleniem standardowym (*) – wykluczono HiMA 45/80-80 starzone w 200°C)

Ze względu na małą dostępność destruktu zawierającego asfalt modyfikowany porównano otrzymane wyniki z innymi badaniami przeprowadzonymi na podobnych materiałach. W literaturze odnotowano mieszanki składające się w 70% z destruktu zawierającego asfalty modyfikowane, aczkolwiek bez poddania ich temperaturom zbliżonym do 200°C, oraz z wykorzystaniem środków odmładzających [30]. Niestety, ze względu na wrażliwość danych, autorzy nie zawsze podają wyraźne informacje na temat stopnia modyfikacji asfaltu obecnego w pobranym destrukcie. Jako że modyfikacja asfaltu polimerem SBS w ilości zbliżonej do 3% znacząco różni się od modyfikacji na poziomie 7%, niemożliwe jest bezpośrednie porównanie wyników badań bez tych informacji.

Możliwe jest porównanie zawartości wolnych przestrzeni oraz odporności na działanie wody i mrozu do wyników badań mieszanek zawierających 100% destruktu z asfaltem drogowym AC 22 P [39]. Przy takim uziarnieniu mieszanka mineralno-asfaltowa osiągnęła wartość odporności na działanie wody na średnim poziomie około 78%. Zawartość wolnej przestrzeni wyniosła bez użycia środka odmładzającego ponad 7%. Mieszanka stworzona z destruktu zawierającego asfalt wysokomodyfikowany przedstawiona w niniejszych badaniach wykazuje niższą zawartość wolnych przestrzeni, nieprzekraczającą 4,0%, z wykluczeniem mieszanki kondycjonowanej w 200°C. Oznacza to wiele lepszą zagęszczalność w porównaniu do destruktu zawierającego asfalt drogowy, jak również przydatność do ponownego wbudowania nawet bez użycia środków odmładzających, przy wartości *ITSR* sięgającej 90%.

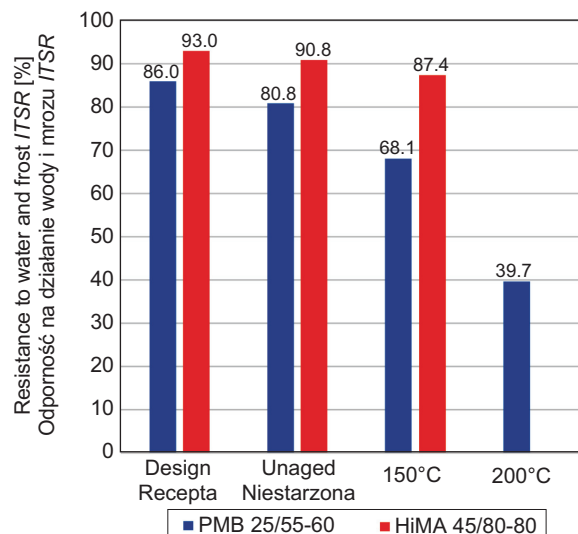


Fig. 8. Resistance to water and frost *ITSR* of mixtures containing PMB 25/55-60 and PMB 45/80-80 binders (excluding HiMA aged at 200°C)

Rys. 8. Odporność na działanie wody i mrozu *ITSR* mieszanek zawierających asfalt PMB 25/55-60 oraz PMB 45/80-80 (z wykluczeniem HiMA starzonego w 200°C)

Due to the very limited availability of RAP with modified bitumen, the obtained results were compared to the results of other studies performed on similar materials. The literature includes mentions of mixtures comprising 70% of RAP that contained modified binders; however, they were not subjected to temperatures reaching 200°C and rejuvenators were used [30]. Unfortunately, due to the sensitivity of the data, the authors do not always give precise information on the degree of modification of bitumen contained in the obtained RAP. Since SBS modification at the level of 3% differs significantly from modification at the level of 7%, it is impossible to directly compare test results without this information.

However, comparisons of air void content and water/frost resistance are possible in the case of tests performed on mixtures comprising 100% RAP with paving grade bitumen AC 22 P [39]. The asphalt mixture reached water resistance at the average level of approx. 78%. Without the use of rejuvenator, air void content exceeded 7%. The mixture obtained using RAP with highly modified bitumen, presented herein, displays lower air void content, not exceeding 4.0% (excluding the material aged at 200°C). This signifies not only better compactibility in comparison to RAP containing paving grade bitumen, but also suitability for placement even without rejuvenators, with *ITSR* values reaching 90%.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzony program badawczy miał na celu określenie wpływu starzenia krótkoterminowego na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wyprodukowanych ze 100% destruktu asfaltowego zawierającego asfalt modyfikowany i wysokomodyfikowany. Otrzymane wyniki pozwoliły na wyciągnięcie szeregu wniosków dotyczących wpływu temperatury procesów starzenia technologicznego na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej, a także różnic pomiędzy mieszankami zawierającymi tradycyjny asfalt modyfikowany PMB 25/55-60 oraz asfalt wysokomodyfikowany PMB 45/80-80:

- Możliwe jest wyprodukowanie mieszanek mineralno-asfaltowych z wykorzystaniem wysokich zawartości destruktu asfaltowego zawierającego zarówno asfalt modyfikowany, jak i wysokomodyfikowany.
- Proces rozbiórki warstwy asfaltowej prowadzi do zmiany składu ziarnowego destruktu w stosunku do pierwotnego składu ziarnowego mieszanki mineralno-asfaltowej. Następuje zmniejszenie udziału największych frakcji (w opisanych przypadkach 11/16) na rzecz drobniejszych frakcji. Możliwe jest zwiększenie udziału frakcji pylastej w składzie ziarnowym destruktu asfaltowego (po wykonaniu ekstrakcji lepiszcza).
- Proces wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej, a w szczególności temperatura produkcji, może mieć kluczowy wpływ na finalne właściwości mieszanki z destruktem asfaltowym. Temperatura w szczególności może mieć istotny wpływ na mieszankę w przypadku wykorzystania lepiszcza z wysoką zawartością polimerów.
- Technologiczne starzenie mieszanki mineralno-asfaltowej w temperaturze 150°C ma stosunkowo niewielki wpływ na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej (odporność na działanie wody, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, zawartość wolnej przestrzeni), w porównaniu do starzenia zachodzącego w temperaturze wynoszącej około 200°C.
- Imitowane w pracy badawczej starzenie technologiczne w temperaturze 200°C doprowadziło do redukcji wytrzymałości na rozciąganie pośrednie o około 80% w przypadku mieszanki wykonanej z destruktu zawierającego asfalt 25/55-60 oraz o blisko 90% w przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego.
- W przypadku przeprowadzonego starzenia technologicznego w temperaturze 150°C mieszanka z asfaltem wysokomodyfikowanym charakteryzowała się większą odpornością na zmiany właściwości w stosunku do mieszanki zawierającej tradycyjny asfalt modyfikowany.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The aim of the presented study was to determine the effect of short-term aging on the properties of asphalt mixtures containing typical polymer modified bitumen and highly modified bitumen. The obtained results enabled formulation of a number of conclusions regarding the influence of technological aging temperatures on the properties of asphalt mixtures as well as the differences between mixtures containing typical modified bitumen PMB 25/55-60 and highly modified bitumen PMB 45/80-80:

- It is possible to produce asphalt mixtures using high content of RAP material, both containing typical modified bitumen and highly modified bitumen.
- Milling of an asphalt course leads to a change in the particle size distribution of RAP in comparison to the particle size distribution of the original mixture. The share of coarser fractions decreases (in the presented case, 11/16), in favor of finer fractions. The proportion of silts in the particle size distribution of RAP may increase (after binder extraction).
- The asphalt mixture production process, and especially its temperature, may have key impact on the final properties of the mixture containing RAP. Temperature may prove particularly important when the binder is characterized by high polymer content.
- Technological (short-term) aging at the temperature of 150°C has a relatively low influence on the properties of the asphalt mixture (resistance to water, indirect tensile strength, air void content) in comparison to aging at the temperature around 200°C.
- Technological aging at the temperature of 200°C, which was imitated in the study, led to a relative reduction in indirect tensile strength by about 80% in the case of the mixture containing 25/55-60 bitumen and by nearly 90% in the case of the mixture containing highly modified bitumen.
- When technological aging occurred at 150°C, the mixture containing highly modified bitumen displayed greater resistance to changes in its properties than the mixture containing typical polymer modified bitumen.
- After aging at 200°C, RAP containing highly modified bitumen lost its workability and developed a hardened structure that was difficult to separate, rendering preparation of test specimens impossible. RAP with typical modified bitumen still enabled easy processing.

- Destrukt asfaltowy zawierający asfalt wysokomodyfikowany w temperaturze 200°C utracił urabialność, stając się zwartą, trudną do rozdzielenia strukturą, uniemożliwiającą wykonanie próbek do badań, podczas gdy asfalt modyfikowany pozostawał łatwy w obróbce.

Wykonane badania wskazują, że jest możliwe ponowne wykorzystanie materiału z rozbiórki nawierzchni asfaltowej zawierającej zarówno asfalt modyfikowany, jak i wysokomodyfikowany. Otrzymane wyniki sugerują, że asfalt wysokomodyfikowany jest bardziej odporny na zmiany związane z procesami starzeniowymi, pod warunkiem zachowania reżimu technologicznego i utrzymania względnie niskich temperatur produkcyjnych. Narażenie asfaltu wysokomodyfikowanego na temperatury sięgające 200°C może doprowadzić do całkowitej utraty urabialności mieszanki oraz niemożności wykorzystania tego materiału do asfaltowych warstw nawierzchni drogowej.

Przedstawione badania są jedynie badaniami wstępnymi, które pokazują konieczność prowadzenia dalszych rozważań nad wykorzystaniem destruktu asfaltowego zawierającego asfalt wysokomodyfikowany. Niezbędne jest połączenie badań prowadzonych na mieszankach mineralno-asfaltowych z badaniami samego lepiszcza w celu określenia wpływu zmian zachodzących w lepiszczu wysokomodyfikowanym i strukturze samego asfaltu na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych i nawierzchni drogowych. Wskazana jest kontynuacja badań z użyciem metod spektroskopowych i mikroskopowych celem rozpoznania mechanizmu zmian zachodzących w lepiszczu, jednakże obserwacja po przeprowadzeniu ekstrakcji i odzyskaniu asfaltu może wykazać mało wiarygodne wyniki ze względu na niszczący wpływ rozpuszczalnika na strukturę badanego materiału.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] European Asphalt Pavement Association: Asphalt in Figures 2021, eapa.org/asphalt-in-figures, 19.07.2023
- [2] *Ajanovic A., Dahl C., Schipper L.*: Modelling transport (energy) demand and policies – an introduction. *Energy Policy*, **41**, 2012, III-XIV, DOI: 10.1016/j.enpol.2011.12.033
- [3] *Gruber M.R., Hofko B.*: Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled asphalt pavement production. *Sustainability*, **15**, 5, 2023, ID article: 4629, DOI: 10.3390/SU15054629
- [4] Wymagania Techniczne WT-2 – część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014
- [5] *Wang D., Riccardi C., Jafari B., Cannone Falchetto A., Wistuba M.P.*: Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology. *Construction and Building Materials*, **312**, 2021, ID article: 125395, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125395
- [6] *Sabahfar N.*: Effect of fractionation of reclaimed asphalt pavement on properties of Superpave mixtures with reclaimed asphalt pavement. *advances in civil engineering materials*, **4**, 1, 2015, 47-60, DOI: 10.1520/ACEM20140036
- [7] *Abdel-Jaber M., Al-shamayleh R.A., Ibrahim R., Alkhrissat T., Alqatamin A.*: Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Results in Engineering*, **14**, 2022, ID article: 100463, DOI: 10.1016/J.RINENG.2022.100463
- [8] *Guo M., Liang M., Sreeram A., Bhasin A., Luo D.*: Characterisation of rejuvenation of various modified asphalt binders based on simplified chromatographic techniques. *International Journal of Pavement Engineering*, **12**, 23, 2021, 4333-4343, DOI: 10.1080/10298436.2021.1943743
- [9] *Behnood A.*: Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, **231**, 2019, 171-182, DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.209

The performed tests indicate that it is possible to reuse RAP material containing typical modified bitumen and highly modified bitumen. The obtained results indicate that highly modified bitumen is more resistant to changes caused by aging processes, provided that the technological parameters are strictly controlled and production temperatures remain relatively low. Exposure of highly modified bitumen to temperatures reaching 200°C may lead to complete loss of mixture workability and prevent reuse of the material in asphalt pavement courses.

The presented study encompassed preliminary tests that demonstrate the need for further analysis of usage of RAP with highly modified bitumen. It is necessary to combine testing of asphalt mixtures and testing of binders, in order to determine the effect of changes occurring in highly modified bitumen and its structure on asphalt mixture properties and pavement performance. It is advisable to continue the research using spectroscopy and microscopy, in order to identify the mechanism of changes occurring in the binder. However, observations performed after extraction and recovery of bitumen may provide unreliable results due to the damaging effect of solvents on the structure of the studied material.

- [10] *Corbett L.W.*: Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution-adsorption chromatography, and densimetric characterization. *Analytical Chemistry*, **41**, 4, 1969, 576-579, DOI: 10.1021/AC60273A004
- [11] *Wang Y., Wang W., Wang L.*: Understanding the relationships between rheology and chemistry of asphalt binders: a review. *Construction and Building Materials*, **329**, 2022, ID article: 127161, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127161
- [12] *Dai Z., Shen J., Shi P., Zhu H., Li X.*: Nano-sized morphology of asphalt components separated from weathered asphalt binders. *Construction and Building Materials*, **182**, 2018, 588-596, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.127
- [13] *Islam M.R., Hossain M.I., Tarefder R.A.*: A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test. *Construction and Building Materials*, **95**, 2015, 218-223, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.07.159
- [14] *Xia W., Xu T., Wang H., Pan Y.*: Combustion kinetics of asphalt binder components and the release processes of gaseous products. *Combustion and Flame*, **206**, 2019, 322-333, DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2019.05.009
- [15] *Lesueur D.*: The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, **145**, 1-2, 2009, 42-82, DOI: 10.1016/J.CIS.2008.08.011
- [16] *Rodriguez F., Cohen C., Ober C.K., Archer L.A.*: Principles of polymer systems, CRC Press, Boca Raton, 2015
- [17] *Gupta A., Lastra-Gonzalez P., Rodriguez-Hernandez J., González González M., Castro-Fresno D.*: Critical assessment of new polymer-modified bitumen for porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, **307**, 2021, ID article: 124957, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124957
- [18] *Camargo I.G.N., Hofko B., Mirwald J., Grothe H.*: Effect of thermal and oxidative aging on asphalt binders rheology and chemical composition. *Materials*, **13**, 19, 2020, 4438, DOI: 10.3390/MA13194438
- [19] *Aurilio M., Tavassoti P., Elwardany M., Baaj H.*: Impact of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) content on asphalt Binder's fatigue resistance at various aging levels using Viscoelastic Continuum Damage and fracture mechanics. *Construction and Building Materials*, **305**, 2021, 124627, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124627
- [20] *Zhang Q., Wang T., Fan W., Ying Y., Wu Y.*: Evaluation of the properties of bitumen modified by SBS copolymers with different styrene-butadiene structure. *Journal of Applied Polymer Science*, **131**, 12, 2014, ID article: 40398, DOI: 10.1002/APP.40398
- [21] *Wang Y., Yi H., Liang P., Chai C., Yan C., Zhou S.*: Investigation on preparation method of SBS-modified asphalt based on MSCR, LAS, and fluorescence microscopy. *Applied Sciences*, **12**, 14, 2022, ID article: 7304, DOI: 10.3390/APP12147304
- [22] *Petersen R.C.*: Reactive Secondary Sequence Oxidative Pathology Polymer Model and Antioxidant Tests. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, **2**, 4, 2012, 247-285, DOI: 10.9734/IRJPAC/2012/2104
- [23] *Romero-Sánchez M.D., Mercedes Pastor-Blas M., Martín-Martínez J.M., Walzak M.J.*: Addition of ozone in the UV radiation treatment of a synthetic styrene-butadiene-styrene (SBS) rubber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **25**, 4, 2005, 358-370, DOI: 10.1016/J.IJADHADH.2004.12.001
- [24] *Yu H., Yao D., Qian G., Cai J., Gong X., Cheng L.*: Effect of ultraviolet aging on dynamic mechanical properties of SBS modified asphalt mortar. *Construction and Building Materials*, **281**, 2021, ID article: 122328, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122328
- [25] *Wang H., Zhu Y., Zhang W., Shen S., Wu S., Mohammad L.N., She X.*: Effects of field aging on material properties and rutting performance of asphalt pavement. *Materials*, **16**, 1, 2023, 225, DOI: 10.3390/MA16010225
- [26] *Cháves-Pabón S.B., Rondón-Quintana H.A., Bastidas-Martínez J.G.*: Aging of asphalt binders and asphalt mixtures. Summary Part I: Effect on physical-chemical properties. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **10**, 12, 2019, 259-273
- [27] *Von Quintus H.L., Scherocman J.A., Hughes C.S., Kennedy T.W.*: Asphalt-aggregate mixture analysis system (AAMAS). NCHRP Report 338, Transportation Research Board, Washington, 1991
- [28] *Hugener M., Pittet M.*: Extraction and recovery of polymer modified bitumen, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, 2016
- [29] *Yan C., Huang W., Ma J., Xu J., Lv Q., Lin P.*: Characterizing the SBS polymer degradation within high content polymer modified asphalt using ATR-FTIR. *Construction and Building Materials*, **233**, 2020, ID article: 117708, DOI: 10.1016/j.conbuilmat.2019.117708
- [30] *Chen Z., Huang W., Wu K., Nie G., Zheng Y., Song J., Cai X., Wu J., Huang J.*: Performance degradation of styrene-butadiene-styrene modified asphalt binder at ultra-high temperature: Process of construction in fluid mastic asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, 2023, ID article: e02490, DOI: 10.1016/J.CSCM.2023.E02490
- [31] *Thakur S.C., Han J., Chong W.K., Parsons R.L.*: Laboratory evaluation of physical and mechanical properties of recycled asphalt pavement. in: Huang B., Tutumluer E., Al-Qadi I.L., Prozzi J., Shu X. (eds.): *Paving materials and pavement analysis*. American Society of Civil Engineers, 2010, 255-263, DOI: 10.1061/41104(377)31
- [32] *Bell C.A., Abwahab Y., Cristi M.E., Sosnovske D.*: Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures, Strategic Highway Research Program, Washington, 1994
- [33] PN-EN 12697-30:2019-01. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań. Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie

- [34] PN-EN 12697-8:2019-01. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni
- [35] PN-EN 12697-5:2019-01. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 5: Oznaczanie gęstości
- [36] PN-EN 12697-6:2020-07. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej
- [37] PN-EN 12697-12:2018-08. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań. Część 12: Określenie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych
- [38] PN-EN 12697-23:2017-12. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań. Część 23: Oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie
- [39] Sorociak W., Grzesik B., Bzówka J., Mieczkowski P.: Asphalt concrete produced from rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP). Archives of Civil Engineering, **66**, 2, 2020, 321-337, DOI: 10.24425/ACE.2020.131812