NAWIERZCHNIE ASFALTOWE

Nr 3(55)/2018

KWARTALNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA WYKONAWCÓW NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

ISSN 1734-1434

W CIĄGŁYM POGOTOWIU

Remonty stołecznych ulic

Utrzymanie nawierzchni asfaltowych redukujących hałas drogowy

Zalecenia utrzymaniowe dla mieszanek BBTM oraz z asfaltu porowatego

Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym – niezawodna technologia odnowy i utrzymania nawierzchni drogowych

Optymalny skład mieszanki z dodatkiem przetworzonego destruktu

NAWIERZCHNIE ASFALTOWE
Kwartalnik
Polskiego Stowarzyszenia
Wykonawców Nawierzchni Asfaltowych

ASPHALT PAVEMENTS
Quarterly of the Polish Asphalt
Pavements Association

Polskie Stowarzyszenie Wykonawców
Nawierzchni Asfaltowych
działa od 1999 r.

Celem PSWNA jest promowanie nawierzchni asfaltowych, rozwój technologii nawierzchni podatnych, a także transfer wiedzy i informacji w środowisku drogowym w Polsce. Stowarzyszenie zrzesza osoby prawne i fizyczne zainteresowane rozwojem nawierzchni asfaltowych w Polsce.

Wydawca
Polskie Stowarzyszenie Wykonawców
Nawierzchni Asfaltowych

Skład zarządu
Andrzej Wyszyński, prezes
Adam Wojczuk, wiceprezes
Tomasz Przeradzki, sekretarz
Ewelina Karp-Kręglicka, skarbnik
Dawid Żymełka, członek zarządu
Jacek Krzemiński, członek zarządu
Zbigniew Krupa, pełnomocnik zarządu

Redakcja
Anna Krawczyk, redaktor naczelna
Zbigniew Krupa, redaktor
Danuta Kropiewnicka – redakcja i korekta

DTP
Krzysztof Konarski – Inventivo.pl
Na okładce: Remont ulicy Jagiellońskiej w Warszawie
Zdjecie: Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie

Biuro zarządu, adres redakcji
Polskie Stowarzyszenie
Wykonawców Nawierzchni Asfaltowych
ul. Trojańska 7, 02-261 Warszawa
tel./fax: + 48 22 57 44 374
tel. + 48 22 57 44 352
e-mail: biuro@pswna.pl
www.pswna.pl

ISSN 1734-1434

Spis treści
Nawierzchnie Asfaltowe nr 3(55)/2018

4 **W ciągłym pogotowiu**
Rozmowa z **Arturem Rejznerem**, zastępcą dyrektora w warszawskim Zarządzie Dróg Miejskich

8 **Utrzymanie nawierzchni asfaltowych redukujących hałas drogowy**
Michał Sarnowski, Karol J. Kowalski, Jan Król

14 **Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym – niezawodna technologia odnowy i utrzymania nawierzchni drogowych**
Marek Iwański, Przemysław Buczyński, Grzegorz Mazurek

Misja Polskiego Stowarzyszenia Wykonawców Nawierzchni Asfaltowych:
„Efektywne wspieranie wszelkich działań służących rozwojowi branży drogownictwa w Polsce, a w szczególności propagowanie nowoczesnych technologii, racjonalizacja przepisów prawnych i wytycznych technicznych, działalność edukacyjna i informacyjna”.

Czasopismo wspierane finansowo przez:

LOTOS Asfalt

Pogotowie drogowe, które funkcjonuje w stolicy, przyjmuje miesięcznie ok. trzy tys. zgłoszeń. Nietrudno obliczyć, że w ciągu doby spływa ich 100. Przeważnie dotyczą one uszkodzonego oświetlenia czy sygnalizacji świetlnej, ale zdarzają się też zgłoszenia dotyczące niezadowalającego stanu dróg i ulic.

O tym, w jaki sposób efektywnie prowadzić remonty ulic w stolicy, a przy okazji nie paraliżować ruchu w mieście, rozmawiamy z Arturem Rejznerem, zastępcą dyrektora w Zarządzie Dróg Miejskich w Warszawie. Warto zauważyć, że ewenementem na skalę kraju są tutaj remonty weekendowe. Przed podjęciem decyzji o ich wykonaniu ZDM dokonuje wnikliwej oceny stanu danej drogi, a następnie na podstawie przeprowadzonych badań i ekspertyz określa zakres i technologię remontu.

Temat ten omawiamy nie tylko na łamach tego wydania, ale poświęcimy mu także sporo miejsca podczas jesiennego seminarium technicznego. Dobór technologii remontowych omówi na nim Maciej Maliszewski z Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, który na co dzień dokonuje przeglądów warszawskich ulic. Z kolei na temat samej realizacji wypowie się Maciej Adamczyk z firmy PORR, wykonującej większość remontów dróg stolicy. Natomiast wyniki ankiety dotyczącej obecnych realiów w zakresie zabiegów utrzymaniowych i remontowych w Polsce przedstawi prof. Adam Zofka. Będzie to wstępem do dyskusji o utrzymywaniu standardów.

Niezmiennie powracamy do tematu wykorzystania destruktu asfaltowego. Czynniki ograniczające udział granulatu asfaltowego w mieszankach mineralno-asfaltowych omówią dr inż. Jacek Alenowicz i dr inż. Piotr Jaskuła, naukowcy z Politechniki Gdańskiej.

Sympatykom recyklingu polecamy także kolejny artykuł tego wydania pt.: „Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym – niezawodna technologia odnowy i utrzymania nawierzchni drogowych" autorstwa m.in. prof. Marka Iwańskiego z Politechniki Świętokrzyskiej. Razem z dr. inż. Przemysławem Buczyńskim i dr. inż. Grzegorzem Mazurkiem pokusili się oni o opis technologii, dzięki której można przywrócić parametry eksploatacyjne remontowanej czy przebudowywanej drogi.

Zapraszam Państwa nie tylko do lektury, ale także oczywiście na nasze kolejne seminarium techniczne. Do zobaczenia!

Z życzeniami miłej lektury
Andrzej Wyszyński

Zdjęcie: PSWNA

www.pswna.pl

W ciągłym pogotowiu

– Do każdego zadania podchodzimy kompleksowo. Zależy nam na tym, aby mieszkańcy Warszawy byli zadowoleni z efektów naszej pracy. Nie chodzi przecież o to, by przy nowej nawierzchni jezdni pozostawić pofalowany jak fale Dunaju krawężnik czy chodnik, tylko żeby wymienić całą infrastrukturę – mówi **ARTUR REJZNER**, zastępca dyrektora Zarządu Dróg Miejskich w Warszawie, w rozmowie z Anną Krawczyk.

Panie dyrektorze, kiedy zaczyna Pan dzień pracy?
Tuż po świcie. Przed dojazdem do biura objeżdżam największe roboty realizowane w mieście przez Zarząd Dróg Miejskich.

Na czym polega kompleksowość remontów, o której Pan wspomniał?
Od trzech lat zmieniliśmy podejście. Wykonując remont nawierzchni jezdni, gdy sytuacja tego wymaga, wymieniamy krawężniki i opaski, a także chodniki. Również przy okazji budowy ścieżek rowerowych remontujemy chodniki. Chodzi o to, aby efekt pracy był zauważalny przez wszystkich użytkowników ruchu, ale też żeby nie trzeba było powracać do danej ulicy przez najbliższe lata.

Planując remont ulic, zapraszamy do rozmów także inne wydziały w Zarządzie, odpowiedzialne przykładowo czy to za oświetlenie, czy organizację ruchu. W tej chwili realizujemy kompleksowo remont ulicy Lindleya, łącznie z wymianą podbudowy, aby przywrócić nośność konstrukcji drogi.

Po uzgodnieniach wewnątrz ZDM zdecydowano się również na remont oświetlenia. W efekcie otrzymamy nową ulicę, która będzie miała wymienione wszystkie warstwy konstrukcyjne i pełną infrastrukturę, w tym nowe oświetlenie. Zmieniliśmy także geometrię drogi, poprawiając przy tym bezpieczeństwo jej użytkowników. Niestety, przy tego typu remontach mieszkańcy muszą się liczyć z dużą uciążliwością.

Dlatego ZDM realizuje weekendowe remonty nawierzchni, które są ewenementem w skali kraju?

Warszawa jest największym miastem Polski. Co dzień walczymy o każdą minutę, aby upłynnić ruch. Gdybyśmy wszystkie remontowane ulice wyłączali z ruchu na jeden, dwa lub trzy miesiące, jak Lindleya, moglibyśmy sobie pozwolić najwyżej na trzy takie inwestycje w roku. Tymczasem potrzeb jest o wiele więcej. Realizując weekendowe wymiany nawierzchni, uzyskujemy szybki i widoczny efekt, a co najważniejsze, na kolejne dziesięć lat mamy spokój z remontem danej jezdni.

W jaki sposób planowane są te remonty?

Wcześniej co roku wyłanialiśmy firmę, która dokonywała przeglądów rocznych. Efekty były różne, więc zdecydowaliśmy się na dłuższą współpracę z jednym podmiotem. W tej chwili przeglądy roczne, które kończą się pięcioletnim przeglądem ulic, realizuje dla nas konsorcjum Instytutu Badawczego Dróg i Mostów z dwoma firmami: Transcomp i Heller. Opracowaliśmy w tym celu specjalne schematy, w których określiliśmy, jak takie przeglądy mają się odbywać. Obejmują one nie tylko ocenę stanu technicznego dróg, ale także wskazanie technologii remontu.

Muszę przyznać, że ta współpraca układa się bardzo dobrze. Dodatkowo nie pozostajemy obojętni na wnioski i sugestie mieszkańców, którzy są na co dzień użytkownikami dróg. Tutaj też ważną rolę pełni nasz konserwator, czyli Zakład Remontów i Konserwacji Dróg, który nie tylko na bieżąco patroluje ulice, usuwając usterki, ale także zgłasza odcinki do remontu. To wszystko pozwala nam stworzyć listę ulic, które powinny zostać poddane remontowi w najbliższych latach.

Czy zawsze udaje się wyremontować to, co zaplanowano?

Przed każdym remontem wytypowanej do renowacji ulicy zgłaszamy ją do koordynacji. Następnie Biuro Koordynacji Inwestycji i Remontów sprawdza, czy taki remont może się odbyć. Przykładowo ulice będące w okolicach budowy metra włączone są w ciągi chronione stanowiące objazdy dla budowy. Na niektórych z nich nie można po prostu wykonywać żadnych planowych robót, aby nie spowodować zatorów komunikacyjnych. Dodatkowo każde zgłoszone zadanie Biuro Koordynacji konsultuje z gestorami infrastruktury (dostawcami gazu, prądu czy operatorami telekomunikacyjnymi). Dobrze, aby te prace były skoordynowane, ponieważ minimalizuje to ewentualne ryzyko konieczności naruszenia nowych nawierzchni drogowych. Po ocenie wszystkich tych aspektów Biuro Koordynacji wskazuje możliwy termin remontu.

Na jakiej podstawie wybierana jest technologia remontu?

W ostatnich latach bardzo często korzystamy z usług IBDiM, który dokonuje oceny stanu technicznego dróg, przeprowadzając w tym celu szereg badań diagnostycznych. Na tej podstawie wskazuje nie tylko technologie remontu, ale i zakres prac. Czasami wydaje się, że wystarczy tylko wymiana warstwy ścieralnej, a wyniki badań wskazują, że należy wymienić wszystkie warstwy asfaltowe i dodatkowo zastosować np. siatki wzmacniające oraz miejscami uzupełnić podbudowę.

Frezowanie na ulicy Jagiellońskiej

Remont na ulicy Powsińskiej

Jakie nawierzchnie stosowane są na ulicach Warszawy najczęściej?

Najczęściej stosujemy mieszankę mineralno-asfaltową SMA o drobnym uziarnieniu, aby obniżyć poziom hałasu, ale nie tylko. W tej chwili realizujemy także ulicę Miodową w standardzie z kamienia. W kolejnych latach chciałbym wyremontować w tej technologii przynajmniej jedną ulicę rocznie, np. Karową, Grodzką czy Nowy Zjazd, które znajdują się w obrębie Starego Miasta i stanowią wizytówkę stolicy.

Zakres robót na danej jezdni określa IBDiM oraz dodatkowo przygotowuje dla nas Szczegółową Specyfikację Techniczną, wskazując także rodzaj mieszanek. Natomiast recepty na nie przygotowuje wykonawca, a IBDiM je opiniuje. Później, podczas prowadzenia remontu wykonuje także badania składu mieszanek, a po zakończeniu dokonuje odwiertów w celu sprawdzenia np. sczepności międzywarstwowej i grubości warstw. Chcemy, aby wszystkie zastosowane materiały oraz wykonanie spełniały wymagania określone w specyfikacjach, co pozwoli nam uzyskać jak najdłuższy okres eksploatacji bez kolejnego remontu.

Jaki jest budżet roczny na prace remontowe warszawskiego ZDM?

W tym roku mamy już zakontraktowane roboty remontowe nawierzchni drogowych na ok. 90 mln zł. Oczywiście potrzeb jest o wiele więcej. Na samą wymianę nawierzchni jezdni z infrastrukturą towarzyszącą, czyli krawężnikami i opaskami, potrzebujemy rocznie ok. 150 mln zł. Dodatkowo 10 mln zł chciałbym rocznie przeznaczać na same chodniki. Trzeba również zauważyć, że ZDM realizuje także inne zadania, jak chociażby budowy i remonty oświetlenia i sygnalizacji świetlnych, oraz z powodzeniem rozbudowywuje siatkę dróg rowerowych, przy okazji których remontowane są chodniki. Mimo że robimy dużo, chcielibyśmy robić więcej, ale tutaj na przeszkodzie stoją głównie środki finansowe, które przyznawane są nam przez Radę Miasta.

Układanie nowej nawierzchni na ulicy Powsińskiej

Czy ZDM dąży do standaryzacji rozwiązań?

Podczas remontów dróg musimy kierować się standardami i wytycznymi, które obowiązują w Mieście nie tylko dla jezdni, ale także dla rowerzystów, pieszych czy osób z niepełnosprawnościami. Musimy godzić interesy wszystkich stron, co często jest bardzo trudne. Dążymy też wewnątrz firmy do standaryzacji rozwiązań i udogodnień. Takim przykładem może być chociażby wprowadzenie przed kilkoma laty rozwiązań dla przystanków autobusowych w postaci stosowania 16-centymetrowych, kamiennych krawężników systemowych, zaokrąglonych na dole. Dzięki temu, pomimo że krawężnik jest znacznie wyższy od standardowego, kierowca autobusu może łatwiej podjechać pod peron przystankowy, a zarówno pasażerowie wsiadający, jak i wysiadający mają ułatwione zadanie. Dodatkowo stosujemy płyty prowadzące dla osób z dysfunkcją wzroku. System ten umożliwia kierowanie osób niewidomych do drugich drzwi autobusu, które są najwygodniejsze do wsiadania dla osób z niepełnosprawnościami. Rozwiązania te się sprawdzają. Chwalą je nie tylko pasażerowie, ale i kierowcy, którym jest łatwiej podjechać na przystanek.

Remont ulicy Miodowej

Czy zauważa Pan podwyżki cen na robotach budowlanych?

O tak. Na początku roku mieliśmy do czynienia z istnym szaleństwem. Przygotowując swoje kosztorysy, nie byliśmy w stanie nadążyć za cenami rynkowymi, choć korzystamy z cen Sekocenbudu i, mówiąc kolokwialnie, nie dusimy kosztorysów, to nie nadążaliśmy za wzrostem cen, ponieważ w każdym miesiącu rosły one o 10 procent. Niektóre z przetargów musieliśmy odwołać, bo oferty były dwukrotnie droższe od naszych kosztorysów.

Co w takim wypadku?

Mamy wtedy dwa wyjścia. Zwiększyć budżet przewidziany na zadanie, oczywiście w granicach rozsądku, lub zlecić

pracę Zakładowi Remontów i Konserwacji Dróg. Przeważnie wybieramy to drugie rozwiązanie. Dzieje się tak najczęściej, gdy po dwukrotnym otwarciu ofert okazuje się, że oferta wykonawcy jest droższa od naszego kosztorysu o więcej niż 25 proc., przy założeniu, że Zakład ma możliwości realizacji dodatkowego zadania. Z niektórych zadań po prostu rezygnujemy, przesuwając je na kolejny rok w nadziei, że sytuacja się ustabilizuje, a w międzyczasie staramy się o dodatkowe środki.

Niestety problem dotyczy także dostępności materiałów. W tym roku bardzo trudno było pozyskać krawężniki kamienne czy płyty kamienne zgodne ze standardami dla danych stref, które obowiązują w Mieście. W takim przypadku musieliśmy występować o odstępstwa i stosować zamienniki w postaci płyt betonowych.

Ulica Augustówka z wymienioną nawierzchnią po frezowaniu

Efekty remontu na ulicy Wiertniczej

A co z chętnymi do wykonywania robót?

Warszawa będzie zawsze przeznaczać spore środki na remonty dróg, dlatego zauważamy coraz większe zainteresowanie wśród dużych firm wykonawczych. W zeszłym roku większość remontów ogłoszonych w przetargach wykonywała dla nas spółka PORR. W tym roku także wygrali sporo przetargów. Wiadomo, że im większa firma, tym większe i droższe zadania ją interesują. Staramy się więc rzucać na rynek przetargi na weekendowe naprawy nawierzchni nawet za 30 mln zł, co pozwala nam na planowanie kolejnych remontów. Każdego roku ok. 25 weekendowych frezowań wykonuje dla nas także Zakład Remontów i Konserwacji Dróg.

W jakim stopniu wykorzystywany jest destrukt asfaltowy?

Tutaj sprawa jest skomplikowana. Większość firm oferuje technologie z wykorzystaniem destruktu przerobionego na granulat na zimno. W takim przypadku dopuszczamy jego zastosowanie do 10 proc. do warstwy wiążącej. Oczywiście chcielibyśmy wykorzystywać go więcej, nawet do 20 proc., ale w tym przypadku wytwórnie mas bitumicznych musiałyby być wyposażone w specjalny dodatkowy bęben. Nie chcemy w tym trudnym okresie wprowadzać takich wymagań, aby nie zawężać i tak szczupłego rynku wykonawców.

Jakie zabiegi pomiędzy remontami stosujecie, żeby wydłużyć żywotność nawierzchni?

Hmm... To kolejne trudne pytanie. Zabiegi, o które Pani pyta, nigdy nie usatysfakcjonują w pełni mieszkańców Warszawy. Naprawy staramy się wykonywać jak najszybciej, w ramach bieżącego utrzymania nawierzchni przez konserwatora. Niestety ciągle posiadamy ulice z brakiem skutecznego odwodnienia. Część wykonana jest na trylince czy kostce brukowej. Przy tak dużym natężeniu ruchu trudno tam zrobić jakikolwiek skuteczny zabieg utrzymaniowy bez ingerencji w warstwy konstrukcyjne drogi. Musimy podejmować decyzje, których nie uzgadnia się zza biurka, ale też działać elastycznie, bo remontów i zadań jest dużo, a potrzeb jeszcze więcej. Działamy na podstawie analiz, przeglądów, koordynacji.

Remonty są odpowiedzią na zapotrzebowanie mieszkańców, bo to oni są najlepszymi i najszybszymi kontrolerami stanu technicznego ulic Warszawy.

W stolicy działa Pogotowie Drogowe. Ile zgłoszeń przyjmuje dziennie?

W skali miesiąca to blisko 3 tys. zgłoszeń, więc dziennie ok. 100. Dotyczą różnych spraw. Przede wszystkim mieszkańcy informują o uszkodzonym oświetleniu czy sygnalizacji świetlnej. Zdarzają się też często zgłoszenia dotyczące nawierzchni ulic, chodników czy dróg rowerowych, na które, w zależności od zgłoszenia, konserwatorzy mają określony czas na usunięcie usterki. Informacje przyjmowane są przez dyspozytorów w systemie całodobowym. W tej chwili mamy trzech dyspozytorów na pierwszej oraz po dwóch na drugiej i trzeciej zmianie, ale docelowo chcemy, aby zgłoszenia od mieszkańców dzwoniących na ogólnomiejski numer 19115 obsługiwało nawet sześciu dyspozytorów na pierwszej zmianie, co przyczyni się do szybszej obsługi zgłoszeń oraz lepszej kontroli w terenie.

Dziękuję za rozmowę. ■

Zdjęcia: Artur Weber, Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie

Summary:

Proper road maintenance is necessary in order to preserve durability of surface layers of asphalt pavements constructed with BBTM mixtures with higher air voids content and porous asphalt PA. It is also necessary to provide vehicle safety and long-term noise reduction. As a result of RID project, special maintenance provisions were proposed for asphalt pavements with BBTM and PA mixtures. In this paper, maintenance conditions for winter season and for non-freezing time are described, together with renovation conditions for quiet roads.

Utrzymanie nawierzchni asfaltowych redukujących hałas drogowy

Odpowiednio przeprowadzone zabiegi utrzymaniowe są niezbędne do zapewnienia trwałości eksploatacyjnej warstw ścieralnych o zwiększonej zawartości wolnej przestrzeni BBTM i warstw porowatych PA oraz bezpieczeństwa ruchu pojazdów na tego rodzaju nawierzchniach, przy jednoczesnym długotrwałym działaniu właściwości redukujących hałas. W wyniku realizacji projektu RID – „Rozwój Innowacji Drogowych" opracowano specjalne zalecenia utrzymaniowe dotyczące nawierzchni asfaltowych z mieszanek BBTM oraz z asfaltu porowatego. W artykule przedstawiono te zalecenia z uwzględnieniem utrzymania zimowego oraz utrzymania w okresie, w którym nie występują temperatury ujemne, a także scharakteryzowano zabiegi remontowe wykonywane na tego rodzaju nawierzchniach.

dr inż. Michał Sarnowski*; dr hab. inż. Karol J. Kowalski, prof. PW*; dr hab. inż. Jan Król*

– *Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Słowa kluczowe: utrzymanie, nawierzchnie asfaltowe, nawierzchnie redukujące hałas drogowy, mieszanka BBTM, asfalt porowaty

1. Wprowadzenie

Na świecie, również w Polsce, wzrasta w ostatnich latach zainteresowanie nawierzchniami drogowymi o zdolnościach redukujących hałas generowany na styku opony z nawierzchnią. Należy się spodziewać, że zapisy kontraktowe dotyczące konieczności zastosowania nawierzchni „cichych" staną się w niedalekiej przyszłości powszechne. W przypadku technologii asfaltowych istnieje szereg rozwiązań materiałowo-technologicznych, które pozwalają na redukcję hałasu drogowego o około 4–5 dB [1, 2, 3, 4, 5, 6].

W ramach zrealizowanego w 2018 r. projektu badawczego RID – „Rozwój Innowacji Drogowych" opracowano katalog klasyfikacyjny nawierzchni drogowych w odniesieniu do hałasu drogowego [7]. Katalog ten rozróżnia dwa rodzaje nawierzchni asfaltowych redukujących hałas: nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości typu BBTM oraz nawierzchnie ciche z asfaltu porowatego PA. Ponadto katalog ów uwzględnia zagadnienie trwałości, które w przypadku tego rodzaju nawierzchni powinno być rozpatrywane dwojako: trwałość techniczna zapewnia niezmienność właściwości mechanicznych nawierzchni, a trwałość akustyczna – niezmienność właściwości redukujących hałas, które mogą ulec pogorszeniu w czasie eksploatacji szybciej niż właściwości mechaniczne. Nawierzchnie charakteryzujące się właściwościami redukującymi hałas toczenia należą do grupy nawierzchni specjalnych i dlatego ich eksploatacja oraz utrzymanie powinny odbywać się według ściśle określonych zasad, które nie muszą się wiązać ze znaczącym wzrostem kosztów w porównaniu do nawierzchni standardowych.

Nawierzchnie te powinny jednak podlegać szczególnym zabiegom utrzyma-

Zdj. 1. Urządzenie do ciśnieniowego czyszczenia nawierzchni redukujących hałas: a) widok ogólny, b) zespół płucząco-ssący

niowym, zarówno w okresie zimowym, jak i wtedy, kiedy nie występują temperatury ujemne. Są to czynności dodatkowe w stosunku do tych potrzebnych w przypadku nawierzchni standardowych. W celu zapewnienia trwałości akustycznej i jednocześnie trwałości technicznej nawierzchni na Politechnice Warszawskiej opracowano specjalne zalecenia utrzymaniowe [8] na wzór Wymagań Technicznych WT-2 część II [9]. Powinny być one przestrzegane i stosowane przez zarządców dróg, a w szczególności – przez firmy zajmujące się utrzymaniem i naprawą nawierzchni redukujących hałas drogowy.

W artykule omówiono zalecenia utrzymaniowe warstw ścieralnych wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych BBTM i PA, ze szczególnym uwzględnieniem mieszanki BBTM 8, opracowanej według nowej koncepcji Politechniki Warszawskiej. Mieszkanka ta charakteryzuje się bardziej zamkniętą strukturą niż mieszanka BBTM według WT-2 [10].

2. Utrzymanie warstw BBTM i PA w okresie dodatnich temperatur

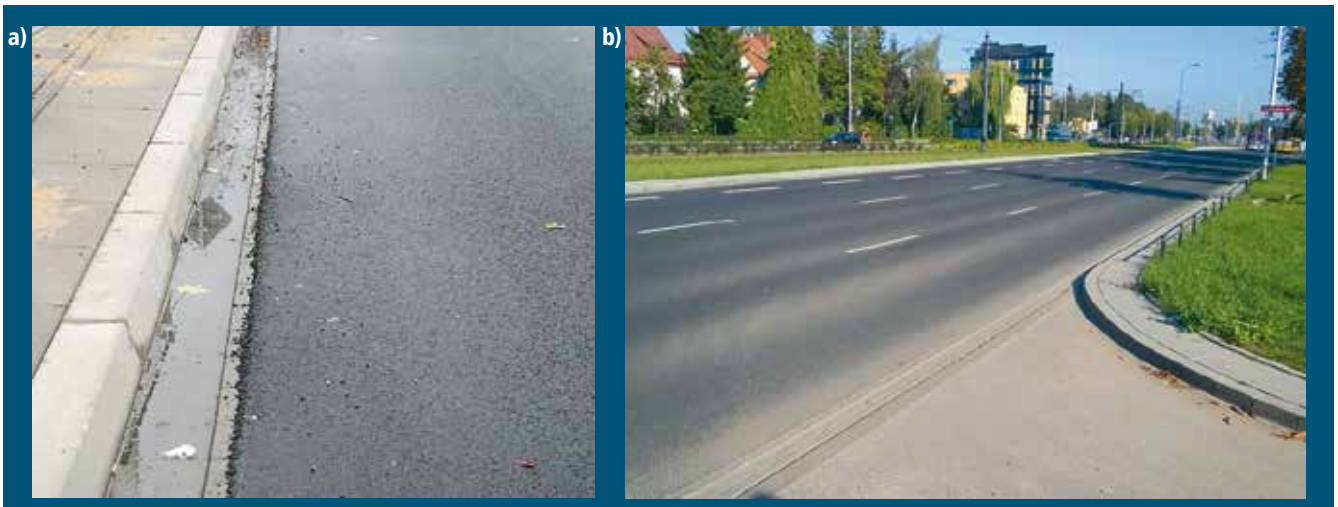
Utrzymanie nawierzchni o zwiększonej zawartości wolnej przestrzeni BBTM oraz nawierzchni porowatej PA w okresie, w którym nie występują temperatury ujemne, dotyczy przede wszystkim czyszczenia warstwy ścieralnej [11, 12].

Przy ruchu pojazdów o dużej prędkości (powyżej 70 km/h) i częstotliwości (drogi GP, S i A) może nastąpić częściowe samooczyszczenie porów w warstwie ścieralnej. Efektywność tego zjawiska zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem prędkości pojazdów. Konieczne jest regularne stosowanie zabiegów czyszczących przy użyciu specjalistycznego sprzętu [13]. Należy użyć pojazdów z urządzeniami płuczącymi pory nawierzchni pod ciśnieniem oraz ssącymi wypłukane części (zdj. 1).

Ciśnienie robocze powinno być dobierane do wieku i stanu nawierzchni. Aby zapobiec jej uszkodzeniom i wykruszaniu się ziaren kruszywa, ciśnienie wody nie może być zbyt wysokie. Widok prawidłowo oczyszczonej nawierzchni z asfaltu porowatego przedstawiono na zdj. 2.

Zaleca się oczyszczanie nawierzchni BBTM co najmniej raz w roku oraz doraźnie, po każdym znacznym jej zabrudzeniu ziemią, błotem itp. występującym na dużej powierzchni. Bezwzględnie

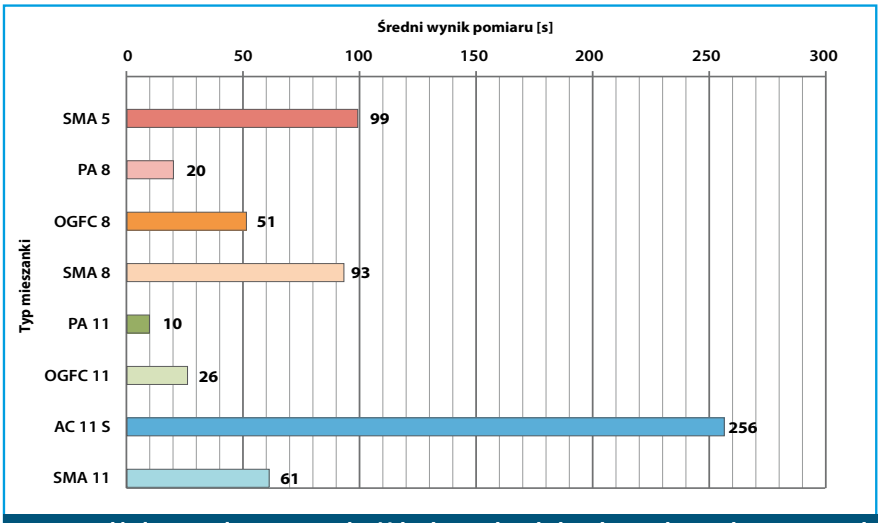
Zdj. 2. Warstwa PA zabrudzona (z lewej) i po czyszczeniu ciśnieniowym (z prawej strony)



Zdj. 3. Warstwa ścieralna z mieszanki BBTM 8B: a) prawidłowe odprowadzenie wody z powierzchni warstwy tuż po intensywnych opadach deszczu, b) zabrudzona nawierzchnia w rejonie wyjazdu z budowy

należy oczyszczać ją raz na dwa lata. W przypadku nawierzchni porowatej wykonanej z PA bezwzględnie trzeba oczyszczać ją co najmniej raz w roku oraz doraźnie, po każdym znacznym jej zabrudzeniu ziemią, błotem itp. występującym na dużej powierzchni.

Szczególną uwagę należy zwrócić na zapewnienie sprawnego odwodnienia powierzchniowego w obrębie cieków przykrawężnikowych (zdj. 3a), m.in. poprzez regularne usuwanie zanieczyszczeń liśćmi, błotem itp. W trakcie eksploatacji nawierzchni nie należy dopuszczać do ruchu pojazdów samochodowych z zabrudzonymi bieżnikami, m.in. pojazdów rolniczych i ciężarowych zabrudzonych błotem w wyniku np. prowadzenia prac ziemnych (zdj. 3b).



Źródło: badania własne

Rys. 1. Przykładowa wodoprzepuszczalność *in situ* nawierzchni z mieszanek o strukturze otwartej i zamkniętej [13]

Zdj. 4. Badanie wodoprzepuszczalności warstwy w warunkach *in situ*

Utrzymanie nawierzchni porowatej należy uznać za prawidłowe, jeżeli wynik badania wodoprzepuszczalności warstwy porowatej *in situ* (zdj. 4) określanej zgodnie z opracowaną na Politechnice Warszawskiej instrukcją [14], nie różni się o więcej niż 40% dla mieszanek BBTM i 20% dla mieszanek PA od wodoprzepuszczalności oznaczonej bezpośrednio po wykonaniu warstwy. Zaleca się wykonywanie oznaczenia wodoprzepuszczalności nawierzchni przynajmniej raz na dwa lata w przypadku nawierzchni z BBTM i przynajmniej raz w roku w przypadku nawierzchni z PA, w tym samym kwartale.

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wodoprzepuszczalności nawierzchni *in situ* dla różnych rodzajów nawierzchni wykonanych na odcinku doświadczalnym.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że nawierzchnia z asfaltu porowatego PA 11 charakteryzuje się najlepszą wodoprzepuszczalnością spośród wszystkich badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Dwa razy dłużej,

tzn. 20 sekund, trwało odprowadzenie wody z nawierzchni PA 8. Odcinek referencyjny, wykonany z mieszanki SMA 11, uzyskał wodoprzepuszczalność nawierzchni równą 61 sekund, a drugi odcinek referencyjny, wykonany z betonu asfaltowego AC 11S, charakteryzował się najsłabszą wodoprzepuszczalnością nawierzchni – 256 sekund [13]. Należy zaznaczyć, że w przypadku mieszanek szczelnych, takich jak beton asfaltowy, wypływ wody podczas pomiaru związany jest z makroteksturą nawierzchni, a nie z rzeczywistą wodoprzepuszczalnością warstwy. Pod względem wodoprzepuszczalności nawierzchnie można klasyfikować zgodnie z kryteriami podanymi w tabeli 1.

Wynik badania wodoprzepuszczalności wykonanego w terenie (metoda Tex 246-F / PW)	Właściwości drenażowe
< 40 s	DOBRE
40–80 s	ŚREDNIE
> 80 s	SŁABE

Tab. 1. Klasyfikacja nawierzchni drogowych pod względem właściwości drenażowych [15]

3. Utrzymanie zimowe warstw BBTM i PA

Utrzymanie w okresie zimowym nawierzchni o obniżonej hałaśliwości ze zwiększoną zawartością wolnej przestrzeni (BBTM) oraz nawierzchni porowatych, cichych (PA), służy głównie zapewnieniu bezpieczeństwa użytkowników przez zapobieganie powstania śliskości zimowej na skutek gołoledzi i opadów śniegu.

Utrzymanie zimowe wymaga szczególnej staranności i należytej uwagi, ponieważ cechą charakterystyczną nawierzchni o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni oraz nawierzchni porowatych jest ich mniejsza bezwładność termiczna. W porównaniu z nawierzchniami standardowymi nawierzchnie tego rodzaju szybciej się ochładzają.

W zakresie zimowego utrzymania dróg kompleksowym dokumentem są Wytyczne zimowego utrzymania dróg (ZUD) [16]. Dodatkowe zalecenia w zakresie zimowego utrzymania w odniesieniu do warstwy ścieralnej nawierzchni o obniżonej hałaśliwości ze zwiększoną zawartością wolnej przestrzeni (BBTM) oraz nawierzchni cichych (PA) przedstawiono poniżej [2, 8]:

1. Zarządca drogi powinien wyraźnie zidentyfikować na swoim obszarze odcinki dróg o nawierzchni z warstwą ścieralną wykonaną w technologii BBTM lub PA.
2. Osoby zarządzające utrzymaniem zimowym oraz wykonujący zabiegi pracownicy powinni być przeszkoleni w zakresie prac na takich nawierzchniach.
3. Przed rozpoczęciem sezonu zimowego stan nawierzchni powinien zostać oceniony pod względem stanu zanieczyszczenia i sprawności systemów odwadniających. W przypadku stwierdzenia zanieczyszczenia nawierzchni należy ją poddać zabiegom czyszczącym.
4. Do odśnieżania nawierzchni nie należy stosować pługów ze stalowym lemieszem. Wymagane jest stosowanie pługów z lemieszem z gumy lub z tworzywa sztucznego. Technika odśnieżania powinna być stosowana zgodnie z ogólnymi zasadami [16]. Likwidowanie świeżego opadu śniegu przeprowadza się tylko mechanicznie, a pozostałości po przejściach pługów należy usuwać za pomocą materiałów chemicznych (NaCl, NaCl + $CaCl_2$). W przypadku opadu o dużej intensywności, kiedy grubość warstwy spadłego śniegu przekroczy 5 cm, odśnieżanie trzeba powtórzyć. W wyjątkowym przypadku, przy stosowaniu pługów z lemieszem stalowym, lemiesz należy unieść na wysokość kilku centymetrów powyżej drogi.
5. Do usuwania i zapobiegania śliskości nawierzchni należy stosować wyłącznie środki chemiczne. Niedopuszczalne jest używanie środków mogących zanieczyścić pory, np. piasku. Stosować należy przede wszystkim sól suchą, jako zabieg prewencyjny, przed wystąpieniem opadu śniegu w celu ograniczenia zatykania porów nawierzchni i przymarzania śniegu.
6. Rozsypywanie kruszywa powinno być zakończone w odległości 70–100 m od odcinka z nawierzchnią o obniżonej hałaśliwości BBTM lub nawierzchni cichej PA.
7. W celu zapobiegania powstawaniu gołoledzi środki chemiczne należy zastosować:
   - w przypadku nawierzchni z BBTM – gdy temperatura nawierzchni jest ujemna, temperatura powietrza wynosi od -6°C do +1°C, a względna wilgotność powietrza osiągnęła 85% i nadal wzrasta,
   - w przypadku nawierzchni z PA działania zapobiegawcze zaleca się rozpocząć, gdy temperatura nawierzchni wynosi 0°C, temperatura powietrza – od -6°C do +1°C, a względna wilgotność powietrza osiągnęła 85% i nadal wzrasta; zalecenie to jest nieco bardziej restrykcyjne niż w przypadku zalecenia według Wytycznych ZUD [16], jednak uwzględnia szybsze wychładzanie się nawierzchni o strukturze otwartej (porowatej).
8. W celu zapobiegania powstawaniu lodowicy należy rozpocząć działania, gdy temperatura powietrza, obniżając się, spadła do +1°C, a na nawierzchni zalega warstewka wody (głównie BBTM) lub mokrego śniegu albo nawierzchnia jest wilgotna. Po mechanicznym oczyszczeniu nawierzchni z topniejącego śniegu lub wody należy zastosować środki chemiczne.

Przy standardowych warunkach pogodowych (do -10°C) używanie soli suchej lub zwilżonej w ilości 10–20 g/m^2 (w przypadku nawierzchni z BBTM) lub 20–30 g/m^2 (w przypadku nawierzchni z PA) jest

zabiegiem wystarczającym. W przypadku niższych temperatur oraz silnych opadów śniegu można stosować mocniejsze środki (np. mieszaninę NaCl z $CaCl_2$) w ilości 20–30 g/m^2 na nawierzchni z BBTM lub 25–40 g/m^2 – na nawierzchni z PA. Zużycie środków odladzających może być większe o około 20% (BBTM) do 30% (PA) niż w przypadku konwencjonalnych nawierzchni. Dodatkowe informacje dotyczące zimowego utrzymania nawierzchni porowatych w polskich warunkach klimatycznych, w tym szczegółowe zużycia jednostkowe środków chemicznych, zostały przedstawione przez dr. inż. W. Bańkowskiego w numerze 1–2 (2018) „Nawierzchni Asfaltowych" [2].

4. Inne zabiegi utrzymaniowe

Należy zwrócić szczególną uwagę, aby przy wykonywaniu prac konserwacyjnych nie zabrudzić nawierzchni.

W przypadku rozlania się na nawierzchnię cieczy destrukcyjnie na nią działających (np. benzyny) oraz zwiększających ryzyko powstania wypadku drogowego (jak choćby olej silnikowy) występuje konieczność natychmiastowej interwencji i użycia specjalistycznego sprzętu. Nie należy jednak stosować absorbentów olejowych w formie proszkowej ani płynnych absorbentów olejowych. Bezpośrednio po wystąpieniu zanieczyszczenia trzeba przeprowadzić prace oczyszczające jezdnię.

Właściwe służby policyjne, straż pożarna oraz pozostałe podmioty pomocnicze, np. służby techniczne, powinny być uprzednio poinformowane o specyfice nawierzchni ze zwiększoną zawartością wolnej przestrzeni w warstwie ścieralnej (BBTM) lub nawierzchni porowatej (PA).

Padlina zwierzęca powinna zostać usunięta możliwie jak najszybciej, ponieważ substancje organiczne mogą destrukcyjnie oddziaływać na mieszankę mineralno-asfaltową.

Drobne części metalowe, pozostałe po naprawach barierek ochronnych lub wypadku, należy usunąć przed udostępnieniem jezdni do ruchu.

Przy zastosowaniu pojazdów specjalnych, np. ciężkich zestawów niskopodwoziowych lub żurawi samojezdnych, a zwłaszcza ich postoju na jezdni, należy w miejscach ich podparcia podłożyć – dla ochrony nawierzchni przed uszkodzeniem – płyty stalowe albo drewniane. Nie wolno dopuścić do ruchu pojazdów gąsienicowych na nawierzchni.

5. Remonty cząstkowe

Przy planowaniu działań naprawczych i odnawiających koniecznie należy przestrzegać wymogów ze względu na długoterminowe obniżenie hałasu drogowego. Przed przystąpieniem do prac konserwacyjnych trzeba sprawdzić wielkość i rodzaj danego uszkodzenia i usunąć je jak najszybciej.

Przykładami remontu cząstkowego są: naprawa wybojów czy obłamanych krawędzi, uszczelnienie pęknięć i naprawa złuszczeń (np. ubytków kruszywa). Naprawa może być wykonana w technologii na zimno lub na gorąco. Zastosowanie do niej mieszanki na zimno dopuszcza się tylko jako rozwiązanie tymczasowe w wyjątkowych sytuacjach. Do naprawy na zimno stosuje się gotową, konfekcjonowaną mieszankę mineralno-emulsyjną lub mieszankę mineralną z asfaltem upłynnionym. Stosowanie tradycyjnego sposobu na zimno poprzez zastosowanie skropienia emulsją asfaltową i posypanie grysem (zastosowanie remonterów) jest zabronione.

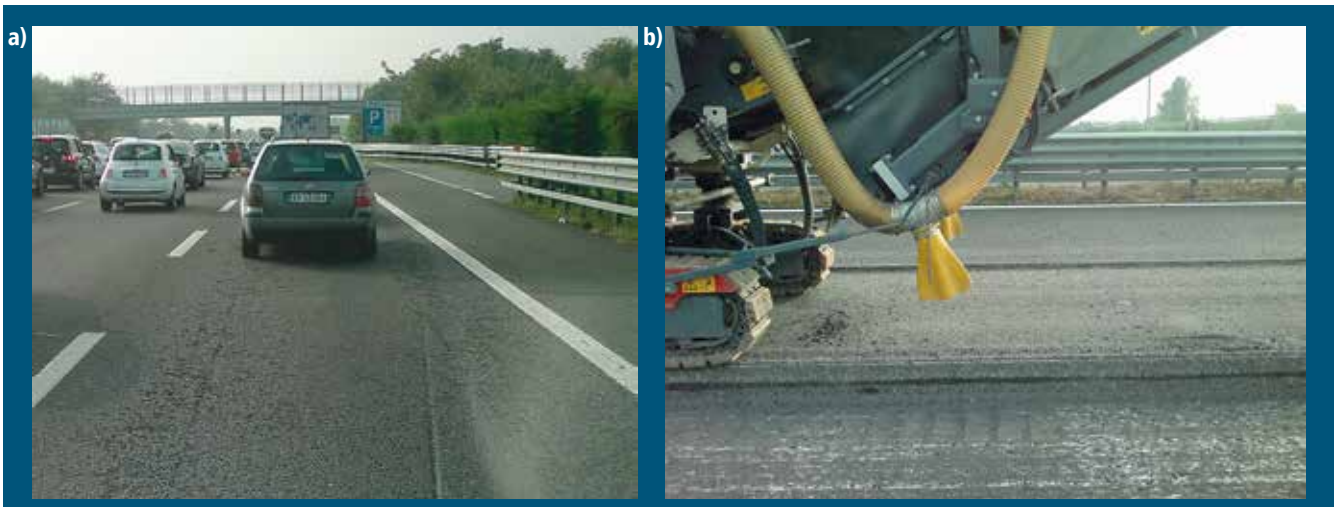
W technologii na gorąco ubytki i wyboje oraz obłamania krawędzi jezdni powinny być naprawiane mieszankami mineralno-asfaltowymi z lepiszczami modyfikowanymi o poprawionych właściwościach lepkosprężystych (zaleca się taki sam rodzaj lepiszcza jak w naprawianej nawierzchni). Wyjątkowo, przy naprawie zniszczeń o małych powierzchniach (do 0,5 m^2, pojedyncze ubytki i wyboje) może być użyty asfalt lany. W innych przypadkach należy stosować mieszanki mineralno-asfaltowe zagęszczalne, takie jak BBTM i SMA (w przypadku naprawianych warstw BBTM), i zagęszczalne mieszanki porowate – PA (w przypadku naprawianych warstw z asfaltu porowatego).

Zabrania się naprawiania zniszczeń powierzchniowych metodą powierzchniowego utrwalenia lub metodą cienkich warstw na zimno, jak np. *slurry seal*. W przypadku naprawy zniszczeń powierzchniowych nawierzchni z BBTM na całej szerokości pasa należy zastosować technologię cienkiej warstwy ścieralnej na gorąco z mieszanki BBTM 8 z lepiszczem modyfikowanym (zalecane jest lepiszcze gumowo-asfaltowe). Najlepszy sposób naprawy warstw porowatych to naprawa zniszczeń na całej szerokości pasa (zdj. 5). Można zastosować frezowanie na głębokość układanej warstwy, jednak nie niżej niż warstwa uszczelniająca. W przypadku frezowania niższych warstw należy odtworzyć warstwy konstrukcyjne łącznie z warstwą uszczelniającą. Alternatywną metodą, jeżeli niweleta na to pozwala, jest zastosowanie nakładki z mieszanki asfaltu porowatego PA 8 lub technologii cienkiej warstwy ścieralnej na gorąco z mieszanki BBTM 8 z lepiszczem modyfikowanym. Po zastosowaniu nakładki z BBTM 8 nastąpi jednak utrata właściwości drenażowych warstwy porowatej przy częściowym zachowaniu zdolności do redukcji hałasu drogowego. W przypadku wymiany warstwy ścieralnej porowatej poprzez frezowanie lub użycie nakładki asfaltowej porowatej nie należy stosować uszczelnienia krawędzi w postaci taśm topliwych ani spryskiwać ich emulsją asfaltową. Frezowane krawędzie trzeba odpylić i oczyścić wodą pod ciśnieniem, a następnie pozostawić do wyschnięcia.

Proponowane technologie napraw i remontów cząstkowych nawierzchni redukujących hałas drogowy ze zwiększoną zawartością wolnej przestrzeni w warstwie ścieralnej (BBTM) i nawierzchni porowatych (PA) powinny być realizowane zgodnie z zasadami podanymi w Katalogu przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych [17].

6. Podsumowanie

Nawierzchnie charakteryzujące się właściwościami redukującymi hałas toczenia należą do grupy nawierzchni specjalnych i dlatego ich eksploatacja oraz utrzymanie powinny odbywać się według ściśle określonych zasad. Bezwzględne ich przestrzeganie zapewni nie tylko trwałość eksploatacyjną w postaci niezmiennych



Zdj. 5. Frezowanie poszczególnych pasów ruchu z asfaltu porowatego w warunkach autostradowych (autostrada A4 Turyn–Triest, Włochy): a) widoczne zniszczenia powierzchniowe jednego pasa ruchu, b) selektywne frezowanie warstwy porowatej

właściwości mechanicznych nawierzchni, lecz także ich trwałość akustyczną.

Opracowane w ramach projektu RID zalecenia utrzymaniowe mogą przyczynić się do poprawy trwałości warstw ścieralnych wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych o zwiększonej zawartości wolnej przestrzeni BBTM oraz warstw porowatych PA. W przypadku nawierzchni o poprawionych właściwościach w zakresie tłumienia hałasu drogowego jest to szczególnie ważne ze względu na bezpieczeństwo ruchu pojazdów, ekologię oraz koszty społeczne.

Mieszanki mineralno-asfaltowe o zwiększonej zawartości wolnej przestrzeni BBTM, opracowane według nowej koncepcji Politechniki Warszawskiej, wymagają nieco mniej rygorystycznych zasad utrzymania niż nawierzchnie z asfaltu porowatego PA. Z tego względu mogą być alternatywą dla mieszanek o strukturze otwartej. Stanowi to ważny argument sprzyjający rozwojowi technologii nawierzchni redukujących hałas drogowy w wymagających warunkach klimatu środkowoeuropejskiego.

Podziękowanie

Artykuł opracowano w ramach grantu GDDKiA i Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – Rozwój Innowacji Drogowych (DZP/RID-I-76/15/NCBR/2016) pt. „Ochrona przed hałasem drogowym". ■

Literatura

[1] Bańkowski W., *Ciche nawierzchnie drogowe na świecie*, „Materiały Budowlane", vol. 11, 2011, s. 51–53.

[2] Bańkowski W., *Studia nad zasadami zimowego utrzymania nawierzchni porowatych w polskich warunkach klimatycznych*, „Nawierzchnie Asfaltowe" nr 1–2 (53–54), 2018, s. 4–13.

[3] Gardziejczyk W., *„Cicha" nawierzchnia drogowa jako sposób na ograniczenie hałasu od ruchu samochodowego*, „Inżynieria Ekologiczna", 40, 2014, s. 65–73.

[4] Kowalski K. J., Bańkowski W., Król J. B., Gajewski M., Horodecka R., Świeżewski P., *Selection of quiet pavement technology for Polish climate conditions on the example of CiDRO project*, Transportation Research Procedia, vol. 14, 2016, pp. 2724–2733, Proceedings of 6th Transport Research Arena, April 18–21, 2016, Warsaw, Poland.

[5] Piłat J., Radziszewski P., *Nawierzchnie asfaltowe*, WKiŁ 2010.

[6] Ranieri V., Kowalski K., Berloco N., Colonna P., & Perrone P., *Influence of wax additives on the properties of porous asphalts*, „Construction and Building Materials", (145), 261–271. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.181.

[7] Katalog klasyfikacyjny nawierzchni drogowych w odniesieniu do hałasu drogowego. Projekt RID – I/76 Ochrona przed hałasem drogowym, 2018.

[8] RID-76-Zad2-Załącznik 2: Wymagania techniczne w zakresie eksploatacji nawierzchni drogowej w celu utrzymania poziomu hałaśliwości. Projekt RID – I/76 Ochrona przed hałasem drogowym, 2018.

[9] WT-2 2016: Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych – część II Wykonanie warstw nawierzchni asfaltowych – Wymagania Techniczne, Warszawa 2016 (załącznik do zarządzenia Nr 7 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 09.05.2016 r.).

[10] WT-2 2014: Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych – część I Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania Techniczne, Warszawa 2014 (załącznik do zarządzenia Nr 54 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 18 listopada 2014 r.).

[11] Bendtsen H., Gspan K., *Technical Report 2017-01 State of the art. In managing road traffic noise: noise-reducing pavements*, Conference of European Directors of Roads, January, 2017, ISBN: 979-10-93321-27-1.

[12] Pratico F. G., Swanlund M., George L. A., Anfosso F., Tremblay G., Tellez R., Kamiya K., Cerro J., *Quiet pavement technologies*, World Road Association (PIARC), France, 2013, ISBN: 979-10-93321-27-1.

[13] Kowalski K. J. i inni, *Innowacyjna technologia nawierzchni drogowych o obniżonej emisji hałasu*, Mostostal Warszawa S.A., Warszawa 2015.

[14] Instrukcja badania wodoprzepuszczalności nawierzchni in-situ. RID-76-Zad2-Załącznik 2: Wymagania techniczne w zakresie eksploatacji nawierzchni drogowej w celu utrzymania poziomu hałaśliwości. Projekt RID – I/76 Ochrona przed hałasem drogowym, 2018.

[15] Król J., *Wodoprzepuszczalność nawierzchni porowatych – badania laboratoryjne i polowe*, Seminarium techniczne eSeMA 2014, Zakopane 5–7 lutego 2014.

[16] Wytyczne zimowego utrzymania dróg. Zarządzenie nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, z dnia 5 września 2017 roku.

[17] Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM i GDDKiA, Warszawa 2013.

Zdjęcia: J. Król, M. Sarnowski

Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym – niezawodna technologia odnowy i utrzymania nawierzchni drogowych

Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym czy też z emulsją asfaltową często wykorzystywany jest w projektach wykonawczych jako technologia, dzięki której przywrócone zostaną parametry eksploatacyjne remontowanej/przebudowywanej drogi. Dlatego też w artykule poświęcono szczególną uwagę ocenie wpływu ilości i rodzaju destruktu na właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym. Przedstawiono szczegółową charakterystykę technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań wpływu ilości i rodzaju destruktu, tj. destruktu asfaltowego (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*), destruktu betonowego (RC – *Reclaimed Concrete*) oraz kruszywa naturalnego z recyklingu (RA – *Reclaimed Aggregate*), jako głównego składnika recyklowanej podbudowy. Ze względu na zmienną grubość recyklowanych warstw, jakie występują w warunkach rzeczywistych, w badaniach zasymulowano dozowanie do recyklowanej podbudowy MCAS destruktów w ilości od 20% do 80% z krokiem co 20%. Uzyskane rezultaty badań wykazały zależności w zakresie zmiany udziału procentowego i rodzaju destruktu w stosunku do właściwości recyklowanej podbudowy MCAS.

prof. dr hab. inż. Marek Iwański*, dr inż. Przemysław Buczyński*, dr inż. Grzegorz Mazurek*
***Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce**

1. Wstęp

Główną ideą technologii recyklingu głębokiego na zimno jest maksymalne wykorzystanie materiału ze zniszczonych warstw konstrukcji nawierzchni drogowej [1–4]. Większość remontów, w których wykorzystuje się technologię recyklingu głębokiego na zimno, dotyczy dróg o konstrukcji podatnej i półsztywnej [3–5]. Ilość materiału odpadowego w postaci: destruktu asfaltowego (RAP), destruktu z betonu cementowego (RC) oraz destruktu z kruszywa (RA) w składzie recyklowanej podbudowy uzależniona jest od grubości warstw konstrukcyjnych. Najczęściej stosowana ilość destruktu asfaltowego w składzie recyklowanej mieszanki kształtuje się w przedziale od 20% do 70%. Ilość destruktu asfaltowego równą 20% zastosowali w swoich badaniach Niazi i Jalili [6], oceniając wpływ cementu portlandzkiego oraz wapna hydratyzowanego na właściwości mieszanki mineralno-spoiwowej z asfaltem spienionym. Chomicz-Kowalska [1], dokonując oceny metod zagęszczania, zastosowała 50% destruktu asfaltowego w składzie mieszanki mineralnej. Natomiast wpływ ilości destruktu asfaltowego (0%, 50% oraz 70%) w składzie recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym na zmianę modułu zespolonego przedstawili w swojej pracy Godenzoni et al. [7], a jako kruszywo doziarniające zastosowali materiał mineralny pochodzenia wapiennego o uziarnieniu 0/5 mm, 5/10 mm oraz 10/14 mm.

Jednakże należy pamiętać, że uwarunkowania lokalne, tj. układ istniejących warstw konstrukcyjnych, determinują udział procentowy poszczególnych składników w mieszance recyklowanej podbudowy. W związku z tym w składzie recyklowanej podbudowy mogą występować: mieszanki związane w postaci warstw ulepszonego podłoża [8] czy też betonu cementowego [9], mieszanki niezwiązane oraz warstwy z mieszanek mineralno-asfaltowych [5, 10]. W przypadku niewłaściwego uziarnienia mieszanki mineralnej z istniejących warstw wymagane jest wprowadzenie kruszywa doziarniającego. Zastosowanie nowego składnika przekłada się na wzrost kosztów wykonania podbudowy recyklowanej, wskutek czego korzystniej jest zwiększyć nakłady finansowe na sprzęt i doprowadzić, poprzez rozdrabnianie, istniejące warstwy do wymaga-

nego uziarnienia. Takie podejście daje możliwość wykorzystania w maksymalnym stopniu materiałów z istniejących warstw konstrukcyjnych w składzie recyklowanej podbudowy. Dlatego też może dojść do sytuacji, kiedy w składzie recyklowanej podbudowy będzie występował w przewadze destrukt asfaltowy z niewielką ilością nowego kruszywa doziarniającego.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że w przypadku, kiedy całkowita grubość warstw asfaltowych przeznaczonych do recyklingu będzie równa 20 cm, a docelowa grubość podbudowy recyklowanej MCE/MCAS będzie równa 20 cm, to destrukt asfaltowy będzie stanowił 100% składu mieszanki. Wprowadzenie frezowania profilującego i usunięcie 3–4 cm istniejących warstw asfaltowych nie wpłynie w znaczący sposób na ilość RAP w składzie mieszanki – będzie ona nadal na wysokim poziomie i będzie wynosiła 80%.

W związku z powyższym niezbędne wydaje się kompleksowe określenie wpływu materiałów odpadowych i z recyklingu na właściwości mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym (MCAS).

Materiały odpadowe i z recyklingu zastosowane w składzie mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym obejmowały typowe materiały powstające w ramach przebudów i remontów nawierzchni drogowej, do których zalicza się:

- destrukt asfaltowy (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*),
- destrukt z betonu cementowego (RC – *Recycled Concrete*),
- kruszywo z recyklingu (RA – *Recycled Aggregate*).

2. Charakterystyka technologii mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych metodą na zimno z asfaltem spienionym (MCAS)

W zależności od potrzeb technologicznych oraz założeń projektowych wykonywania warstw podbudowy w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym można wyróżnić dwie metody wykonania podbudowy [4, 11]:

- w wytwórni (*in plant*),
- na miejscu (*in situ*).

Rys. 1. Mobilna wytwórnia masy na zimno [12]

2.1. Charakterystyka technologii *in plant*

Wytwarzanie podbudowy w technologii recyklingu z asfaltem spienionym (MCAS) w urządzeniach stacjonarnych w porównaniu do technologii *in situ* jest korzystniejsze pod względem jednorodności oraz jakości uzyskanej podbudowy dzięki pełnej kontroli ilości dozowanych składników. Aspekty oraz uwarunkowania związane z dokładnością dozowania składników opisane są szczegółowo w wytycznych [4, 12]. Porównując technologie pod względem kosztów wyprodukowania mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym potrzebnej do wykonania jednego metra sześciennego podbudowy, należy stwierdzić, że technologia *in plant* jest dużo droższa. Dlatego też bardziej popularna ze względów ekonomicznych jest technologia recyklingu z asfaltem spienionym wykonywana na miejscu [13, 14].

Technologia recyklingu *in plant* wykorzystywana jest w sytuacji, kiedy konieczne jest doprowadzenie podłoża gruntowego do grupy nośności G1 [15]. Przykład mieszarki stacjonarnej przedstawiono na rysunku 1.

Mobilność wytwórni jest dużym atutem, umożliwiającym szybkie jej ustawienie oraz transport. Urządzenie składa się ze zbiornika na materiały mineralne, systemów pomp oraz systemów wtryskowych i mieszalnika [12].

2.2. Charakterystyka technologii *in situ*

Powszechniej wykorzystywaną metodą recyklingu na zimno z asfaltem spienionym jest technologia na miejscu (*in situ*), czyli bezpośrednio na budowie. Polega ona na przetworzeniu istniejących warstw konstrukcyjnych. Swą popularność metoda ta zawdzięcza względom ekonomiczno-finansowym oraz szybkości wykonania. W procesie technologicznym *in situ* główną rolę odgrywa recykler – maszyna mieszająca. Połączona jest ona z cysternami zawierającymi gorący asfalt oraz ewentualnie z cysterną z wodą. W trakcie jednego przejazdu recykler przekształca stare warstwy konstrukcyjne w nową warstwę podbudowy z asfaltem spienionym. Przykładowy zestaw maszyn wykorzystywanych w technologii *in situ* przedstawiono na fotografii 1.

Zalety technologii recyklingu na zimno szczegółowo opisał w swoich pracach prof. Iwański [16, 17], określając następujące czynniki:

- wykorzystanie miejscowych kruszyw,
- zmechanizowanie pracy,
- skrócenie czasu trwania budowy,
- wykonanie podbudowy półsztywnej, mniej narażonej na spękania,
- dopuszczenie ruchu technologicznego pojazdów bezpośrednio po wykonaniu podbudowy oraz wykonanie

kolejnych warstw konstrukcyjnych po 1–2 dniach,
- zmniejszenie wymaganej grubości konstrukcji nawierzchni w porównaniu do tradycyjnych technologii,
- minimalizacja kosztów transportu, dzięki wykonywaniu podbudowy na budowie.

Proces wykonania podbudowy w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym został dokładnie opisany w wytycznych zagranicznych [4, 18] oraz w literaturze krajowej [1, 16, 17, 19].

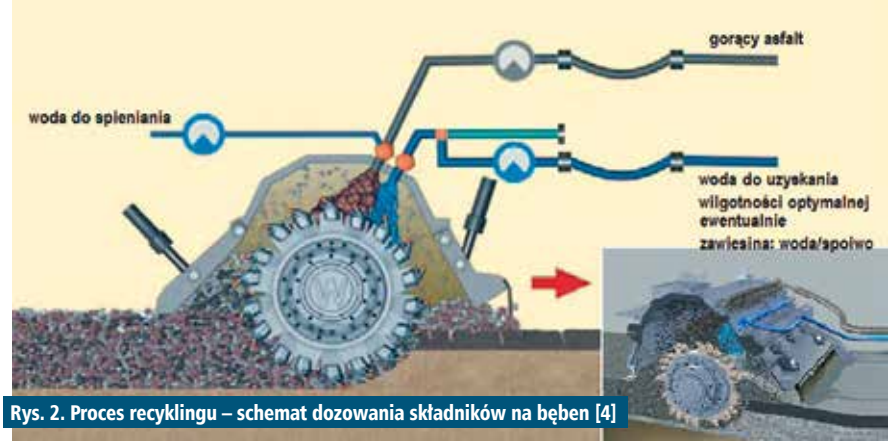
Elementem niezbędnym w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym jest recykler wyposażony w bęben frezująco-mieszający [4, 12, 18], przedstawiony na rysunku 2. Konstrukcja bębna umożliwia rozdrobnienie materiału mineralnego oraz jego wymieszanie. Kierunek obrotu bębna jest przeciwny do kierunku ruchu recyklera.

Podczas pracy recyklera woda pobierana jest z cysterny, która jest z nim połączona za pośrednictwem węży, i wtryskiwana do komory mieszania. Ilość asfaltu oraz dodatków dozuje się precyzyjnie na obracający się bęben frezująco-mieszający za pomocą układu sterowanych komputerowo pomp. Sam recykler pełni funkcję „lokomotywy", która, połączona sztywnym dyszlem, pcha lub ciągnie cysterny i inne urządzenia wykorzystywane w procesie technologicznym.

W czasie trwania procesu mieszania oraz bezpośrednio przed jego rozpoczęciem niezbędne jest określenie parametrów spienianego asfaltu oraz drożności systemu spieniającego w recyklerze (fot. 2).

Cały proces technologiczny związany z wykonywaniem warstwy podbudowy w technologii recyklingu głębokiego na miejscu (*in situ*) wymaga stałego nadzoru w celu uzyskania jednorodnej warstwy konstrukcyjnej. Do uzyskania prawidłowej jakości niezbędne jest wykonanie czynności kontrolnych w zakresie:
- ilości oraz jakości wtryskiwanego asfaltu spienionego,
- ilości składników mineralnych (np. sprawdzenie zawartości kruszywa doziarniającego 0/31,5 mm odbywa się poprzez pomiar grubości rozłożonej warstwy),
- ilości spoiwa (ważenie w przeliczeniu na m^2 w zależności od projektowanej grubości),
- głębokości wykonywanej podbudowy (Jest to jeden z najważniejszych punktów kontrolnych, ponieważ wszystkie składniki mineralne obliczane są na 1 m^2 przy założonej grubości. Wykonanie grubszej podbudowy powoduje, iż ilość składników odbiega od receptury, zaś w przypadku zmniejszenia grubości może nastąpić przesztywnienie podbudowy w wyniku zwiększenia ilości cementu w przeliczeniu na m^3).

Fot. 1. Zestaw maszyn w technologii recyklingu *in situ*



Rys. 2. Proces recyklingu – schemat dozowania składników na bęben [4]

Kontrola wszystkich przedstawionych punktów oraz zapewnienie ilości dozowanych składników względem receptury w recyklowanej mieszance podbudowy zapewni uzyskanie jej wymaganej jakości, która została założona na etapie projektowania.

Wybór procesu technologii recyklingu na zimno uzależniony jest od stanu istniejącego odcinka drogi, rodzaju poszczególnych warstw konstrukcyjnych, ich grubości, a tym samym jakości materiału recyklowanego. Zgodnie z założeniami wymagań [4, 12, 18] celowe jest wykorzystanie wszystkich warstw asfaltowych w procesie recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym.

3. Cel i zakres badań

Głównym celem badań było określenie właściwości fizycznych, mechanicznych i reologicznych recyklowanej podbudowy

Fot. 2. Próba drożności układu spieniania asfaltu

z asfaltem w aspekcie ilości danego materiału z recyklingu, który został zastosowany w składzie mieszanki mineralnej, tj. destruktu asfaltowego (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*), destruktu betonowego (RC – *Reclaimed Concrete*) oraz kruszywa naturalnego z recyklingu (RA – *Reclaimed Aggregate*). Ocenę wpływu materiałów na właściwości MCAS wykonano zgodnie z następującym planem badań:

- Badanie podstawowych właściwości fizycznych:
  - zawartość wolnej przestrzeni V_m wg PN-EN 12697-8 [20],
- Badanie odporności na działanie czynników atmosferycznych:
  - określenie odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR wg Wirtgen 2006 [21],
- Ocena sztywności recyklowanej podbudowy na zimno:
  - badanie modułu sztywności w teście pośredniego rozciągania (IT-CY) w temperaturze 13°C wg normy PN-EN 12697-26 zał. C [19],
  - badanie modułu zespolonego wg PN-EN 12697-26 zał. D [22].

Dla podkreślenia wpływu materiałów odpadowych na zmianę właściwości reologicznych recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym (MCAS) we wszystkich mieszankach zastosowano taką samą ilość asfaltu spienionego (FB) oraz cementu portlandzkiego (PC).

4. Projekt składu mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym MCAS

Zróżnicowana ilość składnika dozowanego (kruszywa naturalnego) do składnika bazowego (kruszywa z recyklingu: kruszywa naturalnego z recyklingu, destruktu asfaltowego oraz destruktu z betonu cementowego) pozwoliła na przeprowadzenie symulacji warunków istniejących w przypadku, gdy w procesie technologicznym wykonania podbudowy występuje różna grubość (ilość) materiału w warstwach konstrukcyjnych przeznaczonych do recyklingu. Dozowanie składników odbywało się w przedziale od 20% do 80% z krokiem 20%. W ten sposób otrzymano cztery kombinacje dozowania składników dla każdej recyklowanej podbudowy w aspekcie rodzaju kruszywa z recyklingu. Jako kruszywo doziarniające zastosowano kruszywo 0/31,5 mm. Kruszywo pochodziło z kopalni dolomitu w Radkowicach (Lafarge) i spełniało wymagania jak dla podbudowy zasadniczej dla ruchu KR 3-6(7) zgodnie z wymaganiami określonymi w WT-4 z 2010 roku [23]. Kruszywo stanowiło typowy rodzaj mieszanki stosowany jako doziarnienie mieszanki mineralnej recyklowanej podbudowy. Przebieg rozkładu uziarnienia składników mineralnych przedstawiono w tablicy 1.

W celu zapewnienia wymaganego rozmiaru ziarna w próbce Marshalla [5] materiały mineralne zostały przesiane przez sito # 22,4 mm.

Asfalt wyekstrahowany z destruktu asfaltowego (RAP) poddano zaawansowanym badaniom, które pozwoliły

#	RAP – Destrukt 0–30 (# 22,4)	RC – Destrukt betonowy 0/31,5 (# 22,4)	RA-1 – Kruszywo z recyklingu 0/4	RA-2 – Kruszywo z recyklingu 0/31,5 (# 22,4)	VA – Kruszywo „nowe" (kop. Radkowice) 0/31,5 (# 22,4)	CEM I 42,5R (Ożarów)
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
63,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	14,2	12,2	0,0	15,1	10,0	0,0
8,0	17,5	25,9	0,0	30,3	15,5	0,0
4,0	16,0	16,9	4,5	17,5	21,1	0,0
2,0	13,9	10,6	5,0	11,5	15,1	0,0
1,0	13,5	9,9	36,1	5,1	14,0	0,0
0,5	8,8	7,3	20,1	5,6	8,0	0,0
0,125	7,7	9,8	19,1	4,5	7,0	0,0
0,063	5,9	1,9	3,5	3,4	1,3	3,0
0,063	2,5	5,5	11,7	7,0	8,0	97,0
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
ρ_a [Mg/m^3]	2,43	2,28	2,69	2,75	2,80	2,99

Źródło: Opracowanie własne

Tablica 1. Analiza sitowa składników mineralnych wykorzystanych w projekcie MCAS

określić jego udział procentowy oraz rodzaj. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 2.

W celu zwiększenia kohezji mieszanki mineralnej zastosowano asfalt spieniony (FB) w ilości 2,5% (powstały z asfaltu drogowego 50/70 z rafinerii Orlen) oraz cement portlandzki (PC) klasy CEM I 42,5R w ilości 2,0% (cementownia Ożarów). Parametry piany asfaltowej oraz optymalną ilość wody niezbędnej do spieniania określono zgodnie z wymaganiami wytycznych [4]. Wynik z oceny przedstawiono na rysunku 3.

Tak przygotowane składniki pozwoliły na zaprojektowanie mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym MCAS. Udział procentowy składników przedstawiono w tablicy 3.

Przebieg projektowanych krzywych uziarnienia przedstawiono na rysunku 4.

Parametr asfaltu	j.m.	Wynik	Błąd stand.	Przedział ufności przy α = 0,05	Rozstęp	Metoda badania
Ilość lepiszcza	%	5,0	0,1	±0,27	0,7	PN-EN 12697-1
Penetracja w 25°C	0,1·mm	60	0,5	±0,9	3,8	PN-EN 1426
Temperatura mięknienia	°C	50	0,1	±0,27	0,3	PN-EN 1427
Temperatura łamliwości Fraassa	°C	-4,7	0,3	±0,65	1,0	PN-EN 12593
Lepkość dynamiczna w 60°C	Pa·s	474,7	10,5	±20,5	36,0	PN-EN 13702-1
Nawrót sprężysty	%	11,7	0,9	±1,7	3,0	PN-EN 13398

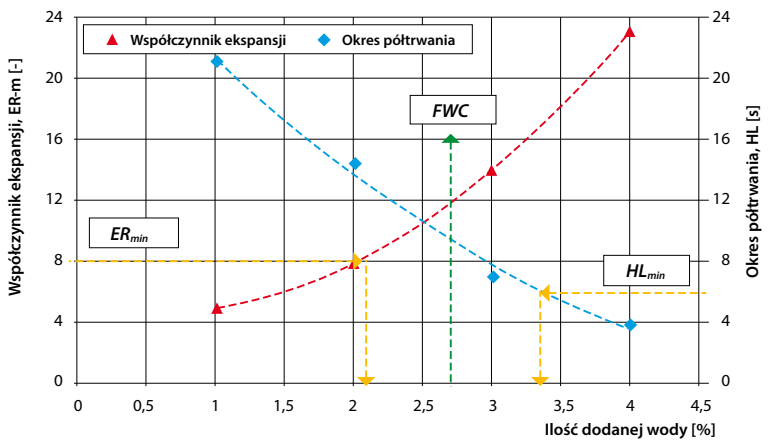
Źródło: Opracowanie własne

Tablica 2. Wyniki badań konwencjonalnych asfaltu wyekstrahowanego z destruktu wraz z przedziałami ufności

	Kruszywo naturalne z recyklingu (RA)	Destrukt asfaltowy (RAP)	Destrukt betonowy (RC)	Kruszywo doziarniające (VA)	Asfalt spieniony	Cement
MCAS	20			80	2,5%	2,0%
MCAS	40			60		
MCAS	60			40		
MCAS	80			20		

Źródło: Opracowanie własne

Tablica 3. Udział procentowy składników mieszanki MCAS



Rys. 3. Parametry spieniania asfaltu 50/70

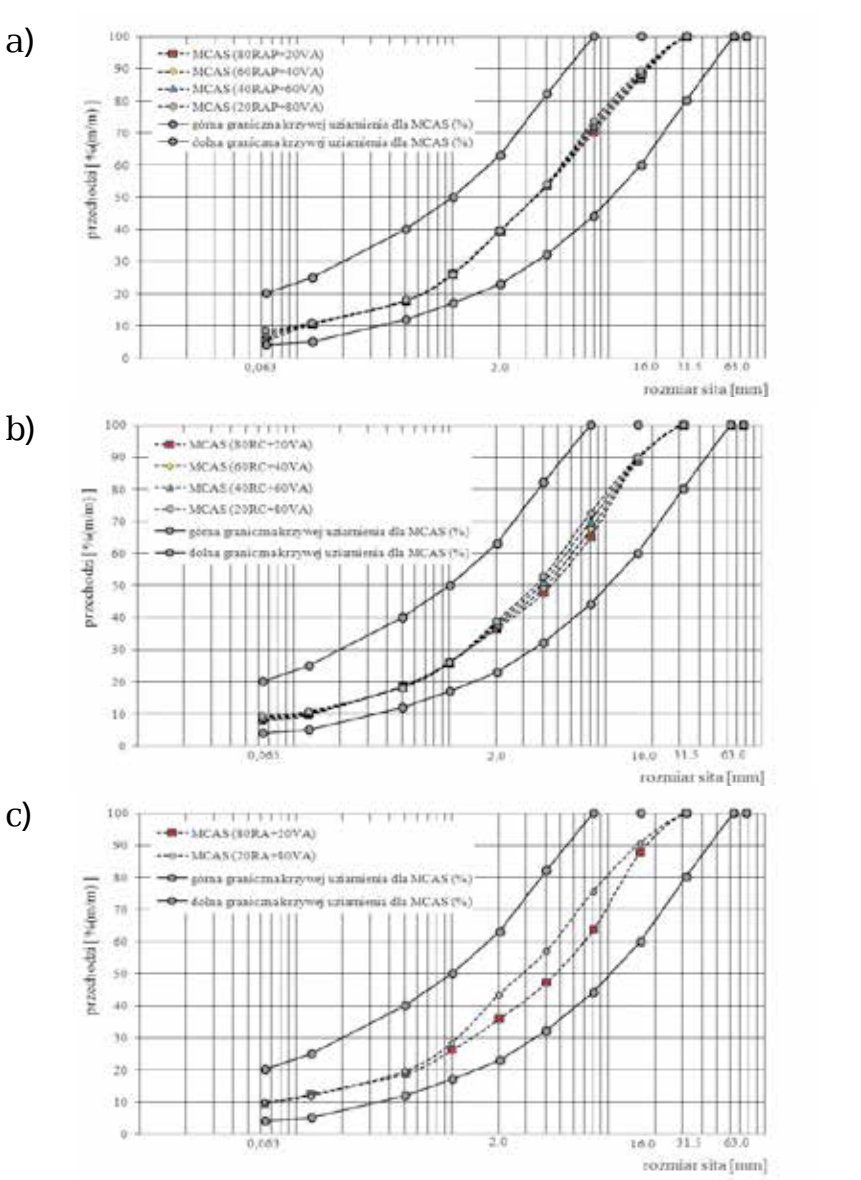
4.1. Przygotowanie próbek do badań (mieszanie, zagęszczanie, pielęgnacja)

Próbki do badań przygotowano w warunkach laboratoryjnych w mieszarce WLM30, natomiast piana asfaltowa wytworzona została w WLB10S. Składniki zostały uprzednio wysuszone do stałej masy w celu zminimalizowania wpływu zmian w ilości wynikających z ich wilgotności. Ocenę optymalnej ilości wody w mieszance mineralnej (OMC – *Optimum Moisture Content*) przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy EN 13286-2 za pomocą metody Proctora. Wyniki z przeprowadzonego badania przedstawiono w tablicy 4.

Zmiana wilgotności optymalnej jest powiązana ze zmianą ilości pyłów mineralnych w składzie recyklowanej mieszanki mineralnej. Większa ilość pyłów mineralnych (≤ 0,063 mm) wpływa na wzrost powierzchni właściwej mieszanki mineralnej. Podobne zależności występują w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych i wymaganej ilości asfaltu [5].

Składniki mieszanki mineralnej wymieszano w przystosowanej do tego mieszarce laboratoryjnej WLM30, która jest kompatybilna z laboratoryjną wytwórnią asfaltu spienionego WLB10S i umożliwia wprowadzenie piany asfaltowej w trakcie mieszania składników. Jest to o tyle korzystne, że pozwala symulować proces recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym w warunkach rzeczywistych (*in situ*), kiedy to w komorze frezująco-mieszającej następuje mieszanie wszystkich składników i dodanie asfaltu spienionego [4, 12, 18].

Po uzyskaniu jednorodnej mieszaniny próbki poddano procesowi zagęszczania. Próbki przeznaczone do badania podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych zagęszczono w prasie statycznej pod obciążeniem 80 kN,



Rys. 4. Krzywe uziarnienia MCAS: a) z destruktem asfaltowym (RAP), b) z destruktem z betonu cementowego (RC), c) z kruszywem z recyklingu (RA)

Mieszanka	Metoda badania	j.m.	OMC
MCAS 20%RAP + 80%VA	EN 13286-2	%	6,6
MCAS 40%RAP + 60%VA			6,1
MCAS 60%RAP + 40%VA			5,8
MCAS 80%RAP + 20%VA			5,6
MCAS 20%RC + 80%VA			5,8
MCAS 40%RC + 60%VA			6,1
MCAS 60%RC + 40%VA			6,6
MCAS 80%RC + 20%VA			7,3
MCAS 20%RA + 80%VA			5,5
MCAS 80%RA + 20%VA			5,7

Tablica 4. Wilgotność optymalna w mieszance mineralnej

Źródło: Opracowanie własne

a czas zagęszczania wynosił 3 min [24]. Próbki przeznaczone do badania modułu zespolonego zagęszczano w prasie żyratorowej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-31 [25]. Ilość obrotów zagęszczania została dobrana dla mieszanek indywidualnie do uzyskania gęstości, przy której zawartość wolnej przestrzeni w recyklowanej mieszance mineralno-cementowej z asfaltem spienionym była równa V_m = 12,0%. Średnica przygotowanych do badań próbek recyklowanej mieszanki z asfaltem spienionym (MCAS) wynosiła D = 150 mm, a wysokość H = 180 mm.

Pielęgnacja próbek przeprowadzona została zgodnie z metodyką opisaną w wytycznych [26], z tą różnicą, że w przypadku próbek recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym (MCAS) pielęgnacja obejmowała metodykę jak dla próbek przeznaczonych do określenia właściwości po 28 dniach pielęgnacji. Wydłużony okres pielęgnacji wynika z faktu, iż próbki MCAS zawierają w swoim składzie cement portlandzki, którego parametry wytrzymałościowe wpływają na zmianę modułu zespolonego recyklowanej mieszanki [27]. Próbki recyklowanej podbudowy przechowywano w warunkach umożliwiających zachowanie wilgotności od 40% do 70% przez 28 dni zgodnie z warunkami określonymi w wytycznych [26].

5. Wyniki badań

5.1. Wyniki badań podstawowych – właściwości fizyczne

Zawartość wolnej przestrzeni V_m jest to objętość porów powietrza w próbce mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym wyrażona jako procent całkowitej objętości próbki, zgodnie ze wzorem:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \qquad (1)$$

gdzie:

ρ_m – gęstość mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym i pyłami mineralnymi [Mg/m^3],

ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym i pyłami mineralnymi [Mg/m^3].

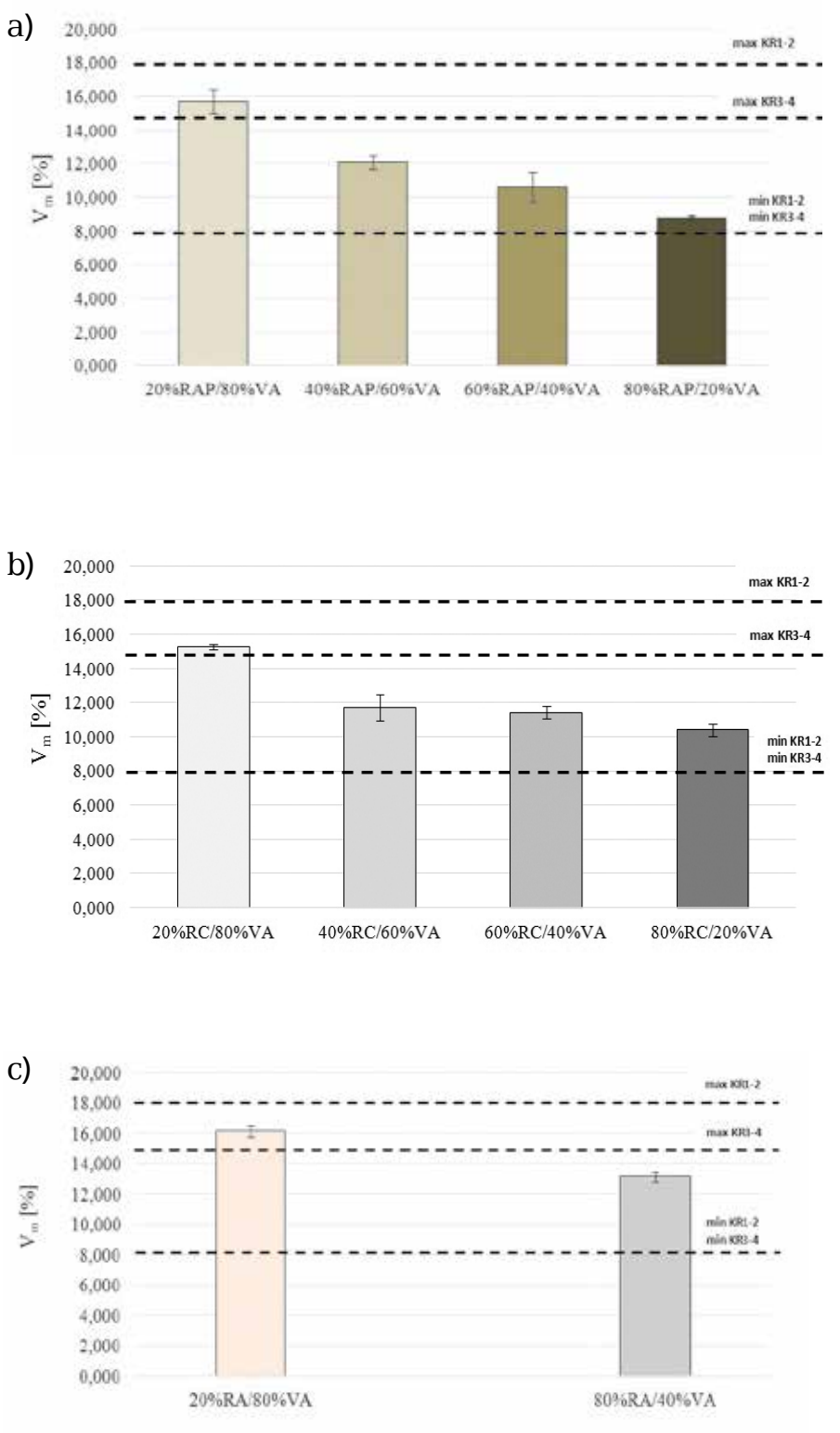
Graficzną interpretację wyników badań przedstawiono na rysunku 5. Rozrzut wyników został zaprezentowany w postaci przedziału ufności przy założonym prawdopodobieństwie 95%. Przedział ufności został obliczony dla zbadanej liczby próbek (tj. n = 6).

Zauważalny jest wpływ materiałów odpadowych w zakresie zawartości wolnej przestrzeni V_m. Wzrost ilości destruktu, niezależnie od jego pochodzenia (RAP, RC, RA), powoduje spadek zawartości wolnej przestrzeni (rys. 5 a–c). Największe oddziaływanie na parametr wolnej przestrzeni (V_m) wykazuje destrukt pochodzący z frezowania nawierzchni asfaltowych. Taka zależność może wynikać ze znajdującego się w jego składzie destruktu asfaltowego, asfaltu występującego w postaci mastyksu i kruszywa asfaltowego, który w czasie zagęszczania umożliwia lepsze zagęszczenie niż ma to miejsce w przypadku pozostałych materiałów odpadowych (RC, RA).

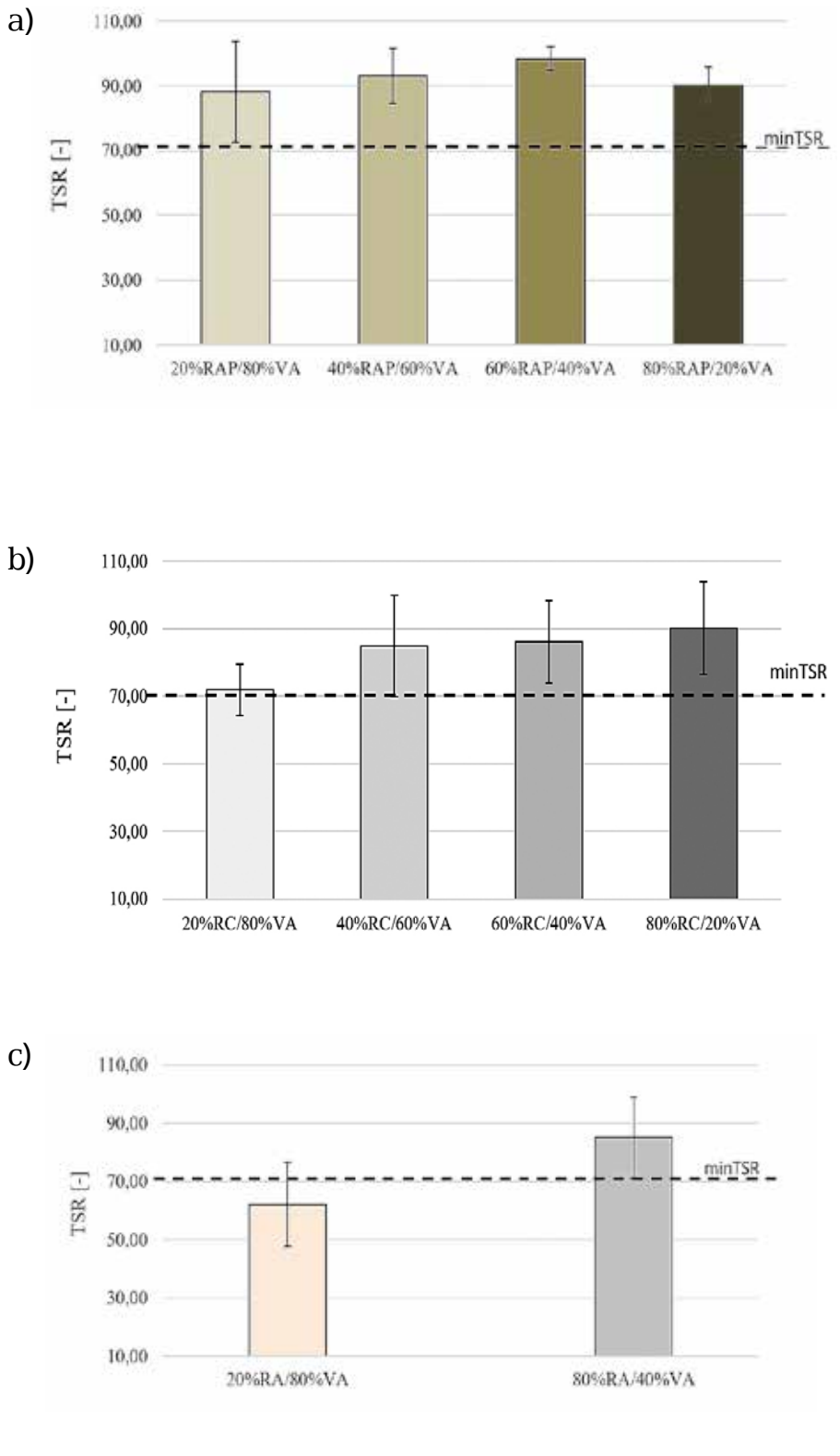
Należy zauważyć, że najmniejsze zawartości wolnej przestrzeni (najmniejsza wynosiła 8,8% (v/v)) uzyskały mieszanki przy maksymalnej ilości destruktu (80% (m/m)) w składzie MCAS niezależnie od jego rodzaju.

Natomiast największą zawartość wolnej przestrzeni (V_m) uzyskały mieszanki MCAS, w których składzie zastosowano materiał odpadowy w ilości 20% niezależnie od jego pochodzenia. Wszystkie te mieszanki uzyskały zawartość wolnej przestrzeni powyżej dopuszczalnej granicznej wartości 15% (v/v) [24], co wpłynęło na ograniczenie ich zastosowania jedynie do remontów dróg o obciążeniu od 0,03 do 0,50 mln osi 100 kN (kategoria ruchu KR1-2) [15].

Mniejsza zawartość wolnej przestrzeni (V_m), większa szczelność mieszanki MCAS, powinna wpływać na brak zmiany parametrów mechanicznych po oddziaływaniu czynników atmosferycznych. Dlatego też kolejny etap badawczy – ocena odporności na działanie wody – wskaźnik TSR pozwoli dokonać oceny wpływu materiałów odpadowych na jakość mieszanki MCAS.



Rys. 5. Zawartość wolnej przestrzeni w MCAS: mieszanka z RAP, b) mieszanka z RC, c) mieszanka z RA



Rys. 6. Odporność na działanie wody TSR: a) mieszanka z RAP, b) mieszanka z RC, c) mieszanka z RA

5.2. Wyniki badań odporności na działanie czynników atmosferycznych

Ocena odporności na działanie wody jest najważniejszym parametrem określającym jakość podbudów drogowych. Usytuowanie podbudowy w konstrukcji może powodować stałe jej zawilgocenie i narażenie na oddziaływanie wód gruntowych i opadowych. Brak bezpośredniego oddziaływania promieniowania słonecznego wydłuża proces wysychania podbudowy.

Ocenę odporności podbudowy wykonano wykorzystując metodykę opisaną w wytycznych [21], której wynikiem jest wartość wskaźnika TSR. Wskaźnik TSR (*Tensile Strength Retained*) został określony przez wytyczne [4, 21] i oznacza spadek wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu prób poddanych działaniu wody w stosunku do prób niepoddanych działaniu wody i wyrażony jest przez wzór:

$$TSR = \frac{ITSwoda}{ITS} \qquad (2)$$

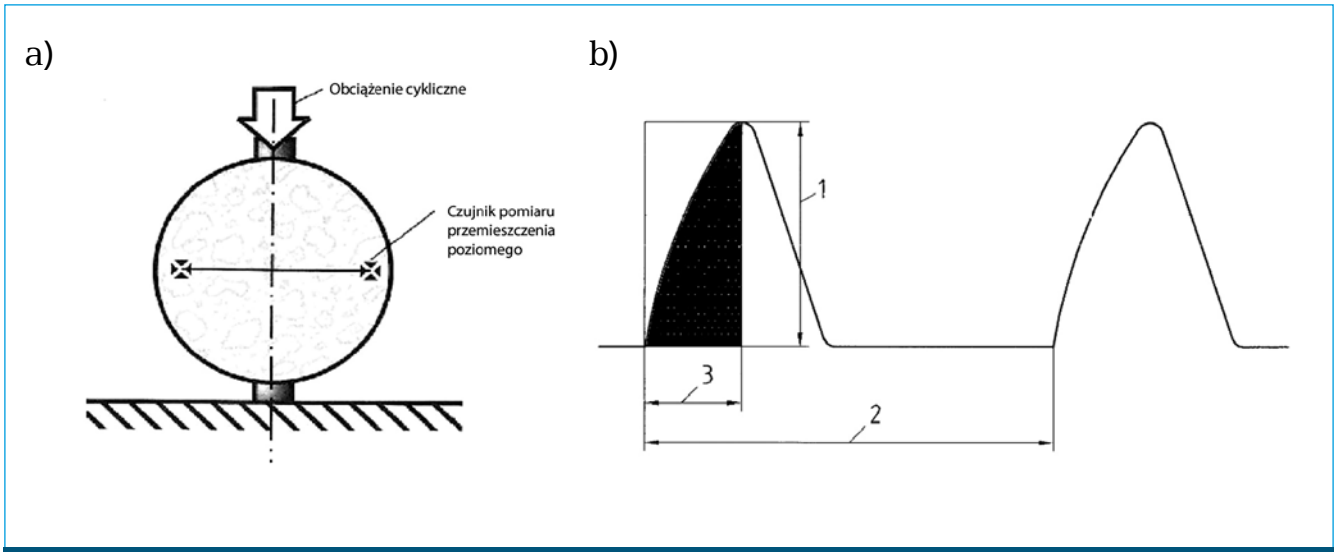
gdzie:

ITS_{woda} – wytrzymałość próbek poddanych kondycjonowaniu [kPa] na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C,

ITS – wytrzymałość próbek niepoddanych kondycjonowaniu [kPa] na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C.

Aby ustalić spadek wytrzymałości związany z negatywnym oddziaływaniem wody, należy pozostawić próbki w wodzie przez 24 godziny w temperaturze 25°C ± 1°C. Po wyjęciu z wody próbki należy powierzchniowo osuszyć i poddać badaniu wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C. Za podbudowy odporne na działanie wody, czyli warstwy szczelne, uważa się takie, których wartość wskaźnika TSR ≥ 0,7, zgodnie z [21].

Wyniki badań dla mieszanek mineralno-asfaltowych na zimno z asfaltem spienionym i materiałami odpadowymi w postaci RAP, RC oraz RA przedstawiono jako wartości średnie, wraz z odchyleniem standardowym i współczynnikiem zmienności, na rysunku 6.



Rys. 7. Przykładowy impuls siły przykładanej do badanej próbki oraz schemat obciążenia próbki [5]: 1 – maksymalne obciążenie, 2 – okresowy impuls siły, 3 – czas przyrostu siły

Lepszymi parametrami mechanicznymi, co wynika z wyższej wartości wskaźnika TSR, charakteryzują się te mieszanki mineralno-cementowe z asfaltem spienionym (MCAS), w których składzie występują materiały odpadowe w ilości większej niż 20% (m/m). Wzrost ilości destruktu, pochodzącego z betonu cementowego (RC) oraz z kruszywa (RA), wpływa korzystnie na parametr TSR, co jest pożądane w przypadku podbudów drogowych wykonanych z mieszanek MCAS. Maksymalna wartość destruktu RC oraz RA w składzie MCAS wykazuje spadek parametru wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ITS) po procesie kondycjonowania w wodzie w czasie 24 godzin o mniej niż 10%.

Fot. 3. Badanie modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w maszynie UTM

Dokonując analizy wpływu ilości destruktu asfaltowego (RAP) w składzie mieszanki MCAS należy stwierdzić, że w całym zakresie dozowania – od 20% do 80% (m/m) – recyklowana podbudowa wykazuje podobny poziom odporności na działanie czynników atmosferycznych.

5.3. Wyniki badań modułu sztywności w teście pośredniego rozciągania IT-CY

Badanie modułu sztywności sprężystej w pośrednim rozciąganiu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12697-26 załącznik C [22], dotyczącą badania modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych.

Badanie polega na bieżącym pomiarze pionowego i poziomego przemieszczenia w połowie wysokości próbki oraz kontroli przyłożonej siły wywołującej założone przemieszczenie. Schemat obciążenia próbki oraz przykładowy impuls siły przedstawiono na rysunku 7. Dodatkowo na fotografii 3 przedstawiono przebieg badania i proces kondycjonowania próbek.

Graficzną interpretację wyników badań przedstawiono na rysunku 8. Rozrzut wyników został zaprezentowany w postaci przedziału ufności przy założonym prawdopodobieństwie

95%. Przedział ufności został obliczony dla zbadanej liczby próbek, tj. n = 6.

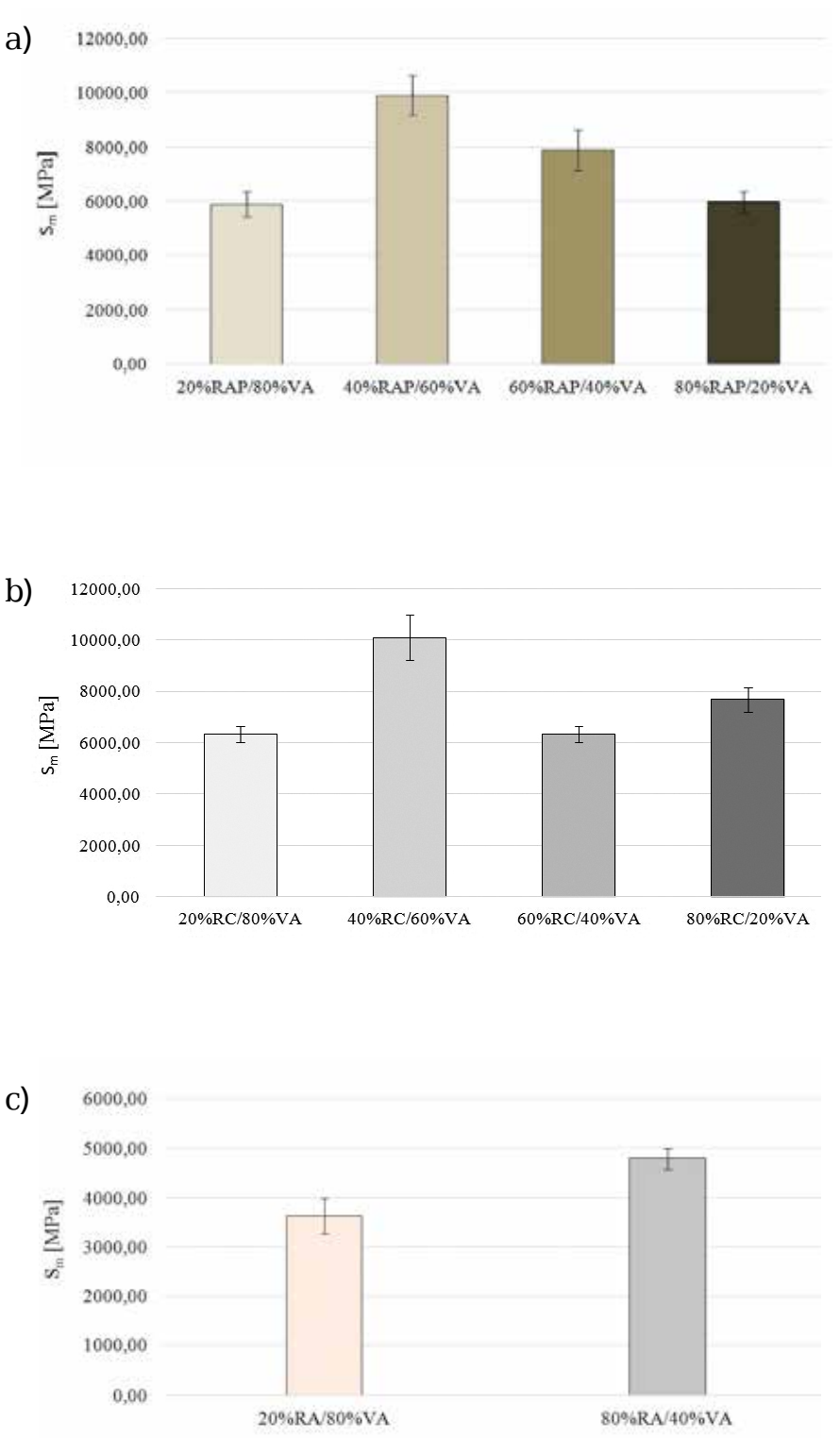
Dokonując analizy parametru powiązanego ze sztywnością mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym MCAS, tj. modułu sztywności w teście pośredniego rozciągania Sm (rys. 8), można stwierdzić, że możliwe jest regulowanie sztywności mieszanki MCAS poprzez odpowiednie dobranie ilości jej składników oraz ilości materiałów odpadowych i z recyklingu.

Najniższe wartości sztywności wykazują mieszanki, w których składzie zastosowano najmniejszą ilość materiału odpadowego niezależnie od jego pochodzenia. Wartości kształtują się poniżej 6 000 MPa. W przypadku mieszanki, w której składzie występuje destrukt asfaltowy (RAP), zwiększanie jego dozowania od ilości 40% powoduje spadek wartości modułu sztywności. Taka zależność wynikać może z faktu, że zwiększanie ilości destruktu skutkuje tym, że w mieszance MCAS zwiększa się ilość asfaltu całkowitego, który wpływa na sztywność kompozytów mineralno-asfaltowych [3, 5].

Należy zauważyć, że w mieszankach, w których zastosowano materiał odpadowy w postaci destruktu z kruszywa, mieszanka MCAS wykazuje najniższe wartości modułu sztywności ze wszystkich analizowanych próbek recyklowanej podbudowy MCAS.

5.4. Badanie modułu zespolonego (E*) w teście DTC-CY (Direct Tension–Compression Test on Cylindrical Samples) – wyznaczenie krzywych wiodących modułu zespolonego

Badanie modułu zespolonego (E*) mieszanki mineralno-asfaltowej na zimno z asfaltem spienionym wykonano w teście DTC-CY (Direct Tension–Compression Test on Cylindrical Samples) zgodnie z wymaganiami normy EN 12697-26 załącznik D [19]. W metodzie bezpośredniego ściskania i rozciągania (DTC-CY) próbka poddana zostaje cyklicznemu sinuso-

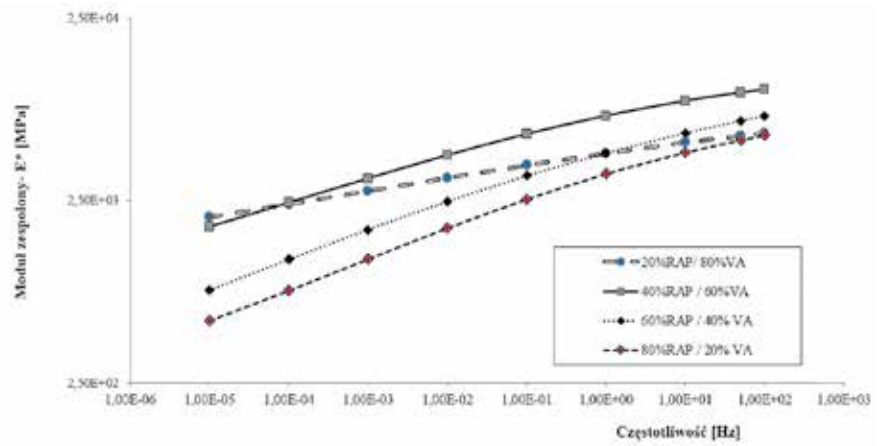


Rys. 8. Moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu Sm dla: a) mieszanka z RAP, b) mieszanka z RC, c) mieszanka z RA

Mieszanki	Parametry dopasowania do modelu							Moduł [MPa]		Jakość dopasowania	
	a	b	α	β	γ	δ	λ	E_∞	E_0	RMSE [%]	R^2
20%RAP/80%VA	1.92	-0.02	1.97	0.22	-0.39	1.97	6.89	93	8713	0.84	0,985
40%RAP/60%VA	1.62	-0.04	2.07	-0.86	-0.41	2.08	3.15	119	14377	2.15	0,962
60%RAP/40%VA	2.57	-0.01	2.15	1.03	-0.22	2.15	0.10	141	19881	2.63	0,999
80%RAP/20%VA	2.49	-0.01	2.02	2.01	-0.35	2.02	1.05	103	10753	1.30	0,995

Źródło: Opracowanie własne

Tablica 5. Parametry dopasowania przebiegu krzywych wiodących modułu zespolonego (E*) dla mieszanki MCAS + RAP

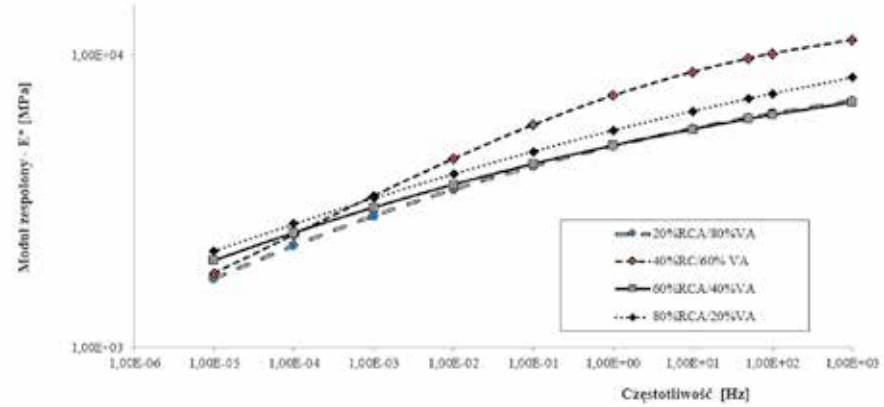


Rys. 9. Krzywe wiodące modułu zespolonego dla mieszanek MCAS z destruktem asfaltowym (RAP) w temperaturze referencyjnej T = 25°C

Mieszanki	Parametry dopasowania do modelu							Moduł [MPa]		Jakość dopasowania	
	a	b	α	β	γ	δ	λ	E_∞	E_0	RMSE [%]	R^2
20%RC/80%VA	2,57	-0,009	2,03	0,44	-0,19	2,03	0,1	108	11687	1,0	0,998
40%RC/60%VA	2,01	-0,017	2,70	0,23	-0,075	2,70	0,1	502	252230	4,84	0,976
60%RC/40%VA	2,84	-0,007	2,05	0,86	-0,16	2,05	0,1	113	12845	1,08	0,989
80%RC/20%VA	2,03	-0,02	2,19	-0,51	-0,13	2,19	0,1	154	23726	3,46	0,982

Źródło: Opracowanie własne

Tablica 6. Parametry dopasowania przebiegu krzywych wiodących modułu zespolonego (E*) dla mieszanki MCAS + RC

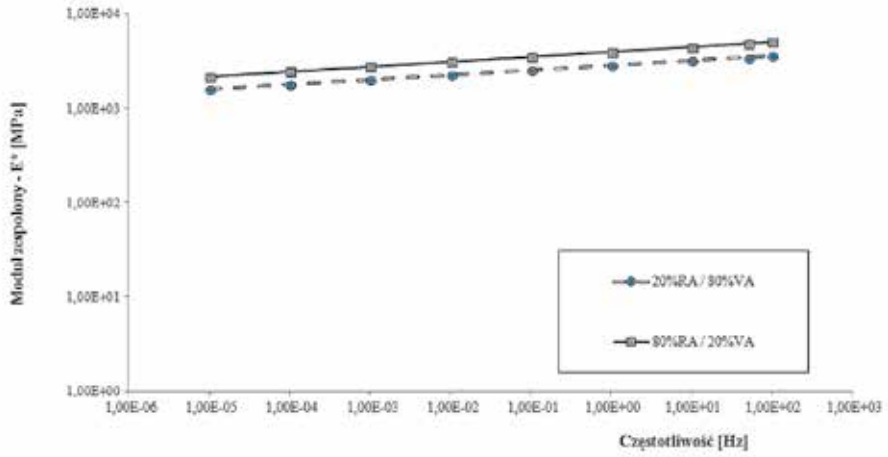


Rys. 10. Krzywe wiodące modułu zespolonego dla mieszanek MCAS z destruktem z betonu cementowego (RC) w temperaturze referencyjnej T = 25°C

Mieszanki	Parametry dopasowania do modelu							Moduł [MPa]		Jakość dopasowania	
	a	b	α	β	γ	δ	λ	E_∞	E^0	RMSE [%]	R^2
20%RA/80%VA	2,12	-0,017	2,45	0,25	-0,058	2,45	0,1	258	81269	2,71	0,975
80%RA/20%VA	2,17	-0,015	2,56	0,29	-0,06	2,56	0,1	363	131792	2,58	0,983

Źródło: Opracowanie własne

Tablica 7. Parametry dopasowania przebiegu krzywych wiodących modułu zespolonego (E*) dla mieszanki MCAS+RA



Rys. 11. Krzywe wiodące modułu zespolonego dla mieszanek MCAS z destruktem z kruszywa (RA) w temperaturze referencyjnej T = 25°C

idalnemu obciążeniu, które powoduje wywołanie małej wartości odkształcenia w granicach od 25 $\mu\varepsilon$ do 50 $\mu\varepsilon$ [22, 28, 29]. Badanie przeprowadzone poza tym zakresem odkształcenia może powodować powstawanie w badanej próbce odkształceń nieodwracalnych, które mogą skutkować błędami w odczycie modułu zespolonego. Testy wykonano dla czterech wartości temperatur (5°C, 13°C, 25°C, 40°C) oraz sześciu czasów obciążania (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 20 Hz). Na tej podstawie określono wartości modułu zespolonego (E*) oraz kąt przesunięcia fazowego (φ).

Analizując wpływ materiałów z przemysłu hutniczego i stalowniczego na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej na zimno z asfaltem spienionym, zaproponowano niesymetryczny model Richardsa [30], który jest modyfikacją modelu w raporcie NCHRP 9-29: PP 02 [30, 31]. Model ten można zaklasyfikować do modeli matematycznych sigmoidalnych niesymetrycznych poprzez wprowadzenie współczynnika niesymetryczności przebiegu krzywej (λ). Postać funkcji sigmoidalnej niesymetrycznej opisano następującym równaniem (3):

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{[1+\lambda e^{\beta+\gamma\log\omega}]^{1/\lambda}} \quad (3)$$

gdzie:
E* – moduł zespolony,
ω – współczynnik przesunięcia temperaturowego,
δ – wartość dolnej asymptoty (parametr dopasowania krzywej wiodącej),
α – różnica między wartością górnej i dolnej asymptoty (parametr dopasowania krzywej wiodącej),
λ, β, γ – parametry dopasowania krzywej wiodącej.

Prezentacja krzywej wiodącej modułu zespolonego wykorzystuje zasadę superpozycji czasowo-temperaturowej. W tym celu niezbędne jest wprowadzenie współczynnika przesunięcia temperaturowego (αT) w postaci funkcji wielomianu (4) [32]:

$$ln\,\alpha_T = a + b \bullet T + c \bullet T^2 \quad (4)$$

gdzie:
α_T – współczynnik przesunięcia,
T – temperatura badania,
a, b, c – parametry modelowe.

Przy budowie krzywych wiodących modułu zespolonego recyklowanych mieszanek z asfaltem spienionym w aspekcie rodzaju materiału wykorzystano założenia zasady superpozycji czasowo-temperaturowej [30]. W tym celu przeprowadzono optymalizację przebiegu funkcji sigmoidalnej metodą minimalizacji sumy kwadratów odchyleń dla oznaczonych modułów zespolonych recyklowanej mieszanki z asfaltem spienionym. W efekcie optymalizacji przebiegu funkcji wymagane było wyznaczenie para-

metrów krzywej wiodącej (α, β, γ, δ oraz λ). Do oceny jakości dopasowania funkcji sigmoidalnej wykorzystano kryterium znormalizowanego błędu średniej RMSE, stosowanego przez autorów do oceny zmian zachowań mieszanki SMA [33].

Prezentację krzywych wiodących dla zredukowanej domeny częstotliwości przedstawiono na rysunkach 9–11. Ocenę parametrów dopasowania danych do modelu matematycznego funkcji sigmoidalnej dla analizowanych mieszanek przedstawiono w tablicach 5–7.

Dokonując analizy parametrów powiązanych ze sztywnością mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym MCAS, tj. modułu sztywności w teście pośredniego rozciągania Sm oraz krzywych wiodących modułu zespolonego (E*), można stwierdzić, że możliwe jest regulowanie sztywności mieszanki MCAS poprzez odpowiednie dobranie ilości składników mieszanki oraz ilości materiałów odpadowych i z recyklingu.

Należy zauważyć, że dopasowanie parametrów modelu matematycznego niesymetrycznej funkcji sigmoidalnej charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem R2, zbliżonym do wartości 1,0 (tablice 3–5). Świadczy to o bardzo dobrym dopasowaniu przebiegu funkcji do zbadanych wartości modułu zespolonego, przesuniętych o wartość współczynnika αT. Analiza parametru krzywej wiodącej „λ" świadczy o symetrycznym rozkładzie modułu zespolonego w niskich i wysokich częstotliwościach dla analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym.

Analiza przebiegu krzywych wiodących modułu zespolonego recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym i różną zawartością destruktu asfaltowego pozwala na stwierdzenie zbliżonych zachowań recyklowanej podbudowy w krótkim czasie obciążenia. Zależność tę można przypisać, grupując mieszanki w sposób następujący: 80%RAP + 20%VA z 20%RAP + 80%VA oraz 40%RAP + 60%VA i 60%RAP + 40%VA. Dokonując porównania mieszanki z 20% zawartością destruktu asfaltowego oraz 80% zawartością RAP, można stwierdzić, że w przypadku mieszanki z 80%RAP następuje gwałtowne zmniejszenie wartości modułu zespolonego po przekroczeniu częstotliwości 10Hz w porównaniu do mieszanki z 20% zawartością RAP. Taka charakterystyka świadczy o zmniejszonej możliwości przenoszenia obciążeń. Należy również zaznaczyć, że mieszanka z 20% zawartością RAP charakteryzuje się stopniowym tempem zmian modułu zespolonego. Przebieg jest zbliżony do liniowego w porównaniu do pozostałych mieszanek. Wyjaśnienie tego zjawiska potwierdzone jest wartością parametru λ, która determinuje symetryczność ukształtowania krzywej. Dodatnia wartość parametru λ powoduje przesunięcie lewej części krzywej wiodącej do góry, a tym samym zmniejszenie różnicy wyników dla wysokich i niskich częstotliwości. Zbliżony do liniowego przebieg zmian modułu zespolonego w przypadku mieszanki 20%RAP + 80%VA wynika z najmniejszej ilości asfaltu w jej składzie w porównaniu do pozostałych mieszanek. Analiza przebiegu krzywych wiodących w przypadku mieszanek z zawartością 40%RAP, 60%RAP oraz 80%RAP jest wręcz stopniowo obniżona o ilość dozowanego destruktu asfaltowego, która przenosi się na wartość modułu zespolonego recyklowanej mieszanki z asfaltem spienionym.

W przypadku mieszanki z destruktem z betonu cementowego, analizując przebieg krzywych wiodących, widzimy wyraźnie (rys. 9), że zastosowany w składzie recyklowanej mieszanki destrukt z betonu cementowego (RC) nie powoduje wzrostu modułu sztywności w porównaniu do mieszanki referencyjnej (czerwona linia). Najmniejsze wartości modułu zespolonego uzyskała mieszanka recyklowana zawierająca najmniejszą ilość destruktu z betonu cementowego (20%RCA + 80VA). Należy zaznaczyć, że zwiększenie ilości destruktu betonowego (RC) do 60% powoduje wzrost modułu zespolonego w niskich częstotliwościach/długim czasie obciążenia, natomiast w niskich temperaturach/krótkim czasie obciążenia wartość modułu zespolonego jest taka sama jak dla mieszanki z 20% zawartością RC.

6. Wnioski

Analiza wyników badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Analiza cechy „zawartość wolnej przestrzeni" wykazała, że wszystkie mieszanki z dodatkiem destruktu (RAP, RC, RA) powyżej 20% w składzie mieszanki MCAS mogą zostać zastosowane do dróg na kategorię ruchu do 7,5 mln osi 100 kN. Uzyskane wolne przestrzenie mieszczą się w określonym przedziale V_m = 8,0 ÷ 15%. W przypadku mieszanek MCAS z zawartością destruktu równą 20% istnieje możliwość zastosowania ich do dróg o kategorii ruchu od 0,03 do 0,50 mln osi 100 kN. Zwiększenie ilości destruktu w składzie MCAS, niezależnie od jego pochodzenia, powoduje spadek zawartości wolnej przestrzeni.
- Możliwe jest uzyskanie wymaganej odporności na działanie czynników atmosferycznych mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym, w której składzie zastosowane zostaną materiały odpadowe. Najwyższą odpornością na działanie wody (wskaźnik TSR) charakteryzują się mieszanki mineralno-cementowe z asfaltem spienionym z destruktem asfaltowym (RAP). Najmniej korzystne oddziaływanie zaobserwowano dla mieszanki MCAS, w której zastosowano destrukt w postaci kruszywa z recyklingu.
- Wzrost ilości destruktu asfaltowego (RAP) od 40% do 80% w składzie

recyklowanej podbudowy powoduje stopniowe obniżenie wartości modułu zespolonego (E*).

- Najmniejszą wrażliwość na zmiany modułu zespolonego w zakresie badanych temperatur (5°C, 13°C, 25°C, 40°C) oraz czasów obciążania (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 20 Hz) uzyskała mieszanka z 20% zawartością destruktu asfaltowego.
- Uzyskanie maksymalnej wartości modułu zespolonego (E*) dla recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym i destruktem asfaltowym, przy krótkim czasie obciążenia, jak również niskiej temperaturze, nie gwarantuje równie korzystnego zachowania recyklowanej podbudowy w wysokich temperaturach.

Podziękowania

Wyniki badań zostały opracowane w ramach projektu pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu" w ramach przedsięwzięcia „RID", które jest współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad. ■

Literatura

[1] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., *Evaluation of the pavement performance.* Bulletin of the Polish Academy of Science: Technical Science, t. 63, zeszyt 1, s. 97–105.

[2] Dołżycki B., *Polish experience with cold in-place recycling*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., t. 236, s. 012089, wrz. 2017.

[3] Asphalt Academy, Technical Guideline TG2, *Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials,* Second Edition, Pretoria, South Africa, 2009.

[4] Wirtgen Cold Recycling Technology. Manual, 1th edition 2012, Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 2012.

[5] Piłat J., Radziszewski P., *Nawierzchnie asfaltowe,* Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, wyd. 3, s. 540, Warszawa, 2010.

[6] Niazi Y., Jalili M., *Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion, „Constr. Build. Mater.",* t. 23, nr 3, s. 1338–1343, 2009.

[7] Godenzoni C., Graziani A., Perraton D., *Complex modulus characterisation of cold recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed bitumen*, Road Materials and Pavement Design, vol. 18(1), 2017, s. 130–150. doi.org/10.1080/14680629.2016.1142467

[8] Pasetto M., Baldo N., *Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases, „Constr. Build. Mater.",* t. 108, s. 112–118, kwi. 2016.

[9] Choi S., Yeon J. H., Won M. C., *Improvements of curing operations for Portland cement concrete pavement, „Constr. Build. Mater.",* t. 35, s. 597–604, paź. 2012.

[10] Vaitkus A., Vorobjovas V., Kleizienė R., Šernas O., Gražulytė J., *Modified asphalt mixtures for heavy duty pavement wearing layers*, „Constr. Build. Mater.", t. 131, s. 503–511, sty. 2017.

[11] Kukiełka J., *Recykling nawierzchni asfaltowych w województwie lubuskim*, zaprezentowano na Estetyka i ochrona środowiska w drogownictwie. II konferencja Naukowo-Techniczna, Nałęczów, 2005, s. 211–221.

[12] Wirtgen Group, Foamed Bitumen – The Innovative Binding Agent for Road Construction. No. 54-14 EN-03/02 © by Wirtgen GmbH, 2002.

[13] Jenkins K. J., Long F. M., Ebels L. J., *Foamed bitumen mixes = shear performance?,* „International Journal of Pavement Engineering", t. 8, nr 2, s. 85–98, cze. 2007.

[14] Kim Y., Lee D. Y., Heitzman M., Laboratory evaluation of cold in place recycling mixtures using foamed asphalt based on dynamic modulus and repeated dynamic load tests. Transportation Research Board 87th Annual Meeting, Washington, D.C., 2008.

[15] *Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*, 2014.

[16] Iwański M., *Podbudowy z asfaltem spienionym*, „Drogownictwo", nr 3, s. 97–106, 2006.

[17] Iwański M., *Recykling na zimno asfaltem spienionym różnego typu materiałów konstrukcyjnych z zakresu recklowanych podbudów*, „Nawierzchnie asfaltowe", nr 4, s. 7–11, 2008.

[18] Asphalt Academy, Technical Guideline TG2, *Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*, wyd. drugie, Pretoria, South Africa, 2009.

[19] Buczyński P., *The Frost Resistance of Recycled Cold Mixes with Foamed Bitumen and Different Types of Road Binders*, „Procedia Engineering", t. 161, s. 54–59, 2016.

[20] PN-EN 12697-8:2005 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 8*: *Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni*.

[21] Wirtgen Group, *Podręcznik recyklingu na zimno*, wyd. drugie, Windhagen: Wirtgen GmbH, 2006.

[22] PN-EN 12697-26:2012 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność.*

[23] WT-4, *Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych*, GDDKiA, Warszawa, 2010.

[24] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Buczyński P., Mazurek G., Cholewińska M., Iwański M. M., Ramiączek P., Maciejewski K., Procedury projektowania oraz wytyczne stosowania materiałów odpadowych i z recyklingu do technologii wytwarzania mieszanek metodą na zimno z asfaltem spienionym (MCAS). Politechnika Świętokrzyska. Wytyczne do Raportu RID-I/6, zadanie 5, NCBiR, GDDKiA, Kielce 2018.

[25] PN-EN 12697-31:2007 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 31: Próbki przygotowane w prasie żyratorowej.*

[26] Dołżycki B., *Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno--cementowo-emulsyjnych (MCE),* GDDKiA, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2013 (aktualizacja 2014).

[27] Dołżycki B., Jaczewski M., Szydłowski C., „The Impact of Long-Time Chemical Bonds in Mineral-Cement-Emulsion Mixtures on Stiffness Moduli, Environmental Engineering" 10th International Conference, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 27–28 kwi. 2017.

[28] Martinez-Arguelles G., Giustozzi F., Crispino M., Flintsch G. W., *Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen*, „Construction and Building Materials", t. 72, s. 423–433, grudz. 2014.

[29] Buczyński P., Iwański M., *Complex modulus change within the linear viscoelastic region of the mineral--cement mixture with foamed bitumen*, „Construction and Building Materials", 172, p. 52–62, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.214

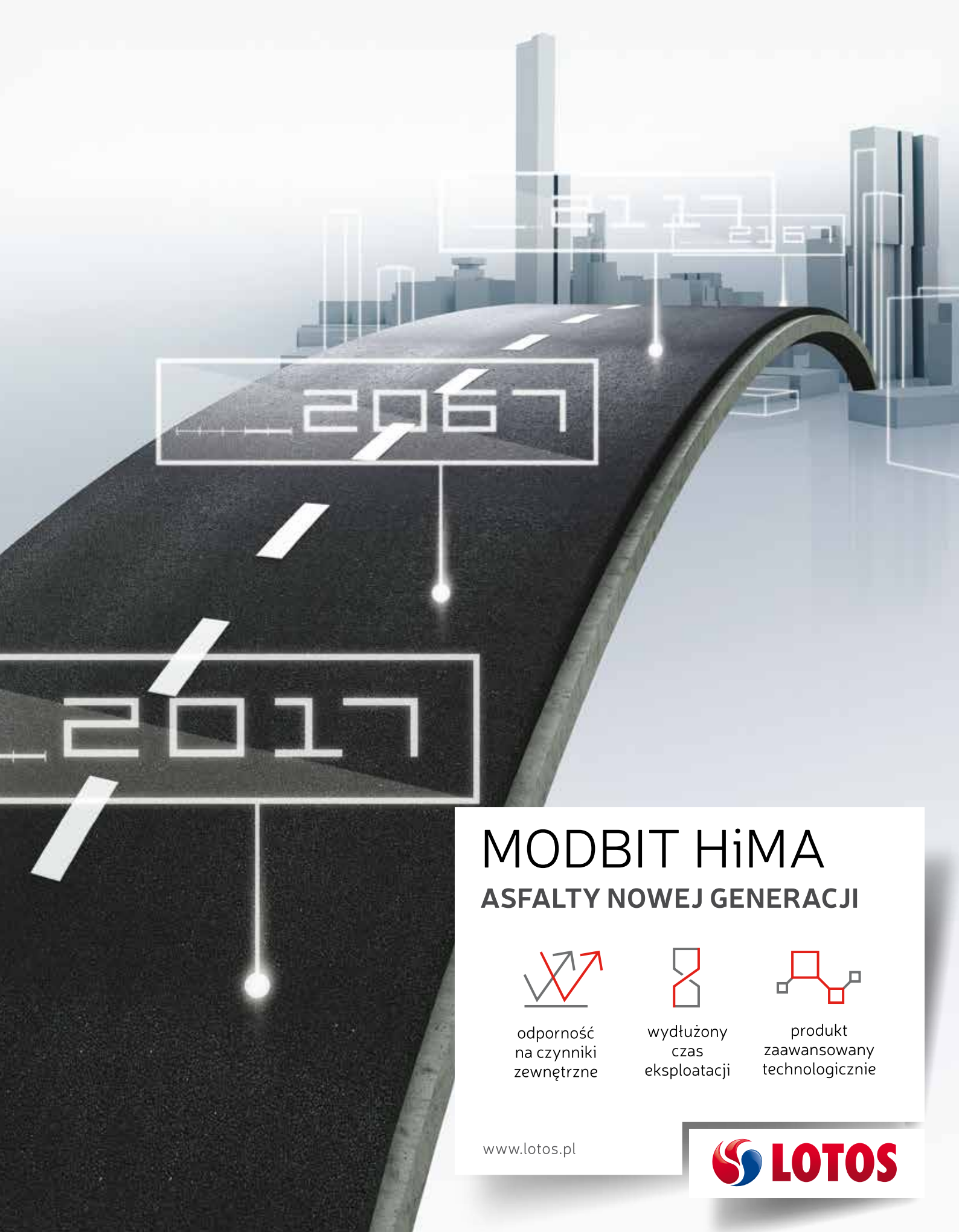
[30] Witczak M., Root R., *Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results*, American Society for Testing and Materials STP 561, s. 67–94, 1974. DOI: 10.1520/STP32177S

[31] NCHRP Report 614, *Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice,* Transportation Research Board, Washington, D.C., 2008.

[32] Yusoff N. I. M., Airey G. D., Hainin M. R., *Predictability of Complex Modulus Using Rheological Models*, „Asian Journal of Scientific Research", t. 3, nr 1, s. 18–30, sty. 2010.

[33] Mazurek G., Iwański M., *Relaxation Modulus of SMA with Polymer Modified and Highly Polymer Modified Bitumen*, „Procedia Engineering", t. 172, s. 731–738, 2017.

Zdjęcia: P. Buczyński


2067
2017
MODBIT HiMA
ASFALTY NOWEJ GENERACJI
odporność na czynniki zewnętrzne
wydłużony czas eksploatacji
produkt zaawansowany technologicznie
www.lotos.pl
LOTOS