NAWIERZCHNIE ASFALTOWE

Nr 4(52)/2017

KWARTALNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA WYKONAWCÓW NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

ISSN 1734-1434

RECYKLING GŁĘBOKI NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH Z ASFALTEM SPIENIONYM W ASPEKCIE WPŁYWU MATERIAŁÓW ODPADOWYCH

Badania Katedry Inżynierii Komunikacyjnej Politechniki Świętokrzyskiej

Efektywność ekonomiczna nawierzchni drogowych z asfaltami wysokomodyfikowanymi

Wpływ rodzaju lepiszcza i grubości warstw asfaltowych na długość życia drogi

Budujmy dobre drogi

Nowości w technologii asfaltowej

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
Waldemar Merski, członek zarządu
Zbigniew Krupa, pełnomocnik zarządu

Redakcja
Anna Krawczyk, redaktor naczelna
Danuta Kropiewnicka, redakcja językowa, korekta

DTP
Krzysztof Konarski – Inventivo.pl
Fotografia na okładce – Budimex

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 4(52)/2017

4 **Recykling głęboki nawierzchni asfaltowych z asfaltem spienionym w aspekcie wpływu materiałów odpadowych**
Marek Iwański, Przemysław Buczyński, Grzegorz Mazurek

15 **Efektywność ekonomiczna nawierzchni drogowych z asfaltami wysokomodyfikowanymi**
Jan Król, Karol J. Kowalski

22 **Budujmy dobre drogi**
Anna Arczewska

Serdecznie zapraszamy na

XXXVIII Seminarium Techniczne PSWNA,

które odbędzie się w dniach **21–23 marca 2018 r.** w hotelu Windsor w Jachrance.

Tematem przewodnim spotkania będą „Asfalty w budownictwie drogowym – ekonomia, ekologia, innowacje”.

Czasopismo wspierane finansowo przez:

LOTOS Asfalt

Choć to dopiero początek zimy, myślimy już o czekającym nas sezonie budowlanym. Rozpoczniemy go kolejnym, XXXVIII Seminarium Technicznym PSWNA, które odbędzie się w dniach 21–23 marca w hotelu Windsor w Jachrance. Tym razem będziemy rozważać ekologiczne i ekonomiczne aspekty zastosowania asfaltów w budownictwie drogowym. Nie zabraknie tematów związanych z innowacjami.

Tymczasem powróćmy na chwilę do roku 2015, gdy Narodowe Centrum Badań i Rozwoju wspólnie z Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad ogłosili pierwsze konkursy w ramach programu Rozwój Innowacji Drogowych (RID). Jego celem było wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w obszarze drogownictwa.

Katedra Inżynierii Komunikacyjnej Politechniki Świętokrzyskiej pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. Marka Iwańskiego poprowadziła projekt pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu". Wyniki badań zespołu, w skład którego weszli także: dr inż. Przemysław Buczyński i dr inż. Grzegorz Mazurek, prezentujemy w tym wydaniu „Nawierzchni Asfaltowych". Opisana technologia recyklingu głębokiego na zimno jest już od dawna stosowana do przebudowy dróg nie tylko w Polsce, ale i na świecie. Naukowcy z Politechniki Świętokrzyskiej zastanawiają się jednak nad wpływem materiałów odpadowych przy recyklingu głębokim nawierzchni asfaltowych z asfaltem spienionym.

Efektywność ekonomiczną nawierzchni drogowych z lepiszczami wysokomodyfikowanymi badają natomiast naukowcy z Politechniki Warszawskiej: dr hab. inż. Jan Król oraz dr hab. inż. Karol J. Kowalski, prof. PW. Wspólnie z jednostkami naukowymi Politechniki Gdańskiej oraz Instytutu Badawczego Dróg i Mostów poprowadzili projekt badawczy pt. „Koncepcja optymalizacji konstrukcji asfaltowej nawierzchni drogi dzięki zastosowaniu asfaltów modyfikowanych do warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni drogowej". Warto podkreślić, że sfinansowany był on przez firmę LOTOS Asfalt Sp. z o.o.

W badaniu, oceniając efektywność ekonomiczną nawierzchni, brano pod uwagę nie tylko różne rodzaje lepiszcza, ale także grubość poszczególnych warstw asfaltowych oraz wpływ założonych scenariuszy eksploatacyjnych nawierzchni.

Z życzeniami miłej lektury
Andrzej Wyszyński

Zdjęcie: PSWNA

www.pswna.pl

Summary:

Foamed Bitumen – Recycled Cold Mix (FB-RCM) is a technology popularly used to rebuild roads. Because the arrangement of construction layers in reconstructed roads is varied, the recycled cold mix may contain waste materials as well as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Reclaimed Concrete (RC) and Reclaimed Aggregate (RA) in varied amounts. The aim of the research was to assess rheological properties of the recycled base with foamed bitumen in terms of the dosage of RAP, PA and PC ranging between 20% and 80% in steps of 20%. The complex modulus was measured at five temperatures (-7°C, 5°C, 13°C, 25°C, 40°C) and six loading frequencies (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 20 Hz). The complex modulus was determined with the use of the Direct Tension-Compression Test on Cylindrical Samples (DTC-CY) in compliance with EN 12697-26 European Standard. The complex modulus (E^*), phase angle (φ) and components of the complex modulus (E1) and (E2) were evaluated on the basis of the test results. The conclusion of the study is that waste materials may be potentially utilised as components in cold-recycled asphalt mixes with foamed bitumen without a major impact on mechanical parameters of the mix.

Recykling głęboki nawierzchni asfaltowych z asfaltem spienionym w aspekcie wpływu materiałów odpadowych

Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym (FB-RCM) to powszechnie stosowana technologia przebudowy dróg. W związku ze zmiennym układem warstw konstrukcyjnych remontowanej nawierzchni drogowej możliwe jest wystąpienie w składzie recyklowanej mieszanki na zimno materiałów odpadowych i z recyklingu, tj. destruktu asfaltowego (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*), destruktu betonowego (RC – *Reclaimed Concrete*) oraz kruszywa naturalnego z recyklingu (RA – *Reclaimed Aggregate*) o zmiennej ilości.

Przedmiotem badań była ocena właściwości reologicznych recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie ilości dozowania destruktów (RAP, PA, PC) w przedziale od 20% do 80% z krokiem co 20%. Badanie modułu zespolonego przeprowadzono dla pięciu wartości temperatur (-7°C, 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). Moduł zespolony zbadano w teście bezpośredniego ściskania i rozciągania próbek cylindrycznych (DTC-CY – *Direct Tension-Compresion Test on Cylindrical Samples*) zgodnie z wymaganiami normy EN 12697-26. Na podstawie uzyskanych wyników badań dokonano oceny modułu zespolonego (E^*), kąta przesunięcia fazowego (φ) oraz składowych modułu zespolonego (E_1) oraz (E_2). Stwierdzono, że istnieje potencjalna możliwość utylizacji materiałów odpadowych w składzie recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej na zimno z asfaltem spienionym bez większego wpływu na jej parametry mechaniczne.

1. Wstęp

Technologia recyklingu głębokiego na zimno jest stosowana do przebudowy dróg w Polsce [1, 2], jak i na świecie [3A, 4A]. Możliwość stosowania tego rozwiązania w szerokim zakresie obciążenia nadaje mu uniwersalny charakter. Technologia recyklingu głębokiego stosowana jest zarówno do wykonywania dolnych warstw konstrukcyjnych, jak i podbudowy zasadniczej [3, 4]. Ukształtowanie krzywej uziarnienia umożliwia użycie materiałów odpadowych w postaci pyłów mineralnych [5] w ilości od 5% do 20% w składzie mieszanki mineralnej. Pozytywne aspekty zastosowania podbudowy recyklowanej w układzie warstw w porównaniu do tradycyjnych technologii wynikają z jej sztywności. Podbudowy z kruszywa niezwiązanego charakteryzują się niższą kohezją oraz sztywnością, natomiast w podbudowach związanych spoiwem hydraulicznym sztywność jest znacznie wyższa i może powodować powstawanie spękań odbitych. Taka charakterystyka recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym w zakresie modułu sztywności przekłada się na większą niezawodność wykonanej konstrukcji.

Występujące w konstrukcji nawierzchni drogowej warstwy wykonywane są w różnorodnych technologiach [6]. W podbudowie drogowej mogą występować takie rodzaje mieszanek, jak mieszanka z kruszywa niezwiązanego, mieszanka z kruszywa związanego spoiwem hydraulicz-

nym (beton cementowy) oraz podbudowy z betonu asfaltowego. W przypadku procesu recyklingu ilość materiału poddanego przetworzeniu w technologii „in situ" może być zmienna. Ilość materiału, który może zostać wykorzystany do wykonania podbudowy, będzie uzależniona od ukształtowania drogi w profilu w stosunku do „starego" przebiegu drogi oraz od ograniczeń prawnych, tj. skrajni drogowej. Dlatego też niezbędne wydaje się określenie właściwości lepkosprężystych recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym oraz zmienną ilością materiałów odpadowych i z recyklingu, tj. destruktu asfaltowego (RAP), destruktu betonowego (RC) oraz kruszywa naturalnego z recyklingu (RA).

2. Cel i zakres badań

Głównym celem badań było określenie charakteru lepkosprężystego w LVE (*Linear Visco-Elastic*) recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie ilości zastosowanego w składzie mieszanki mineralnej: destruktu asfaltowego (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*), destruktu betonowego (RC – *Reclaimed Concrete*) oraz kruszywa naturalnego z recyklingu (RA – *Reclaimed Aggregate*). Możliwość oceny zmian zachowań lepkosprężystych recyklowanej podbudowy uzyskano dzięki wyznaczeniu modułu zespolonego E* oraz jego modelowaniu przy założeniu, że recyklowana mieszanka jest materiałem termoreologicznie prostym. Badanie modułu zespolonego przeprowadzono dla pięciu wartości temperatur (-7°C, 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). Moduł zespolony zbadano w teście bezpośredniego ściskania i rozciągania próbek cylindrycznych (DTC-CY – *Direct Tension-Compresion Test on Cylindrical Samples*) zgodnie z wymaganiami normy EN 12697-26.

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

3. Przygotowanie próbek i przebieg badań

3.1. Składniki i projekt mieszanki mineralnej FB-RCM

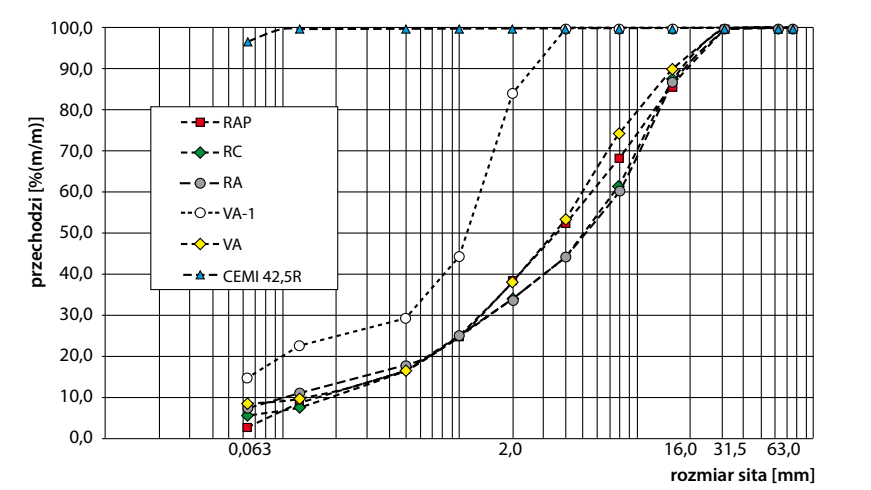
Projekt mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym (FB) przeznaczonej do recyklowanej podbudowy (RCM) został przygotowany z użyciem zmiennej ilości następujących materiałów odpadowych i z recyklingu:

- kruszywo z podbudowy zasadniczej, tj. **kruszywo naturalne z recyklingu (RA)**
- kruszywo z recyklingu, tj. **destrukt asfaltowy (RAP)**
- kruszywo z recyklingu, tj. **destrukt z betonu cementowego (RC)**

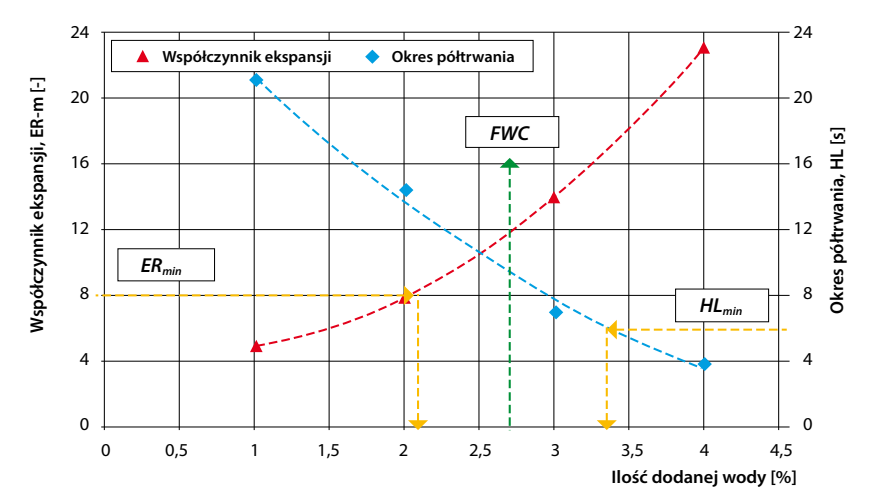
Ilość materiałów odpadowych w składzie podbudowy wynosiła od 20% do 80% z krokiem zmian co 20%. Analiza składu granulometrycznego materiałów odpadowych wykonana została zgodnie z normą EN 933-1. Wynik analizy sitowej przedstawiono na rysunku 1.

Przydatność asfaltu drogowego 50/70 określono według planu eksperymentu, zgodnie z metodyką stosowaną przez autorów prac [7, 8]. Optymalną ilość wody niezbędną do uzyskania piany asfaltowej określono zgodnie z wymaganiami wytycznych [3]. Wynik z oceny przedstawiono na rysunku 2.

Destrukty (RAP, RC, RA) oraz kruszywo doziarniające (VA – *Virgin Aggregate*) charakteryzują się ciągłą krzywą uziar-



Rys. 1. Uziarnienie materiałów stosowanych w recyklowanej mieszance na zimno FB-RCM



Rys. 2. Parametry spieniania asfaltu 50/70 (parametry optymalne: temperatura asfaltu 145°C; ciśnienie 400 kPa)

nienia o maksymalnym rozmiarze ziarna „D" równym 31,5 mm. W celu zapewnienia wymaganego rozmiaru ziarna w próbce Marshalla [9] materiały mineralne zostały przesiane przez sito # 22,4 mm. Tak przygotowane składniki pozwoliły na zaprojektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych na zimno z asfaltem spienionym, a ich udział procentowy przedstawiono w tabeli 1.

W efekcie uzyskano następujące mieszanki cementowe z asfaltem spienionym (FB-RCM):

- destrukt z betonu cementowego:
  - FB-RCM 20% RC + 80% VA (20% RC + 80% VA)
  - FB-RCM 40% RC + 60% VA (40% RC + 60% VA)
  - FB-RCM 60% RC + 40% VA (60% RC + 40% VA)
  - FB-RCM 80% RC + 20% VA (80% RC + 20% VA)
- destrukt asfaltowy:
  - FB-RCM 20% RAP + 80% VA (20% RAP + 80% VA)
  - FB-RCM 40% RAP + 60% VA (40% RAP + 60% VA)
  - FB-RCM 60% RAP + 40% VA (60% RAP + 40% VA)
  - FB-RCM 80% RAP + 20% VA (80% RAP + 20% VA)
- kruszywo z recyklingu:
  - FB-RCM 20% RA + 80% VA (20% RA + 80% VA)
  - FB-RCM 80% RA + 20% VA (80% RA + 20% VA)

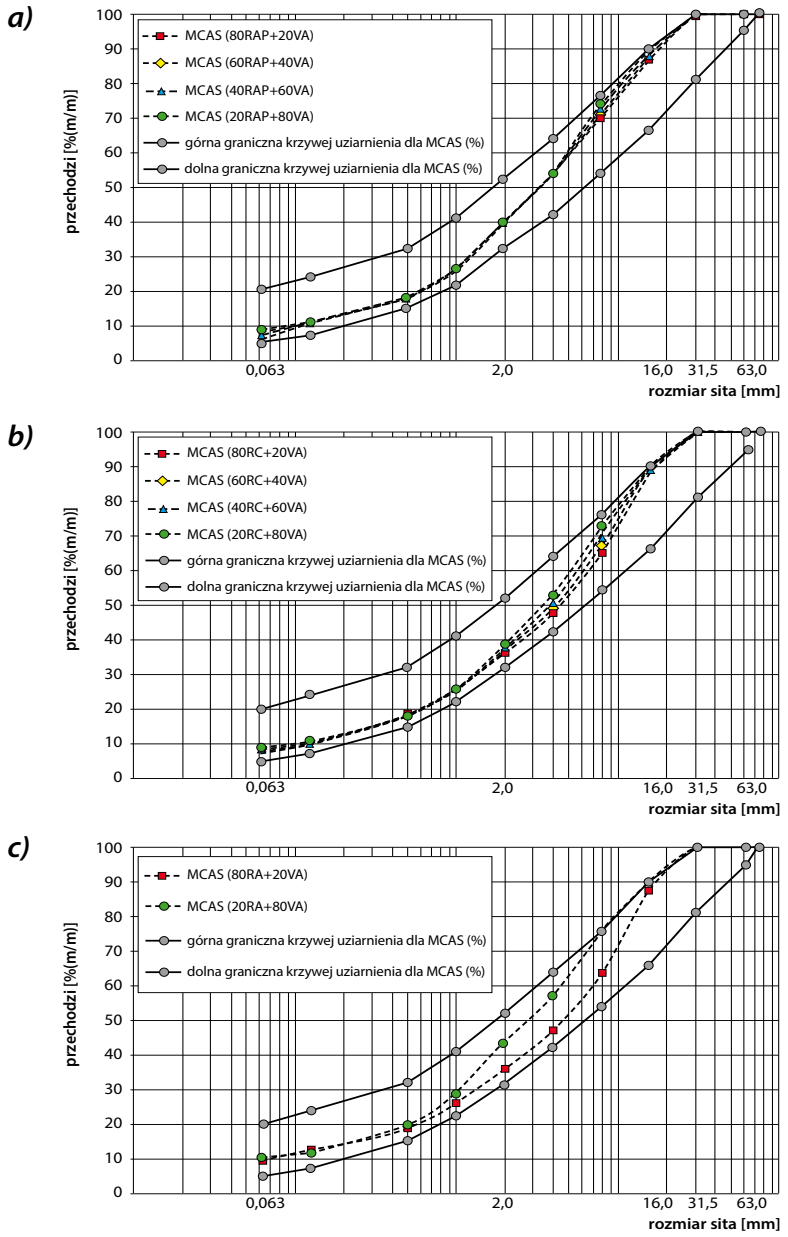
W przypadku recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym z kruszywem z recyklingu ograniczono ilość mieszanek do skrajnej z ilością 20% i 80% materiału odpadowego. Wynikało to z faktu zbliżonego rodzaju kruszywa doziarniającego (VA) oraz z recyklingu (RA). Przebieg projektowanych krzywych uziarnienia mieszanek mineralnych przedstawiono na rysunku 3.

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

Próbki do badań przygotowano w warunkach laboratoryjnych w mieszarce WLM30, natomiast piana asfaltowa wy-

	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		

Tabela 1. Plan eksperymentu dla kruszyw z recyklingu w zakresie zastosowania w składzie recyklowanej podbudowy



Rys. 3. Krzywe uziarnienia FB-RCM: a) z destruktem asfaltowym (RAP), b) z destruktem z betonu cementowego (RC), c) z kruszywem z recyklingu (RA)

tworzona 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 wg metody Proctora. Wyniki z przeprowadzonego badania przedstawiono w tabeli 2.

Mieszanka	Metoda badania	j.m.	OMC
FB-RCM 20% RAP + 80% VA	EN 13286-2	%	6,6
FB-RCM 40% RAP + 60% VA			6,1
FB-RCM 60% RAP + 40% VA			5,8
FB-RCM 80% RAP + 20% VA			5,6

Tabela 2. Właściwości asfaltu drogowego 50/70

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 [9].

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 [3].

Po uzyskaniu jednorodnej mieszaniny próbki poddano procesowi zagęszczania w prasie żyratorowej zgodnie z wymaganiami normy [10]. Parametry ustawień prasy żyratorowej określono na podstawie analizy literatury [11, 12].

Pielęgnacja próbek przeprowadzona została zgodnie z metodyką opisaną w wytycznych [13], z tą różnicą, że w przypadku próbek recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym (FB-RCM) pielęgnacja obejmowała metodykę jak dla próbek przeznaczonych do określenia właściwości po 28 dniach pielęgnacji. Wydłużony okres pielęgnacji wynika z faktu, iż próbki FB-RCM zawierają w swoim składzie cement portlandzki, którego parametry wytrzymałościowe wpływają na zmianę modułu zespolonego recyklowanej mieszanki [14]. Próbki recyklowanej podbudowy przechowywano w warunkach umożliwiających zachowanie wilgotności od 40% do 70% przez 28 dni zgodnie z wymaganiami określonymi w wytycznych [13].

Po procesie kondycjonowania próbki recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym zostały docięte do średnicy D = 100 mm w celu przeprowadzenia badania modułu sztywności w teście (*DTC-CY – Direct Tension-Compresion Test on Cylindrical Samples*) zgodnie z wymaganiami normy EN 12697-26. Wycięcie próbki było wymagane w celu zapewnienia minimalnych stosunków średnicy D do wysokości H. Proces przygotowania próbek, tj. odwierty, przedstawiono na rysunku 4.

Odwiert próbek wykonano po 28 dniach pielęgnacji w celu zniwelowa-

Rys. 4. Odwiert próbek recyklowanej podbudowy FB-RCM

nia uszkodzeń, które mogły wystąpić w czasie wiercenia. Podczas tej czynności niezbędne było użycie wody, która umożliwiała łatwiejszy postęp prowadzonych wierceń. Skutkowało to jednak nasączaniem próbek wodą, która przed badaniem powinna zostać usunięta. Przyjęto, że badania modułu zespolonego rozpoczęto w momencie, kiedy próbki, kondycjonowane w temperaturze 40°C, uzyskały stałą masę (różnica podczas pierwszego i drugiego ważenia nie była większa niż 1%). Po spełnieniu warunku przeprowadzono badania w zakresie zmian właściwości lepkosprężystych (LVE) w aspekcie ilości materiału odpadowego w składzie recyklowanej podbudowy.

3.3. Badanie modułu zespolonego (E*)

Badanie modułu sztywności (E*) recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym przeprowadzono w teście DTC-CY (*Direct Tension-Compresion Test on Cylindrical Samples*) zgodnie z wymaganiami normy EN 12697-26. W przypadku wszystkich mieszanek mineralnych, w których stosowane jest lepiszcze asfaltowe, w ich zachowaniu ujawniają się właściwości lepkosprężyste [15, 16]. Parametry, które w dobry sposób opisują reologiczne właściwości recyklowanej mieszanki z asfaltem spienionym to moduł zespolony *(E*)* oraz kąt przesunięcia fazowego *(φ)*. Dzięki dalszym obliczeniem wykorzystującym oba powyższe parametry możliwe jest określenie części sprężystej (E_1) oraz części lepkiej (E_2) jako składowych modułu zespolonego *(E*)*. Ich analiza umożliwi w sposób jednoznaczny określenie wpływu ilości RAP na charakterystykę lepkosprężystą recyklowanej podbudowy.

W metodzie bezpośredniego ściskania i rozciągania (DTC-CY) próbka poddana zostaje cyklicznemu sinusoidalnemu obciążeniu, które powoduje wywołanie małej wartości odkształcenia w granicach od 25 do 50 $\mu\varepsilon$ [11, 17, 27]. Badanie przeprowadzone poza tym zakresem odkształcenia może powodować powstawanie w badanej próbce odkształceń nieodwracalnych, które mogą generować błędy w odczycie modułu zespolonego.

4. Rezultaty wyników badań

4.1. Wyniki badań modułu zespolonego (E*) oraz kąta przesunięcia fazowego (φ)

Wyniki badań modułu zespolonego oraz kąta przesunięcia fazowego dla recyklowanej podbudowy, w której składzie zastosowano destrukt asfaltowy (RAP), przedstawiono na rysunku 5.

Podstawowym celem badań była ocena wpływu ilości destruktu asfaltowego na właściwości termoreologiczne czterech mieszanek recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym o zmiennej ilości destruktu asfaltowego od 20% do 80% z krokiem wzrostu dodatku w składzie podbudowy co 20%. Oddziaływanie na recyklowaną podbudowę RCM zmiennym czasem obciążenia i różną temperaturą uwypukla wpływ ilości materiału odpadowego na zachowanie podbudowy w liniowym zakresie lepkosprężystości. Wielu badaczy podejmuje tematykę oceny wpływu ilości RAP na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wykonywanych na zimno oraz na gorąco [18, 19].

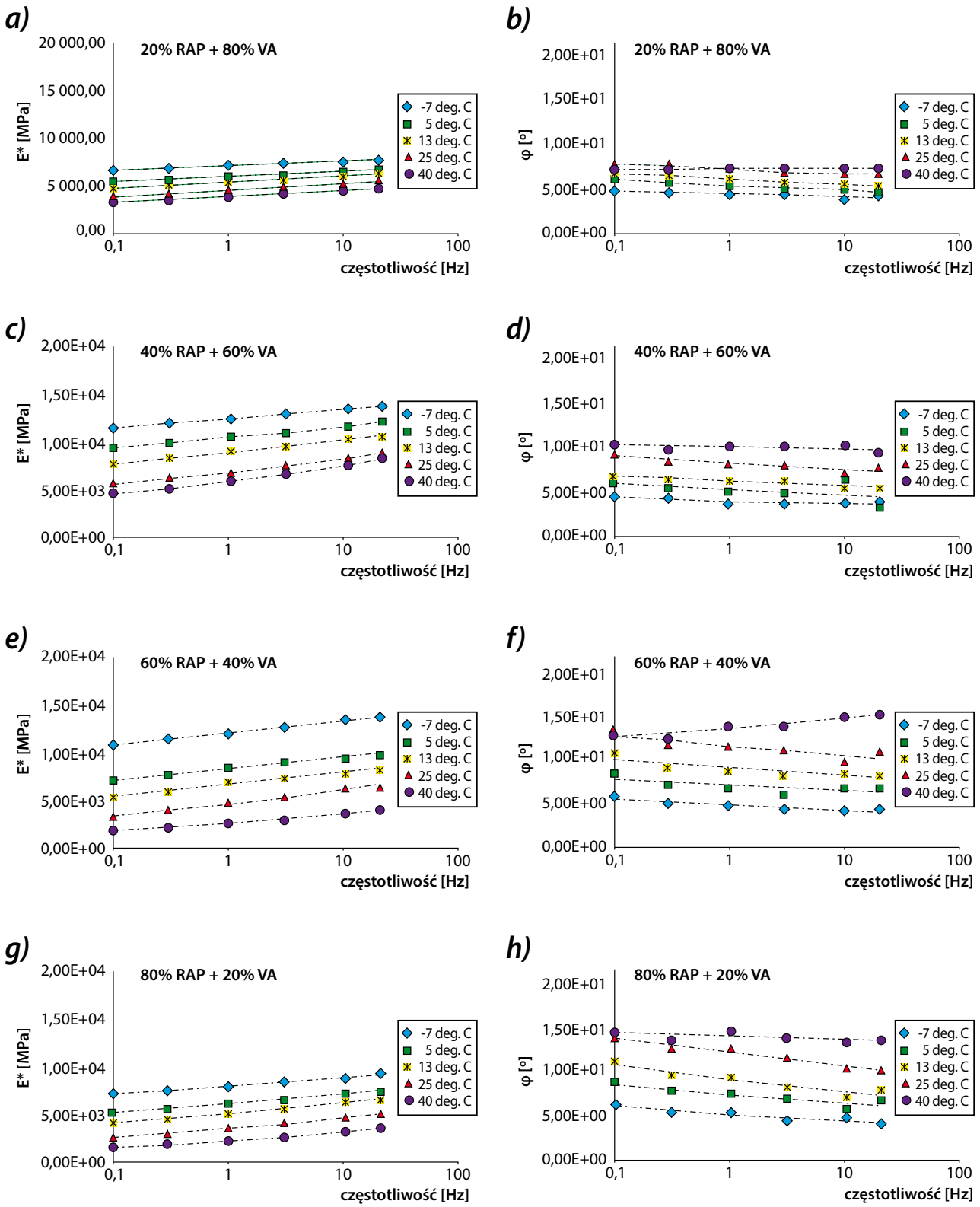
Sztywność mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym wzrastała wraz z inkrementacją częstotliwości i spadkiem temperatury, natomiast odwrotne jej zachowanie zaobserwowano przy spadku częstotliwości i wzroście temperatury badania. Takie same zależności wykazali w swoich badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych autorzy prac [11, 17]. We wszystkich przypadkach minimalną wartość modułu zespolonego (E*) uzyskano przy temperaturze badania 40°C oraz w czasie obciążenia 0,1 Hz, natomiast najwyższą wartość modułu stwierdzono przy temperaturze -7°C oraz częstotliwości 20 Hz. Wartość kąta przesunięcia fazowego w powiązaniu z modułem zespolonym (E*), niezależnie od rodzaju mieszanki, kształtowała się w przedziale od 4° do 15°.

Analiza literatury [20] wykazała, że wyniki badań (E*) dla mieszanki, w której zastosowano 3,0% emulsji asfaltowej oraz 2,0% cementu portlandzkiego, 32,5 R, 80% RA, 20% VA, odznaczają się dużą zbieżnością w porównaniu do badań przedstawionych na rysunku 5 dla mieszanki FB-RCM 80% RAP + 20% VA.

Mieszanka, w której zastosowano RAP w ilości 20%, uzyskała wartość maksymalnego modułu zespolonego (E*) podobną do mieszanki z ilością destruktu asfaltowego równą 80%. Taka zależność występuje, gdy dokonuje się oceny właściwości reologicznych w niskich temperaturach, które odpowiadają krótkiemu czasowi obciążania. Wzrost temperatury ujawnia, w przypadku mieszanki zawierającej większą sumaryczną ilość asfaltu (z piany asfaltowej i destruktu asfaltowego – 80% RAP + 20% VA), szybsze tempo spadku modułu w porównaniu do mieszanki 20% RAP + 80% VA. Należy również podkreślić, że uzyskanie w obydwóch mieszankach (80% RAP + 20% VA oraz 20% RAP + 80% VA) początkowej wartości modułu zespolonego na poziomie około 8000 MPa nie świadczy o podobnej charakterystyce lepkosprężystej. W tym przypadku korzystniejsze właściwości uzyskuje mieszanka, w której zastosowano mniejszą ilość destruktu, tj. 20%.

Odmienne zachowanie zaobserwowano w mieszankach, w których zastosowano 40% RAP oraz 60% RAP. Mieszanki te charakteryzują się maksymalną wartością modułu zespolonego powyżej 13000 MPa (w -7°C oraz 20 Hz), natomiast wykazują one bardzo odmienne zachowanie w zakresie liniowej lepkosprężystości. Mieszanka z 40% RAP wykazuje mniejszy spadek wartości modułu zespolonego zarówno w wysokich, jak i niskich temperaturach. W przypadku mieszanki z 60% RAP, recyklowana podbudowa wykazuje zachowanie zbieżne z mieszanką, w której zastosowano maksymalną ilość destruktu (80% RAP + 20% VA), pomimo wysokiej wartości początkowej modułu zespolonego (E*).

Zaobserwowano zależność, która pozwala stwierdzić, że wzrost ilości RAP w składzie mieszanki recyklowanej podbudowy w istotny sposób wpływa na właściwości reologiczne. Zmiana modułu



Rys. 5. Krzywe modułu zespolonego (E*) oraz kąta przesunięcia fazowego dla RCM i ilości RAP

zespolonego (E*) nie jest wprost proporcjonalna do ilości RAP w składzie RCM.

Stwierdzone zmiany wartości modułu zespolonego (E*) oraz zmiany kąta przesunięcia fazowego (φ) wynikają z termoreologicznego zachowania lepiszcza asfaltowego, występującego w mieszance w postaci mastyksu. Mastyks w recyklowanej mieszance na zimno z asfaltem spienionym powstaje z połączenia pyłu mineralnego, drobnych frakcji piaskowych oraz asfaltu spienionego. Zapewnienie optymalnej ilości pyłu mineralnego w składzie recyklowanej mieszanki z asfaltem spienionym daje możliwość prawidłowego usieciowania mieszanki FB-RCM za pomocą sieci rozproszonej w postaci „nici asfaltu" połączonych z pojedynczymi skupiskami mastyksu [5].

5. Wielowymiarowa analiza obecności materiałów odpadowych w mieszance MCAS

5.1. Mieszanki mineralno-cementowe z asfaltem spienionym

Plan eksperymentu przewidywał wykonanie serii badań na próbkach mieszanek recyklowanych MCAS i przyporządkowanie ich do odpowiednich typów. Przedstawione opracowanie stanowi uogólnienie analiz zaprezentowanych w pierwszej części artykułu. Główną intencją eksperymentu było przeprowadzenie badań z wykorzystaniem jednego przebiegu krzywej uziarnienia. W związku z tym podstawowy szkielet mineralny recyklowanej mieszanki pozostawał taki sam. Zmiennymi były kombinacje udziałów odpadowych materiałów doziarniających lub ilości pyłów mineralnych. Schemat typów mieszanek oraz założenia w postaci ilości materiałów odpadowych przedstawiono w tabeli 3.

Ilość cementu (tab. 3) była ustalona na poziomie przeciętnym z zalecanego przedziału [1]. Natomiast w mieszankach recyklowanych ilość asfaltu spienionego ustalona była również na poziomie średnim i wynosiła 2,5%. Wyjątek został wprowadzony w przypadku mieszanek recyklowanych zawierających pyły mineralne. Materiał pochodzący z recyklowanej nawierzchni (RAP) musiał zostać przebadany pod kątem jakości wg WT-2/2010 [21].

5.2. Badania i kryteria

Wszystkie mieszanki mineralno-cementowe z asfaltem spienionym (MCAS) charakteryzowały się odpowiednimi parametrami fizycznymi oraz mechanicznymi. Do oceny mieszanki MCAS z materiałami odpadowymi wykorzystano wszystkie uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań, tj. następujący zbiór parametrów:

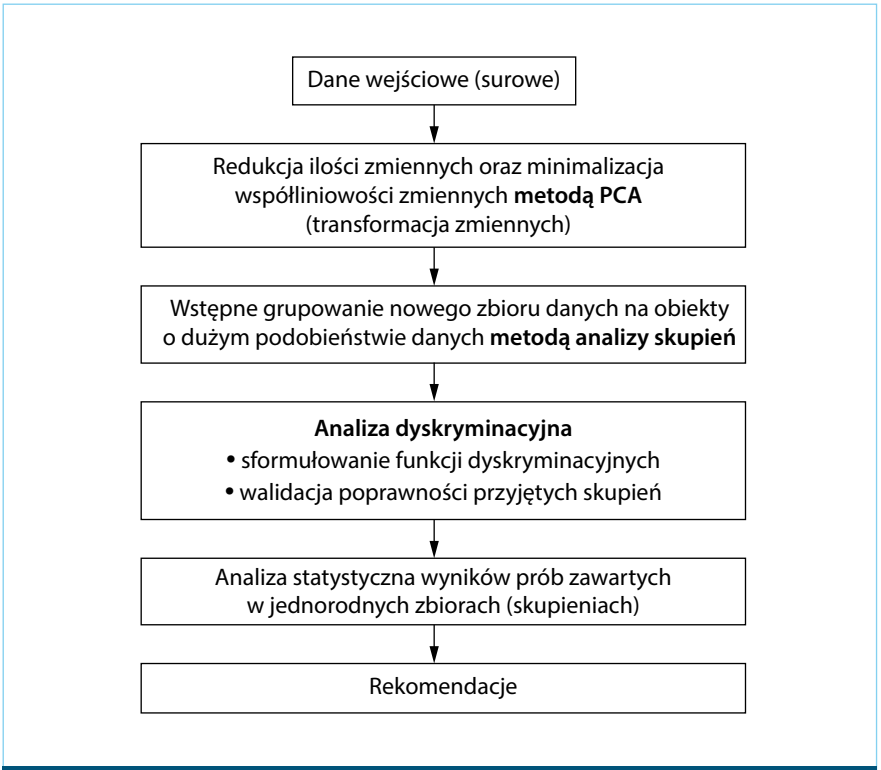
- zawartość wolnych przestrzeni (V_m) wg PN-EN 12697-8,
- nasiąkliwość (N_w),
- gęstość objętościowa ρ_{SSD} wg PN-EN 12697-6,
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS) wg PN-EN 12697-23 oraz [22],
- zespolony moduł sztywności E* (DTC-CY) wg PN-EN 12697-26 D,
- odporność na działanie wody TSR wg AASHTO T283 [23],
- odporność na działanie wody W_{RW-2M} po dwóch cyklach zamrażania (metoda zmodyfikowana) wg [24, 25].

5.3. Analiza wielowymiarowa

W obecnym czasie w inżynierii materiałowej trudno jest prowadzić złożone analizy bez wykorzystania wielowymiarowych technik eksploracji danych. Przy tego typu opracowaniach obowiązuje zaawansowany formalizm matematyczny oraz procedury iteracyjne wykorzystujące duże macierze

Rodzaj mieszanki	Typ 1 (D/P/A)	Typ 2 (B/P/A)	Typ 3 (RAP/SG)	Typ 4 (RAP/VA)	Typ 5 (RC/VA)	Typ 6 (RA/VA)
Ilość asfaltu (A)	1,2%; 2,4%; 3,6%	1,2%; 2,4%; 3,6%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
Ilość cementu (C)	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Ilość pyłów doziarniających (P)	5%; 12,5%; 20% Dolomitowe (D)	5%; 12,5%; 20% Bazaltowe (B)	–	–	–	–
Ilość żużla stalowniczego (SG)	–	–	50%	–	–	–
Ilość dolomitowego kruszywa doziarniajacego (VA)	–	–	–	80%; 60%; 50%; 40%; 20%	80%; 60%; 40%; 20%	80%; 20%
Ilość destruktu asfaltowego (RAP)	–	–	50%	20%; 40%; 50%; 60%; 80%	20%; 40%; 60%; 80%	–
Ilość kruszywa recyklowanego (RA)	–	–	–	–	–	20%; 80%

Tab. 3. Typy mieszanek recyklowanych MCAS z materiałami odpadowymi



Rys. 6. Schemat blokowy analizy wielowymiarowej

liczb. Wielowymiarową analizę statystyczną zbioru danych recyklowanych mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym, wzbogaconych o materiały odpadowe, wykonano przy wykorzystaniu pakietu STATISTICA [26]. Użyto w niej 3150 pojedynczych oznaczeń z podziałem na 35 rodzajów parametrów. Obecność tak dużej liczny danych oraz dużej liczby mieszanek o zróżnicowanym składzie powoduje, że określenie prawidłowości, jakie zachodzą w zbiorach danych jest priorytetowe. Obecność pewnych skupień w analizowanym zbiorze danych oraz ogólnych prawidłowości w nim występujących było niezwykle cenne choćby z punktu widzenia określenia rekomendacji i kryteriów w projektowaniu. Algorytm postępowania całego procesu wnioskowania przedstawiono na schemacie blokowym (rysunek 6).

5.4. Analiza składników grupowych

Redukcję wymiaru sytuacji problemowej zrealizowano metodą PCA. Jej celem było poszukiwanie liniowych funkcji transformacyjnych wiążących największą możliwą liczbę zmiennych, które wykazywały najwyższą korelację względem siebie. Wskutek dokonanej analizy zredukowano obecność wszystkich zmiennych początkowych do poziomu 4 nowych zmiennych. Należy zwrócić uwagę, że po procesie redukcji zmiennych największym skorelowaniem pierwszej zmiennej (Z1) odznaczały się wszystkie rezultaty modułu sztywności sprężystej (E*) oraz zdecydowana większość parametru kąta przesunięcia fazowego (δ). Ten czynnik wyjaśniał niemal 57% ogólnej zmienności całego zbioru danych. Czynnik Z1 był w istocie odpowiedzialny za charakterystykę reologiczną w zakresie liniowej lepkosprężystości mieszanek recyklowanych. Druga zmienna (Z2) była silnie skorelowana z zawartością wolnych przestrzeni (V_m), nasiąkliwością (N_w), a umiarkowanie związana z wytrzymałością na pośrednie rozciąganie (ITS) oraz lepkim zachowaniem próbek mieszanek recyklowanych w wysokiej temperaturze w oparciu o pomiar (δ). Z2 wyjaśnia około 21% zmienności całej zbiorowości. Kolejna zmienna (Z3) była skorelowana z parametrami odpowiedzialnymi za wodoodporność obecnych próbek recyklowanych mieszanek. Jej wkład w wyjaśnienie całej zmienności w danej zbiorowości wynosił zaledwie około 6% i był prawdopodobnie związany z małą wrażliwością zbioru próbek mieszanek recyklowanych MCAS z materiałami odpadowymi na działanie wody. Ostatnia zmienna (Z4) wyjaśniła tylko 2,2% zmienności zbioru danych i jest skorelowana głównie z relacją gęstości objętościowej próbek mieszanek recyklowanych do wodoodporności. Zauważalny, choć niewielki, wkład zmienności czynnika Z4 był prawdopodobnie spowodowany obecnością „ciężkiego" kruszywa żużla stalowniczego. Uzyskanie zmiennych ujmujących globalnie zbiór efektów stanowiło silne narzędzie do interpretacji późniejszych rezultatów oraz posłużyło w procesie grupowania obiektów badań w zbiorze danych próbek mieszanek recyklowanych.

5.5. Analiza skupień

Wybór odpowiednich zmiennych był niezwykle ważny w analizie skupień. Dlatego też poprzedni proces wyodrębnienia głównych składowych stanowił kwestię zasadniczą. Bardzo istotny był wybór tych zmiennych, które najlepiej różnicują zbiorowość próbek recyklowanych mieszanek MCAS z materiałami odpadowymi. Poprzedni etap analizy miał na celu eliminację punktów odstających oraz minimalizację współliniowości nowych zmiennych. Obecny etap związany z grupowaniem został wykonany na bazie nowych czterech zmiennych czynnikowych (od Z1 do Z4), a pośrednio na zmiennych rzeczywistych będących oznaczeniami parametrów próbek mieszanek recyklowanych. Ostatecznie do dalszej analizy przyjęto trzy grupy. W tabeli poniżej przedstawiono typy recyklowanych mieszanek MCAS, których

Grupa 1	Grupa 2	Grupa 3
B/P5/A1,2	B/P5/A2,4	B/P5/A3,6
B/P12,5/A1,2	B/P12,5/A2,4	B/P12,5/A3,6
B/P20/A1,2	B/P20/A2,4	B/P20/A3,6
D/P5/A1,2	D/P5/A2,4	D/P5/A3,6
D/P12,5/A1,2	D/P12,5/A2,4	D/P12,5/A3,6
D/P20/A1,2	D/P20/A2,4	D/P20/A3,6
RAP50/SG50	RA20/VA80	RAP60/VA40
RAP40/VA60	RA80/VA20	RAP80/VA20
RC80/VA20	RAP20/VA80	RC40/VA60
	RAP50/VA50	
	RC20/VA80	
	RC60/VA40	

Tab. 4. Lista przypadków typów mieszanek recyklowanych wstępnie zakwalifikowanych do skupień (grupy)

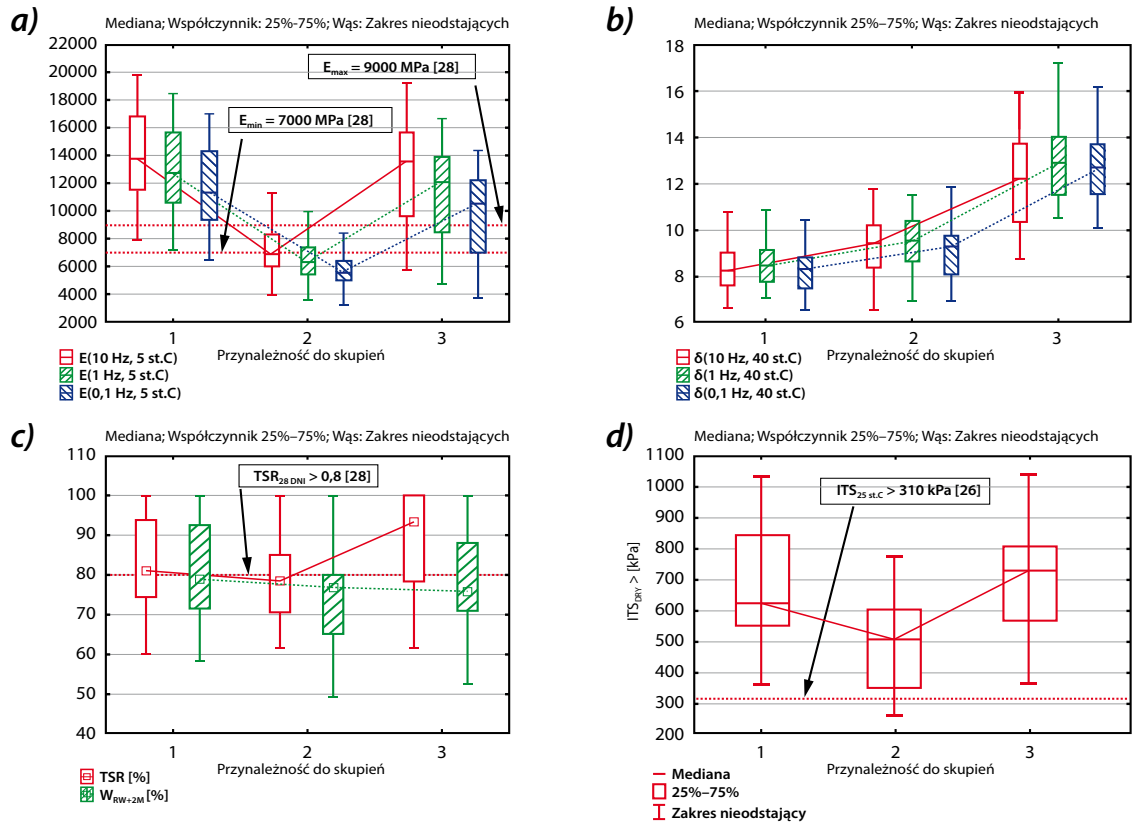
liczba próbek była najliczniejsza w danej grupie (tab. 4).

Przykładowe oznaczenie RAP20/VA80 określa zastosowanie mieszanki mineralnej RAP w ilości 20% oraz kruszywa VA w ilości 80%. Natomiast w przypadku mieszanek z pyłami mineralnymi sygnatura D.P12,5/A1,2 oznacza mieszankę recyklowaną z zawartością 12,5% pyłów mineralnych dolomitowych (D) oraz 1,2% asfaltu spienionego. Zaprezentowane grupowanie dostarcza wstępnych informacji na temat pewnych czynników, które rozdzielają właściwości próbek recyklowanych mieszanek MCAS z materiałami odpadowymi.

Kolejnym etapem wielowymiarowego wnioskowania była statystyczna estymacja wyników w obrębie poszczególnych grup próbek recyklowanych w technologii MCAS z materiałami odpadowymi. Wybrane rezultaty parametrów, które zostały wykorzystane w analizie wielowymiarowej, przedstawiono na rysunku 7.

5.6. Analiza dyskryminacyjna

Ostatni etap wielowymiarowego wnioskowania statystycznego stanowiła analiza dyskryminacyjna. Jej głównym celem była identyfikacja matematycznych funkcji, które umożliwiają rozdzielenie uzyskanych skupień w grupy opisane



Rys. 7. Grupowanie mieszanek ze względu na: a) moduł sztywności (E) w temperaturze 5°C; b) kąt przesunięcia fazowego (δ) w temperaturze 40°C; c) wodoodporność (TSR oraz W_{RW+2M}); d) wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w 25°C (ITS)

Zmienna	Surowe współczynniki dla zmiennych kanonicznych	
	V_1	V_2
Z1	0,032485	-0,300443
Z2	0,694875	0,069673
Z3	-0,019345	0,112120
Z4	-0,395212	0,249668
Stała	0,000000	0,000000
Wartość własna	3,029339	1,066332
Skumulowana proporcja	0,739644	1,000000

Tab. 5. Surowe współczynniki funkcji kanonicznych

w poprzednim paragrafie. Funkcje dyskryminacyjne pozwalają również odpowiedzieć na pytanie, które zmienne najsilniej wpływają na przyporządkowanie danej mieszanki recyklowanej do jednej z trzech grup.

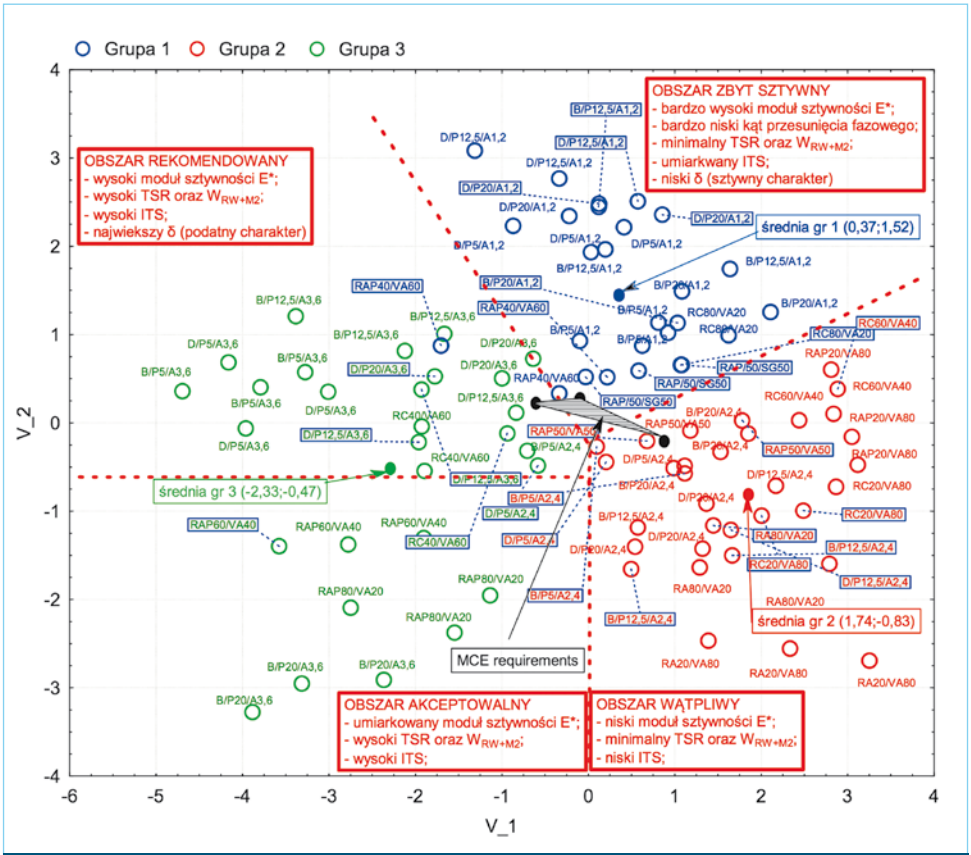
Ponadto analiza dyskryminacyjna miała za zadanie poddanie weryfikacji słuszności przyjętych grupowań obiektów badań. Surowe wartości istotnych funkcji kanonicznych wymaganych do końcowego określenia funkcji dyskryminacyjnych, ważnych z punktu widzenia kwalifikacji innych przypadków recyklowanych mieszanek MCAS z materiałami odpadowymi, przedstawiono w tabeli 5.

Całość analizy wielowymiarowej podsumowuje wykres rzutowania danych przypadków względem wartości dwóch funkcji kanonicznych. Umożliwia on globalną ocenę charakteru podziału zbiorowości i reguł obowiązujących w danym zbiorze próbek recyklowanych mieszanek z materiałami odpadowymi. Wykres rozrzutu wartości kanonicznych wraz z przypadkami recyklowanych mieszanek MCAS przedstawiono na rysunku 8.

W danym zadaniu zasadniczą kwestią jest określenie obszaru, w którym znajdą się przypadki mieszanek recyklowanych o najkorzystniejszych właściwościach. Analizując rezultaty przedstawione w tabeli 5 i wykres rzutowania pokazany na rysunku 8, należy dążyć do minimalizacji zmiennej pierwszej (V_1) oraz do maksymalizacji drugiej zmiennej kanonicznej (V_2). Taki obszar został oznaczony na rysunku 8 jako rekomendowany. Wszystkie obszary określono sugerując się przebiegiem funkcji kanonicznych. Jeżeli dokonamy odwrotnej optymalizacji, wówczas uzyskamy przykłady mieszanek recyklowanych o zaniżonej trwałości względem parametrów wykorzystanych w eksperymencie. Ostatecznie, opierając się na dotychczasowej analizie wielowymiarowej oraz uwzględniając funkcje klasyfikacyjne oraz zmienne czynnikowe, zaproponowano cztery obszary w płaszczyźnie wyznaczonej przez zmienne kanoniczne. Na rysunku 8 dodatkowo dokonano wstępnego rzutowania wymagań stawianych MCE w Polsce względem współrzędnych V_1 i V_2.

Podziękowania

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



Rys. 8. Wykres rozrzutu wartości kanonicznych

6. Wnioski

Analiza wyników badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Wzrost ilości destruktu asfaltowego (RAP) w ilości 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 zawartością 20% 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;
- Recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym, niezależnie od ilości destruktu asfaltowego, charakteryzują się wartością kąta przesunięcia fazowego od 5° do 15°;
- Skorzystanie z transformacji zmiennych metodą PCA umożliwiło redukcję zmiennych, które względem siebie były nieskorelowane, co stanowiło warunek konieczny do przeprowadzenia dalszych analiz wielowymiarowych;
- Zarekomendowano do stosowania mieszanki recyklowane z dodatkiem pyłów mineralnych z dużą ilością asfaltu oraz recyklowane mieszanki z dużą zawartością składnika RAP. Na podstawie dokonanej analizy wyników mieszanek MCAS można wnioskować, że należy ostrożnie rozważyć możliwość stosowania materiału typu RA w ilości większej niż 40%;
- Analizując rezultaty eksperymentu, należy dążyć, względem funkcji wyznaczonych w niniejszym opracowaniu, do minimalizacji pierwszej zmiennej oraz do maksymalizacji drugiej zmiennej kanonicznej;
- Obecność materiałów odpadowych w składzie mieszanek MCAS powoduje, że uzyskane przez nią parametry fizyczno-mechaniczne są korzystniejsze w porównaniu do tych, które charakteryzują tradycyjną mieszankę MCE. ■

Literatura

[1] Dołżycki B., *Polish experience with cold in-place recycling*, BESTInfra, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 236, IOP Publishing, 2017, <https://doi:10.1088/1757-899X/236/1/012089>.

[2] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., *Evaluation of the pavement performance*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences", 63(1), s. 97–105, 2015, [dostęp: 2 października 2017], <doi:10.1515/bpasts-2015-0011>.

[3] Wirtgen Cold Recycling Technology, Windhagen: Wirtgen GmbH, wyd. 1, 2012.

[4] Asphalt Academy, Technical guideline (TG2): Bitumen stabilized materials. Pretoria: CSIR Built Environment, wyd. 2, 2009.

[5] Iwański M., Buczyński P., Mazurek G., *The use of gabbro dust in the cold recycling of asphalt paving mixes with foamed bitumen*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 64(4), s. 763–773, 2016, <https://doi.org/10.1515/bpasts-2016-0085>.

[6] Katalog Typowych Konstrukcji Podatnych i Półsztywnych 2014.

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

[8] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K., *Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters*, „Construction and Building Materials", 83, s. 62–69, 2015.

[9] Piłat J., Radziszewski P., *Nawierzchnie asfaltowe*, WKŁ, 2010.

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

[11] Godenzoni C., Graziani A., Perraton D., *Complex modulus characterisation of coldrecycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt*, „Road Materials and Pavement Design", vol. 18, nr 1, s. 130–150, 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1142467>.

[12] Grilli A., Graziani A., Bocci M., *Compactability and thermal sensitivity of cement-bitumen treated materials*, „Road Materials and Pavement Design", 13(4), s. 599–617, 2012.

[13] Dołżycki B., *Guidelines for Design and Paving of Mineral-Cement-Emulsion Mixes*, MCE, Gdańsk, 2013.

[14] 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, Litwa, 27–28 kwietnia 2017.

[15] Grilli A., Graziani A., Bocci M., *Compactability and thermal sensitivity of cement-bitumen treated materials*, „Road Materials and Pavement Design", 13(4), s. 599–617, 2012.

[16] Sánchez D. B., Airey G. D., Grenfell J., *Moisture effects on the properties of RAP-foamed bitumen mixtures*, Tenth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRA 2017, Ateny, Grecja, <doi: 10.1201/9781315100333-186>.

[17] Gandi A., Carter A., Singh D., *Rheological behavior of cold recycled asphalt materials with different contents of recycled asphalt pavements*, „Innovative Infrastructure Solutions", 2: 45, 2017, <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0094-3>.

[18] Jiménez del Barco Carrión A., Lo Presti D., Pouget S., Airey G., Chailleux E., *Linear viscoelastic properties of high reclaimed asphalt content mixes with biobinders*, „Road Materials and Pavement Design", 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304253>.

[19] Król J., Kowalski K., Radziszewski P., *Rheological behavior of n-alkane modified bitumen in aspect of Warm Mix Asphalt technology*, „Construction and Building Materials", vol. 93, s. 703–710, 2015, <doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.033.>.

[20] Godenzoni C., Graziani A., Bocci M., *Influence of reclaimed asphalt content on the complex modulus of cement bitumen treated materials*, Proceedings of 6th international conference bituminous mixtures and pavements, Thessaloniki, Grecja, s. 589–596, Taylor & Francis Group, Londyn, 2015, ISBN 978-1-138-02866-1.

[21] WT-2/2010 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne, Załącznik Nr 2 do zarządzenia Nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r.

[22] Kim R. Y., *Asphalt Pavements*, CRC Press, 2014.

[23] AASHTO T283, Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage.

[24] Jaskuła P., Judycki J., *Durability of Asphalt Concrete Subjected to Deteriorating Effects of Water and Frost*, „Journal of Performance of Constructed Facilities", vol. 30, wyd. 1, 2016.

[25] Fakhri M., Ahmadi A., *Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles*, „Construction and Building Materials", 157, s. 748–756, 2017.

[26] Stanisz A., *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*, vol. III, StatSoft, 2006.

[27] PN-EN 12697-24 *Mieszanki mineralno--asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Sztywność.*

prof. dr hab. inż. Marek Iwański,
dr inż. Przemysław Buczyński,
dr inż. Grzegorz Mazurek,
Politechnika Świętokrzyska,
Katedra Inżynierii Komunikacyjnej

Efektywność ekonomiczna nawierzchni drogowych z asfaltami wysokomodyfikowanymi

W artykule zaprezentowano ocenę efektywności ekonomicznej nawierzchni wykonanych w technologii asfaltowej z zastosowaniem różnych lepiszczy asfaltowych i z różną grubością warstw. Pokazano również wpływ różnych scenariuszy eksploatacyjnych nawierzchni na jej efektywność ekonomiczną w cyklu życia.

Podstawą rozwoju gospodarczego we współczesnym świecie jest sprawnie działająca sieć drogowa umożliwiająca terminowy przewóz towarów oraz transport osób. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe powinny być budowane z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju oraz rachunku ekonomicznego. W wielu krajach UE, a także w Stanach Zjednoczonych Ameryki wybór rozwiązań technologicznych jest zwykle skutkiem analiz przeprowadzonych we wcześniej wspomnianych obszarach.

Wprowadzenie

W zakresie projektów drogowych realizowanych w Polsce wybór wariantów dotyczących sieci drogowej jest często prowadzony z uwzględnieniem analizy kosztów i korzyści (AKK, ang. *Cost-Benefit Analysis*, CBA). Tego rodzaju analizy są również wymagane przez ekspertów Unii Europejskiej w celu podjęcia decyzji o dofinansowaniu inwestycji. Analiza AKK służy do oceny efektywności inwestycji na podstawie całości przewidywanych kosztów i korzyści w badanej perspektywie czasowej. W takich opracowaniach, poza typowymi aspektami ekonomicznymi, uwzględnia się dodatkowo skwantyfikowane koszty społeczne i środowiskowe.

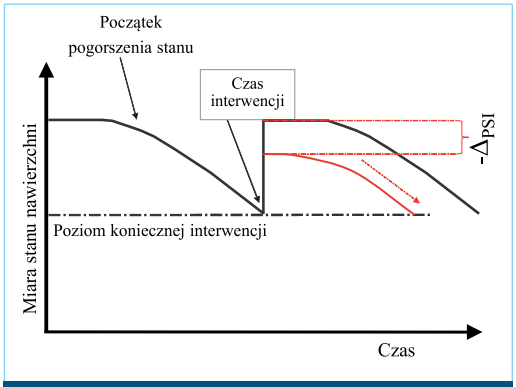
Ocena cyklu życia (LCA, ang. *Life-Cycle Assessment*) oraz analiza kosztu cyklu życia (LCCA, ang. *Life Cycle Cost Analysis*) są dość zbliżone i zwykle przyjmuje się, że LCA stanowi LCCA powiększoną o skwantyfikowane analizy środowiskowe. Istotą tych ocen jest zastosowanie szerokiego podejścia do badanego zagadnienia, obejmującego pełen cykl, tzn. od powstania poprzez eksploatację aż po zagospodarowanie odpadu. W USA analizy tego rodzaju są od wielu lat powszechnie podejmowane w zagadnieniach drogowych [LCCA 1998, LCCA 2002, LCCA 2005, LCCA 2015, LCCA 2016]. Zaznaczyć należy, że narzędzie LCA jest tam szeroko stosowane przez wiele zarządów dróg do wyboru technologii wykonania nawierzchni drogowych [AMCS 2003, AMCS 2007, AMCS 2010, NCHRP 2017].

Zarządzanie wartością obiektu (ang. *infrastructure asset management*) jest w wielu krajach powszechnie stosowaną strategią podejścia do zagadnień związanych z wyborem technologii budowy, prowadzeniem zabiegów utrzymaniowych i remontami dróg. W zakresie procesu zarządzania wartością istotne znaczenie odgrywa diagnostyka stanu dróg uogólniona do całej sieci drogowej. Ze względu na gromadzenie dużych ilości danych z zakresu różnych obszarów tematycznych związanych z drogami (koszty, natężenie ruchu, konstrukcja nawierzchni, dobór materiałów, cechy powierzchniowe i in.) istotnym staje się odpowiednia agregacja zebranych informacji i ich przetwarzanie. Oznacza to, że w niedalekiej przyszłości zagadnienie zarządzania wartością obiektu będzie stanowić istotny obszar działalności jednostek publicznych zajmujących się zarządzaniem siecią drogową.

W artykule przedstawiono ocenę efektywności ekonomicznej nawierzchni wykonanych w technologii asfaltowej z zastosowaniem różnych lepiszczy asfaltowych i z różną grubością warstw asfaltowych. Takie założenie wyjściowe pozwala sądzić, że cykl życia analizowanych wariantów konstrukcji nawierzchni będzie różny. Zgodnie z informacjami przedstawionymi na rysunku 1, stan nawierzchni będzie zmieniać się w trakcie jej eksploatacji; po przeprowadzonych zabiegach interwencyjnych ulegnie poprawie, jednak nie zawsze osiągnie stan pierwotny. W zakresie przedstawionej w artykule analizy zbadano wpływ różnych scenariuszy eksploatacyjnych nawierzchni na jej efektywność ekonomiczną w cyklu życia.

Charakterystyka analizowanych wariantów

Analizie techniczno-ekonomicznej poddano jeden wariant bezinwestycyjny (W0) oraz trzy warianty inwestycyjne (Wi). Wariant bezinwestycyjny (W0) jest definiowany jako wariant wyjściowy, do



Rys. 1. Zmiana stanu nawierzchni

którego będą porównywane pozostałe warianty inwestycyjne. Wariant bezinwestycyjny, jako punkt odniesienia, poddano ocenie na takim samym poziomie szczegółowości jak warianty inwestycyjne w celu zapewnienia możliwości ich porównania. Jako metodę obliczeniową zastosowano analizę kosztów i korzyści opartą na metodzie przyrostowej, w której porównuje się koszty wariantu bezinwestycyjnego z kosztami w wariantach inwestycyjnych [NK 2015].

W przypadku wszystkich wariantów W0 oraz Wi przyjęto wspólne założenia dotyczące lokalizacji i szczegółów technicznych przykładowej inwestycji drogowej oraz obciążenia ruchem. Założono, że długość odcinka drogowego wynosi 1 km i droga przebiega w terenie płaskim na obszarze pozamiejskim. Przyjęto, że warunki gruntowo-wodne we wszystkich analizowanych wariantach są dobre. W wariancie W0 przyjęto:

- Klasa drogi: GP (asfaltowa)
- Okres, na który pierwotnie projektowana była nawierzchnia: 20 lat
- Dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej przyjęte do projektowania nawierzchni: 115 kN
- Droga dwujezdniowa dwupasowa:
  - 2 x (7 m + 0,5 + 1,0 m)

W wariantach Wi przyjęto:

- Klasa drogi: S (asfaltowa)
- Okres projektowy: 30 lat
- Dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej przyjęte do projektowania nawierzchni: 115 kN
- Droga dwujezdniowa dwupasowa:
  - 2 x (7 m + 0,5 + 2,5 m)

W wariancie W0 założono, że opisuje on stan przykładowego odcinka drogowego, który na dzień rozpoczęcia analizy przenosi istniejący ruch drogowy. Wygenerowanie wariantu (W0) było niezbędne do obliczenia efektywności hipotetycznej inwestycji w wariantach Wi wg metodologii JASPERS [NK 2015]. W0 w założeniu jest wariantem istniejącym i dlatego na potrzeby analizy wprowadzono zapis o okresie projektowym 20 lat, który był przyjmowany według poprzedniej metodyki Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [KTKNPiP 1997]. Stan nawierzchni w roku rozpoczęcia analizy został przyjęty jako C (stan niezadowalający), co uzasadnia konieczność podjęcia działań remontowych i predestynuje do rozważań o nowej inwestycji.

W celu zapewnienia przejrzystości i porównywalności analizy prognozę ruchu przyjęto z przykładu drogi ekspresowej podanego w aktualnym Katalogu Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [KTKNPiP 2014].

Przyjęto trzy warianty inwestycyjne Wi o zróżnicowanej konstrukcji nawierzchni drogowej (tabela 1). Pierwszy (Wi0) to konstrukcja typowa A.1 przewidziana w KTKNPiP do ruchu KR6 [KTKNPiP 2014]. Wi0 jest wariantem inwestycyjnym porównawczym (referencyjnym). W pozostałych wariantach inwestycyjnych, oznaczonych symbolami Wi3 oraz Wi5, założono potencjalne pocienienie pakietu warstw ze względu na zastosowanie asfaltów wysokomodyfikowanych jako lepiszczy do mieszanek mineralno-asfaltowych. W wariancie Wi3 przewidziano zastosowanie klasycznego układu warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych z jednoczesną redukcją grubości każdej z warstw. Do wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych przewidziano zastosowanie asfaltów wysokomodyfikowanych. W wariancie Wi5 przewidziano zastosowanie odmiennego układu warstw niż w klasycznej konstrukcji nawierzchni drogowej. Wariant ten jest odzwierciedleniem „konstrukcji długowiecznej" (z ang. *perpetual*), gdzie zwiększa się sztywność i grubość warstwy wiążącej, a warstwę podbudowy znacznie pocienia się, traktując ją jako warstwę przeciwzmęczeniową. W celu zapewnienia podbudowie funkcji przeciwzmęczeniowej zastosowano w tej warstwie mieszankę o maksymalnym uziarnieniu 16 mm oraz miękki asfalt wysokomodyfikowany, który zazwyczaj jest stosowany do warstwy ścieralnej. Sumaryczna grubość warstw asfaltowych konstrukcji Wi5 w odniesieniu do wariantu Wi0 została zredukowana o 10%.

Scenariusze utrzymaniowe nawierzchni z asfaltami wysokomodyfikowanymi

We wszystkich wariantach od W0 do Win przyjęto wspólne założenia dotyczące czasu trwania analizy oraz obciążenia ruchem. Ewaluację przeprowadzono w horyzoncie czasowym 38 lat, w którym założono, że:

Warstwa nawierzchni	Grubości warstwy, cm Materiał		
	Wariant Wi0 typowa konstrukcja typ A.1 KR6	Wariant Wi3 -30%	Wariant Wi5 -10% *perpetual*
Redukcja grubości pakietu warstw asfaltowych	0%	-32%	-10%
Ścieralna	4 cm SMA 11 45/80-55	3 cm SMA 8 45/80-80	3 cm SMA 8 45/80-80
Wiążąca	8 cm AC 16 W 25/55-60	6 cm AC 16 W 25/55-80	15 cm AC 16 W 25/55-60
Podbudowa	16 cm AC 22 P 35/50	10 cm AC 22 P 25/55-80	7 cm AC 16 45/80-80

Tab. 1. Analizowane warianty konstrukcji nawierzchni drogowych

Rok eksploatacji	Wariant bezinwestycyjny W0			Okres międzyremontowy 10 lat									Okres międzyremontowy 12 lat						Okres międzyremontowy 15 lat					
				Wi0			Wi3			Wi5			Wi3			Wi5			Wi3			Wi5		
	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Sstan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy	Stan nawierzchni (A, B, C, D)	Remont okresowy	Remont cząstkowy
2017	C		Rcz	C			C			C			C			C			C			C		
2018	C		Rcz	C			C			C			C			C			C			C		
2019	C	Ro		C			C			C			C			C			C			C		
2020	A		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2021	A		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2022	A		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2023	B		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2024	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	A			A			A			A		
2025	C		Rcz	B			B			B			A			A			A			A		
2026	C	Ro		B			B			B			B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz
2027	B		Rcz	C		Rcz	C		Rcz	C		Rcz	B			B			B			B		
2028	B		Rcz	C			C			C			B			B			B			B		
2029	B		Rcz	C			C			C			C		Rcz	C		Rcz	B		Rcz	B		Rcz
2030	B		Rcz	D	Ro		D	Ro		D	Ro		C			C			B			B		
2031	C		Rcz	A			A			A			C			C			B			B		
2032	C		Rcz	A			A			A			D	Ro		D	Ro		C		Rcz	C		Rcz
2033	C	Ro		A			A			A			A			A			C			C		
2034	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	A			A			C			C		
2035	B		Rcz	B			B			B			A			A			D	Ro		D	Ro	
2036	B		Rcz	B			B			B			A			A			A			A		
2037	B		Rcz	C		Rcz	C		Rcz	C		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	A			A		
2038	C		Rcz	C			C			C			B			B			A			A		
2039	C	Ro		C			C			C			B			B			A			A		
2040	A		Rcz	D	Ro		D	Ro		D	Ro		B			B			A			A		
2041	A		Rcz	A			A			A			C		Rcz	C		Rcz	B		Rcz	B		Rcz
2042	A		Rcz	A			A			A			C			C			B			B		
2043	B		Rcz	A			A			A			C			C			B			B		
2044	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	B		Rcz	D	Ro		D	Ro		B		Rcz	B		Rcz
2045	C		Rcz	B			B			B			A			A			B			B		
2046	C	Ro		B			B			B			A			A			B			B		
2047	C		Rcz	C		Rcz	C		Rcz	C		Rcz	B			B			C		Rcz	C		Rcz
2048	B		Rcz	C			C			C			B			B			C			C		
2049	B		Rcz	C			C			C			C			C			C			C		
2050	B		Rcz	D	Rc		D	Rc		D	Ro		D	Rc		D	Ro		D	Rc		D	Ro	
2051	B		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2052	C		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2053	C		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		
2054	C		Rcz	A			A			A			A			A			A			A		

Ro – remont okresowy, Rcz – remont cząstkowy, Rc – remont całkowity

Tab. 2. Scenariusze utrzymania nawierzchni przy różnej długości okresów między remontami okresowymi

- pierwszy rok jest przewidziany na przygotowanie projektu w systemie „Projektuj i buduj" (1. rok analizy);
- na dwa kolejne lata przewidziana jest realizacja prac budowlanych;
- kolejne 30 lat to okres eksploatacji nawierzchni w odniesieniu do przewidywanego okresu projektowego nowych wariantów inwestycyjnych.

W analizie uwzględniono również pięcioletni okres po wyczerpaniu trwałości wynikającej z okresu projektowego. Jako bazowy przyjęto rok 2017. Zgodnie z wytycznymi JASPERS [NK 2015] przyjęto stopę dyskontowania na poziomie 4,5%.

W analizie zastosowano metodę szczegółową w odniesieniu do niektórych kosztów jednostkowych utrzymania infrastruktury, uciążliwości dla środowiska i eksploatacji pojazdów, uzależniając poziom kosztów od stanu nawierzchni. W poszczególnych wariantach w analizowanym horyzoncie czasowym oszacowano stan nawierzchni przypisując im odpowiedni stan w danym roku eksploatacji. Wykorzystano klasyfikację stanu nawierzchni wg SOSN (A, B, C, D) zgodnie z wytycznymi *Niebieskiej Księgi*. Choć obecnie GDDKiA wprowadziła system DSN (Diagnostyka Stanu Nawierzchni), w którym zmieniły się metody diagnostyczne, to jednak klasyfikację stanu dróg można przyjąć za tożsamą z systemem SOSN.

Wg wytycznych GDDKiA [SOSN 2002] wyznacza się trzy poziomy decyzyjne w zakresie technicznego stanu nawierzchni. Poziom pożądany obejmuje klasy A i B, poziom ostrzegawczy obejmuje klasę C, zaś krytyczny obejmuje klasę D. Poprzez klasy rozumie się:

- Klasa A – stan dobry,
- Klasa B – stan zadowalający,
- Klasa C – stan niezadowalający,
- Klasa D – stan zły.

W poziomie pożądanym znajdują się nawierzchnie nowe, odnowione oraz eksploatowane, których stan techniczny

nie wymaga planowania zabiegów remontowych w normalnych warunkach przez okres co najmniej 4 kolejnych lat. Poziom ostrzegawczy oznacza, że uzasadnione jest wykonanie co najmniej szczegółowych badań stanu technicznego nawierzchni w celu podjęcia decyzji o wykonaniu zabiegu poprawiającego jej kondycję. W przypadku poziomu krytycznego wymagane jest natychmiastowe zrobienie szczegółowych badań technicznych w celu wykonania takiego zabiegu [SOSN 2002].

W tabeli 2 przedstawiono symulacje częstotliwości zabiegów remontowych przy różnej długości okresów międzyremontowych. Do założonych częstotliwości poszczególnych zabiegów przyporządkowano zakładaną klasę stanu drogi, wynikającą z prognozowanego stanu nawierzchni w analizowanym horyzoncie czasowym, szczegółowo dla każdego z poszczególnych wariantów. W wariancie bezinwestycyjnym (W0) jako wyjściowy przyjęto stan niezadowalający i prognozowano, że na przestrzeni lat droga będzie remontowana. W wariancie W0 można zauważyć większą częstotliwość zmiany stanu nawierzchni niż w wariantach inwestycyjnych (Wi). W wariantach inwestycyjnych przez okres pierwszych trzech lat analizy stan nawierzchni jest określony jako C, ze względu na prowadzony w tym czasie proces inwestycyjny i jednoczesne przenoszenie ruchu przez nawierzchnię odniesienia, tj. W0. Pierwszy scenariusz utrzymaniowy Wi zakłada wykonanie prac remontowych po 10 latach eksploatacji. Kolejne scenariusze przewidują wykonanie pierwszych prac remontowych kolejno po 12. i 15. roku eksploatacji.

Przyjęte scenariusze podyktowane są wieloletnimi obserwacjami autorów dotyczącymi zmian stanu nawierzchni oraz prac prowadzonych w zakresie remontów okresowych i cząstkowych. Zaznaczyć należy, że zarówno w literaturze krajowej, jak i zagranicznej brak jest miarodajnych informacji dotyczących typowych scenariuszy utrzymaniowych nawierzchni.

W wariantach inwestycyjnych, w których występują warstwy z asfaltami wysokomodyfikowanymi zakłada się, że możliwe będzie wydłużenie okresów międzyremontowych, w porównaniu do typowych praktyk. Przykład typowego harmonogramu remontów podano w odniesieniu do wariantu porównawczego (Wi0). Przyjęte założenia odnośnie wydłużenia czasu między remontami okresowymi do 12 lub 15 lat mają charakter prognozy i powinny być zweryfikowane w warunkach rzeczywistych podczas wieloletniej oceny odcinków drogowych.

Zakres remontów okresowych wariantu bezinwestycyjnego Wi0 zawiera wymianę warstwy ścieralnej poprzez jej frezowanie i ponowne ułożenie warstwy; zabieg ten wykonywany jest m.in. w celu poprawy bezpieczeństwa ruchu pojazdów. Ponadto zakłada się wymianę całej konstrukcji asfaltowej po zakończeniu okresu projektowego eksploatacji nawierzchni (30 lat) z wyłączeniem konstrukcji typu *perpetual*. W zakresie remontów cząstkowych nawierzchni znajdują się uszczelnienia szwów technologicznych. Planowane są także, z mniejszą intensywnością i w skromniejszym zakresie niż w wariancie Wi0, zabiegi polegające na usuwaniu wybojów, ubytków oraz miejscowych deformacji trwałych. Ze względu na zastosowane lepiszcze asfaltowe (PMB HiMA) nie zaplanowano napraw spękań niskotemperaturowych.

W odniesieniu do przewidywanych zabiegów utrzymaniowych, remontów cząstkowych i okresowych planowane prace zostały oszacowane zgodnie z aktualnymi cenami robót budowlanych i przekształcone na ceny rozrachunkowe. Nakłady drogowe i koszty operacyjne w analizie zostały najpierw skorygowane o wartość VAT, a następnie poddane korekcji o współczynniki konwersji. Zgodnie z *Niebieską Księgą* [NK2015] przyjęto współczynnik konwersji kosztów operacyjnych równy 0,78.

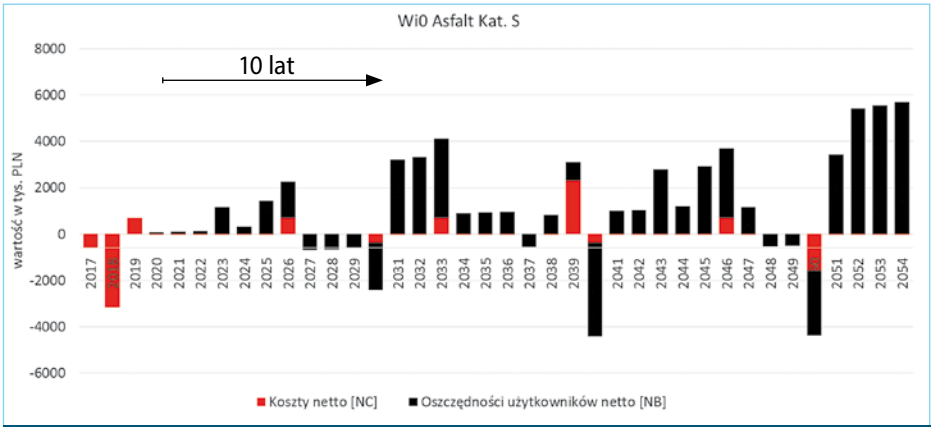
Analiza kosztów życia nawierzchni drogowych

W ramach analiz oszacowano nakłady inwestycyjne oraz nakłady na remonty i utrzymanie odcinka drogi ekspresowej o długości jednostkowej 1 km. Przyjęto zerowe nakłady na roboty mostowe ze względu na szacunkowy charakter analizy w odniesieniu do 1 km drogi i konieczność poniesienia porównywalnych nakładów na te prace w przypadku każdego z analizowanych wariantów. Według szacunków Ministerstwa Infrastruktury nakłady mostowe w przypadku dróg ekspresowych i autostrad stanowią od 40 do 60% wartości całej inwestycji. Ceny robót nawierzchniowych w wariantach inwestycyjnych przyjęto na podstawie informacji udostępnionych przez producentów mieszanek mineralno-asfaltowych w 2016 roku. W kalkulacjach zastosowano typowe ceny robót budowlanych za 2016 rok oraz uwzględniono transport materiałów na odległość 10 km do miejsca wbudowania.

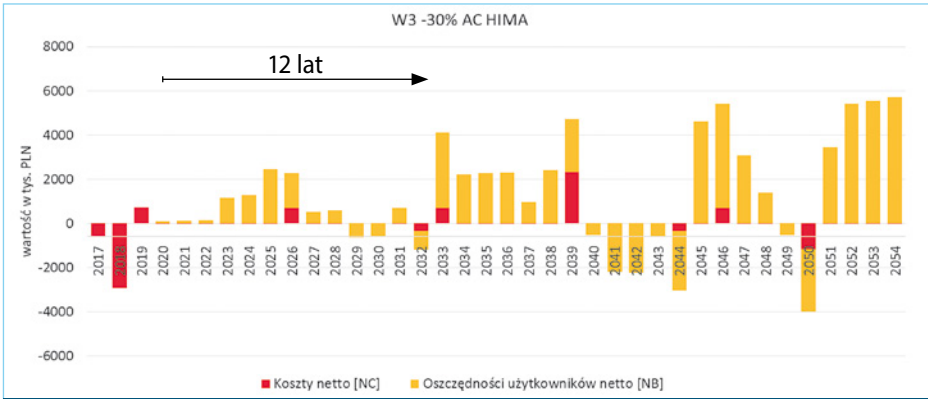
Analiza początkowych nakładów na wykonanie nawierzchni asfaltowych w wariantach inwestycyjnych wykazała, że wraz z redukcją grubości warstw nawierzchni (wariant Wi3) następuje obniżenie początkowych kosztów budowy. Pomimo zastosowania droższych lepiszczy wysokomodyfikowanych kluczowym czynnikiem wpływającym na obniżenie kosztów jest redukcja grubości całej konstrukcji drogowej. Ustalono, że nakłady na budowę nawierzchni w wariancie Wi3 są niższe od typowego wariantu asfaltowego (Wi0) o 18%. Inaczej kształtują się nakłady inwestycyjne w przypadku wariantu Wi5 *perpetual*, tj. nawierzchni „wiecznej". W tym przypadku, przewidywana trwałość konstrukcyjna wynosi 50 lat, a redukcja grubości całej konstrukcji to 10%. Nakłady inwestycyjne są tu porównywalne z nakładami w typowej technologii asfaltowej (wariant Wi0). Należy zaznaczyć, że w przeprowadzonych kalkulacjach uwzględniono wszystkie koszty inwestycyjne związane z realizacją inwestycji drogowej. Koszty nawierzchniowych robót drogowych stanowią około 20% całkowitych nakładów inwestycyjnych (bez obiektów).

Sumaryczne zestawienie kosztów oraz oszczędności badanych wariantów w całkowitym okresie analizy (38 lat) przedstawiono na rysunkach 2–4. Analizując rozkład przepływów pieniężnych w czasie,

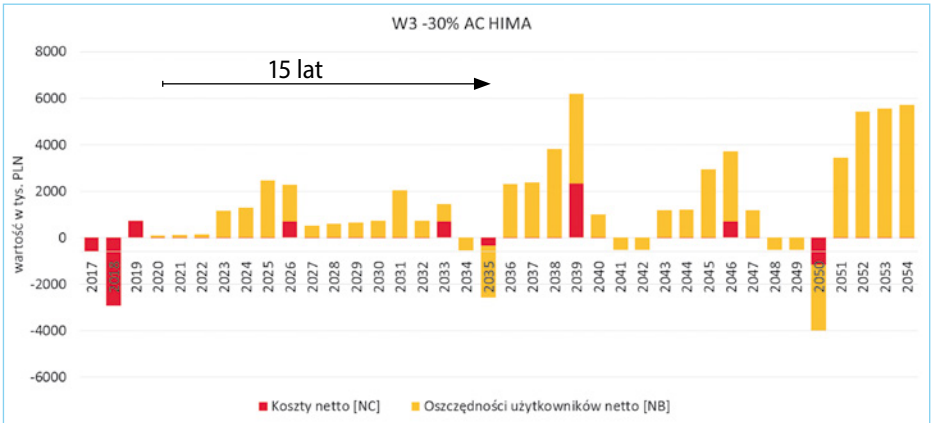
można zauważyć, że zarówno koszty, jak i oszczędności mogą przybierać zarówno wartości ujemne, jak i dodatnie. Taki stan rzeczy wynika bezpośrednio z przyjętej metodyki i porównania przepływów pieniężnych w danym roku z przepływami pieniężnymi dotyczącymi wariantu bezinwestycyjnego. Przykładowo, jeżeli w 2026 roku zarówno koszt, jak i oszczędności są niższe niż w wariancie bezinwestycyjnym, to obie kategorie finansowe będą wykazywały wartość dodatnią. Na podstawie sumarycznego zestawienia kosztów oraz oszczędności w okresie analizy w wariantach inwestycyjnych (rysunki 2–4) można stwierdzić, że trzy pierwsze lata realizacji inwestycji to okres ponoszenia kosztów. Jednakże ze względu na konieczność wykonania prac remontowych w trzecim roku inwestycji (2019 r.) bilans kosztów jest dodatni. W pierwszym roku eksploatacji nowej inwestycji powstają oszczędności, których wartość rośnie wraz z upływem czasu. Ze względu na okresowe wystąpienie kosztów przewidzianych na remonty okresowe wartość oszczędności w danym roku przyjmuje wartość ujemną. Można zauważyć, że w przypadku wariantu Wi3 przy założeniu 15-letniego okresu międzyremontowego (rysunek 4) występuje najmniejsza ilość lat z bilansem ujemnym, a pierwsze wartości ujemne (po 2020 r.) w kosztach i oszczędnościach występują dopiero po 15 latach, tj. w roku, kiedy zostaje wykonany pierwszy remont warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej. Dokładna analiza zestawień kosztów i oszczędności w funkcji czasu eksploatacji nawierzchni drogowej jest dobrym narzędziem do prognozowania przepływów pieniężnych oraz może być elementem długofalowego planowania budżetów na utrzymanie i remonty dróg. W artykule na rysunkach 3–4 przedstawiono sumaryczne koszty i oszczędności wariantu Wi3 w zależności od długości okresów międzyremontowych. W przypadku wariantu Wi5 *perpetual* rozkład kosztów i oszczędności przyjmuje zbliżony charakter, dlatego pominięto jego prezentację w formie graficznej.



Rys. 2. Sumaryczne zestawienie kosztów i oszczędności w całkowitym okresie analizy wariantu inwestycyjnego Wi0 przy zakładanej długości okresów między remontami okresowymi 10 lat



Rys. 3. Sumaryczne zestawienie kosztów i oszczędności w całkowitym okresie analizy wariantu inwestycyjnego Wi3 przy zakładanej długości okresów między remontami okresowymi 12 lat

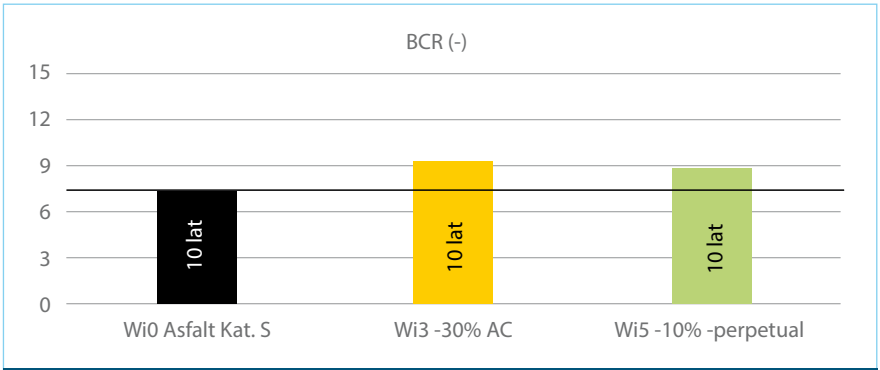


Rys. 4. Sumaryczne zestawienie kosztów i oszczędności w całkowitym okresie analizy wariantu inwestycyjnego Wi3 przy zakładanej długości okresów między remontami okresowymi 15 lat

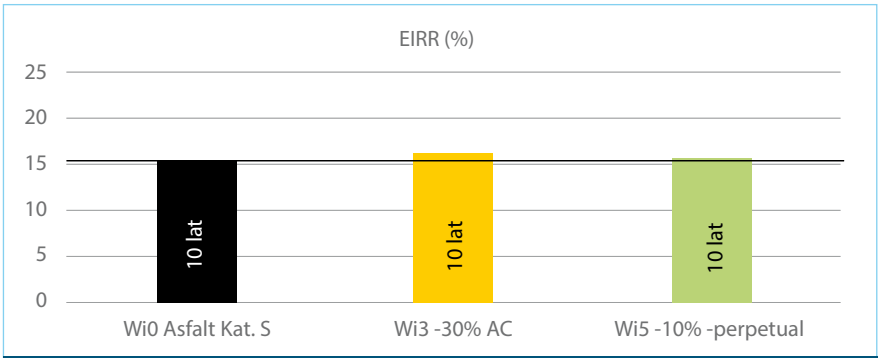
Przeprowadzenie analizy LCCA umożliwia porównanie całkowitych kosztów inwestycji realizowanej w różnych wariantach w technologii asfaltowej oraz wyrażenie w sposób liczbowy skutków jej stosowania w aspekcie ponoszonych kosztów eksploatacji, a także oddziaływania na środowisko w założonym horyzoncie czasowym. Wskaźniki efektywności społeczno-ekonomicznej, takie jak ENPV (ekonomiczna wartość bieżąca netto), EIRR (ekonomiczna wewnętrz-

na stopa zwrotu) i BCR (wskaźnik efektywności ekonomicznej), stanowią jeden z ekonomicznych elementów warunkujących wybór ostatecznego wariantu inwestycji, jeżeli analiza LCCA jest jedną z metod w ocenie wariantów. Według zaleceń UE, przy ubieganiu się o dotacje infrastrukturalne (większość inwestycji w latach 2014–2020) należy wybierać warianty charakteryzujące się najlepszymi wskaźnikami, wyrażonymi w postaci poziomu ERR i/lub BCR (ENPV może być takie samo dla wariantów o różnych ERR lub odwrotnie). W przedstawionej analizie dokonano porównania wskaźników ekonomicznych zalecanych i stosowanych w studiach wykonalności na etapie projektu i ubiegania się o dotację, przyjmując jako zmienną różne technologie wykonania konstrukcji nawierzchni.

Ze względu na przyjęcie wstępnych teoretycznych założeń przykładowej jednostkowej inwestycji drogowej analizę efektywności ekonomicznej przeprowadzono w oparciu o wskaźniki BCR i EIRR, które nie zależą od wielkości inwestycji/projektu, w przeciwieństwie do wskaźnika ENPV. Przedstawione na rysunku 5 porównanie wskaźników korzyści/koszty (BCR), zaś na rysunku 6 wskaźników ekonomicznej wewnętrznej stopy zwrotu (EIRR) pozwalają porównać efektywność ekonomiczną badanych wariantów. Analizując wszystkie warianty jednostkowej (1 km drogi klasy S) inwestycji, można stwierdzić, że warianty nawierzchni Wi3 i Wi5 wykonanych z zastosowaniem lepiszczy wysokomodyfikowanych (HiMA) wykazują większą wartość wskaźnika BCR w porównaniu do wariantu nawierzchni w technologii tradycyjnej (Wi0). Również wartość wskaźnika EIRR wariantów planowanych do wykonania z zastosowaniem lepiszczy wysokomodyfikowanych (HiMA) jest nieznacznie wyższa w przypadku wariantu Wi3 lub porównywalna w przypadku wariantu Wi5 w odniesieniu do wariantu porównawczego (Wi0). Warianty o wyższej wartości wskaźnika EIRR wykazują wyższą stopę zwrotu inwestycji. Należy podkreślić, że wszystkie analizowane



Rys. 5. Wartości wskaźników korzyści/koszty (BCR) analizowanych wariantów przy zakładanym 10-letnim okresie międzyremontowym



Rys. 6. Ekonomiczna wewnętrzna stopa zwrotu (EIRR) analizowanych wariantów przy zakładanym 10-letnim okresie międzyremontowym

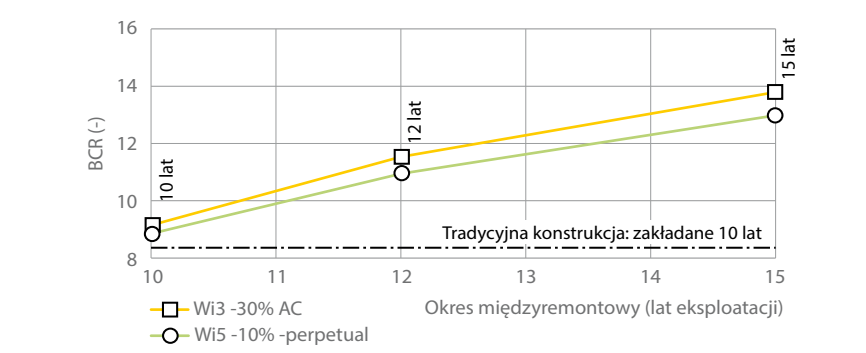
warianty inwestycyjne wykazują wewnętrzną stopę zwrotu znacznie powyżej przyjętej społecznej stopy dyskontowej wynoszącej 4,5%, co potwierdza zasadność ich potencjalnej realizacji w odniesieniu do zaniechania działań inwestycyjnych.

W zakresie postawionej tezy, że nowoczesne lepiszcza, takie jak PMB HiMA, mogą wpływać na wydłużenie trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej, przeprowadzono symulacje skutków ekonomicznych wydłużenia okresów międzyremontowych. Przyjęto wydłużenie okresów międzyremontowych z 10 lat odpowiednio do 12 i 15 lat, a następnie sprawdzono efektywność ekonomiczną jednostkowych inwestycji. Wyniki symulacji skutków ekonomicznych wydłużenia okresów międzyremontowych przedstawiono na rysunkach 7–8.

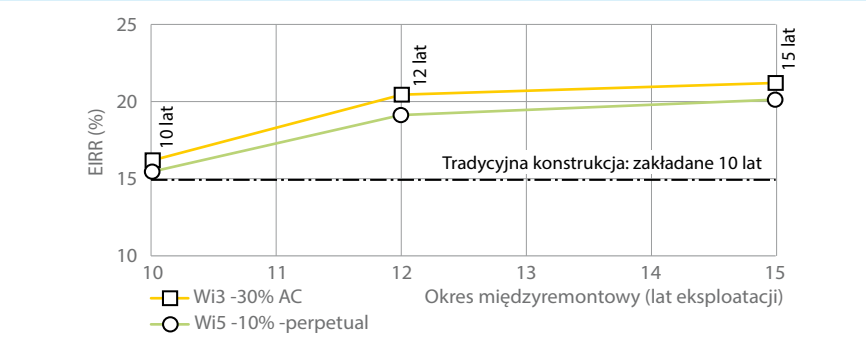
Analizując wpływ wydłużenia okresów międzyremontowych na efektywność ekonomiczną inwestycji, można stwierdzić, że wartość wskaźnika BCR wzrasta o ponad 50% w przypadku 15-letniego okresu międzyremontowego w porównaniu do wariantu tradycyjnego z 10-letnim okresem międzyremontowym. Podobnie kształtuje się trend wzrostu ekonomicznej wewnętrznej stopy zwrotu (EIRR). Wartość wskaźnika EIRR rośnie o około 33% w przypadku 15-letniego okresu międzyremontowego w porównaniu do wariantu tradycyjnego z 10-letnim okresem międzyremontowym. Analizując całościowo możliwość wydłużenia okresów międzyremontowych w wyniku zastosowania lepiszczy wysokomodyfikowanych (HiMA), można stwierdzić, że stosowanie tej technologii wydaje się wysoce uzasadnione od strony ekonomicznej, przy jednoczesnym uzyskaniu poprawy trwałości.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych, długoterminowych obserwacji odcinków drogowych



Rys. 7. Zależność wskaźnika korzyści/koszty (BCR) analizowanych wariantów od długości okresu międzyremontowego



Rys. 8. Zależność ekonomicznej wewnętrznej stopy zwrotu (EIRR) analizowanych wariantów od długości okresu międzyremontowego

w kraju i za granicą oraz wykonanych analiz można stwierdzić, że technologia wykonania nawierzchni wpływa na przewidywany okres jej eksploatacji. W szczególności można zauważyć, że:

- Nowoczesne lepiszcza, takie jak PMB HiMA, wpływają na wydłużenie trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej.
- Wydłużenie okresów międzyremontowych poprawia efektywność ekonomiczną inwestycji.
- Harmonogramy utrzymania nawierzchni drogowych oraz zakres zabiegów remontowych warstw asfaltowych z PMB HiMA nie zostały dotychczas zweryfikowane w warunkach terenowych (krótki okres doświadczeń).
- Szczegółowej weryfikacji technicznej należy poddać założenia w zakresie prognozowanej trwałości materiałów wysokomodyfikowanych w ramach przyszłych programów badawczych.

Podsumowując, można postulować, aby na poziomie władz centralnych (np. właściwego ministerstwa) powołany został zespół zadaniowy mający na celu opracowanie metodologii do oceny projektów drogowych i rozwiązań technologicznych. Zespół taki, złożony z przedstawicieli różnych środowisk, mógłby wypracować metodykę i algorytmy postępowania uwzględniające specyfikę różnych rozwiązań materiałowo-technologicznych stosowanych we współczesnym budownictwie. Korzystnym byłoby także uwzględnienie możliwości stosowania rozwiązań innowacyjnych po ich odpowiedniej walidacji.

PODZIĘKOWANIA

Niniejszy artykuł powstał w wyniku realizacji pracy badawczej pt. „Koncepcja optymalizacji konstrukcji asfaltowej nawierzchni drogi dzięki zastosowaniu asfaltów modyfikowanych do warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni drogowej" finansowanej przez firmę LOTOS Asfalt Sp. z o.o. Praca ta została zrealizowana dzięki zaangażowaniu następujących jednostek naukowych: Politechniki Gdańskiej, Politechniki Warszawskiej oraz Instytutu Badawczego Dróg i Mostów. ■

Literatura

1. LCCA 1998: Walls III J., Smith M. R., *Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design*, FHWA-SA-98-079, Washington DC 1998.
2. LCCA 2002: Beatty T. L., *Life-Cycle Cost Analysis Primer*, U.S. Department of Transportation FHWA, Office of Asset Management, Washington DC 2002.
3. LCCA 2005: Lamptey G., Ahmad M., Labi S., Sinha K., *Life Cycle Cost Analysis for INDOT Pavement Design Procedures*, FHWA/IN/JTRP-2004/28, Purdue University IN 2005.
4. LCCA 2015: Harvey J., Kendall A., Saboori A., *The Role of Life Cycle Assessment in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Road Construction and Maintenance* – A White Paper from the National Center for Sustainable Transportation, University of California, Davis CA 2015.
5. LCCA 2016: Harveym J. T., Meijer J., Ozer H., Al-Qadi I. L., Saboori A., Kendall A., *Pavement Life-Cycle Assessment Framework*, FHWA-HIF-16-014, Applied Pavement Technology, Urbana IL 2002.
6. AMCS 2003: Dawood D., *Life-Cycle Cost Analysis – The Pennsylvania Experience*, Transportation Asset Management Case Studies, FHWA-IF-03-O38, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg PA 2010.
7. AMCS 2007: Rabun J. T., Coley N., *Life-Cycle Cost Analysis – The Georgia Experience*, Transportation Asset Management Case Studies, FHWA-IF-07-009, US Department of Transportation, Washington DC 2010.
8. AMCS 2010: Clemons T. J., *Life-Cycle Cost Analysis – The Colorado Experience*, Transportation Asset Management Case Studies, FHWA-HIF-10-007, US Department of Transportation, Washington DC 2010.
9. NCHRP 2017: Gransberg D. D., Buss A., Karaca I., Loulakis M. C., *Alternate Design/Alternate Bid Process for Pavement-Type Selection*, NCHRP SYNTHESIS 499, Washington DC 2010.
10. NK 2015: *Niebieska Księga*, Infrastruktura Drogowa, Jaspers, Warszawa 2015.
11. KTKNPiP 1997: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDP, Warszawa 1997.
12. KTKNPiP 2014: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDKiA, Warszawa 2014.
13. SOSN 2002: System oceny stanu nawierzchni SOSN wytyczne stosowania, GDDP, Warszawa 2002 (wraz z późniejszymi poprawkami).

dr hab. inż. Jan Król,
dr hab. inż. Karol J. Kowalski, prof. PW,
Politechnika Warszawska,
ABAKK Sp. z o.o.

Budujmy **dobre drogi**

W dniach 25–27 października w hotelu Windsor w Jachrance odbyło się XXXVII seminarium techniczne PSWNA. Tematem przewodnim jesiennej edycji konferencji były asfalty wymiarowe. Patronat honorowy nad wydarzeniem objął Generalny Dyrektor Dróg Krajowych i Autostrad.

Spotkanie zainaugurował Andrzej Wyszyński, prezes Polskiego Stowarzyszenia Wykonawców Nawierzchni Asfaltowych. – Spotykamy się, ponieważ w asfaltach dużo się dzieje – powiedział, witając przybyłych gości i uczestników.

Seminarium rozpoczęła pierwsza sesja dedykowana Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oraz administracji drogowej, a otworzył ją sam Generalny Dyrektor Dróg Krajowych i Autostrad Krzysztof Kondraciuk. Przedstawił on główne założenia i postępy prac dotyczące budowy Via Carpatia – priorytetu inwestycyjnego w rządowym Programie Budowy Dróg Krajowych na lata 2014–2023 (z perspektywą do 2025). Zgromadzonych przedstawicieli wykonawców nawierzchni asfaltowych zapewnił, że wśród planowanych do realizacji 734 km/761 km (w zależności od przebiegu w województwie podlaskim) część odcinków tej trasy zrealizowana zostanie w technologii asfaltowej.

Następnie, Jarosław Wąsowski, zastępca dyrektora Departamentu Zarządzania Siecią Dróg Krajowych, poprowadził prelekcję na temat systemów ITS na sieci dróg krajowych. Przedstawił on m.in. cele i założenia projektowe Krajowego Punktu Dostępowego do informacji o warunkach ruchu (KPD), jednego z projektów realizowanych w ramach programu Krajowego Systemu Zarządzania Ruchem (KSZR).

Drugą sesję, poświęconą rozwojowi innowacji drogowych, rozpoczęło wpisujące się w ogólnoświatowe trendy wystąpienie mgr. inż. Adama Liphardta z Politechniki Warszawskiej pod tytułem: „RID zagospodarowanie destruktu asfaltowego w technologii nawierzchni asfaltowych na ciepło".

Otwarcie konferencji, od lewej: Andrzej Wyszyński, Krzysztof Kondraciuk, Jarosław Wąsowski, Anna Krawczyk

Prof. Karol Kowalski z Politechniki Warszawskiej, prof. Antoni Szydło z Politechniki Wrocławskiej oraz dr inż. Krystian Woźniak z Politechniki Krakowskiej wspólnie zaprezentowali genezę, cele badawcze, metody pomiarowe projektu RID-I/76 Ochrona przed hałasem drogowym. Głównym celem tego przedsięwzięcia jest kompleksowa ochrona otoczenia dróg przed hałasem z uwzględnieniem cichych nawierzchni i infrastruktury redukującej hałas, z zastosowaniem innowacyjnych procedur postępowania, metod i środków, przy zachowaniu wniosków z OOŚ i protestów ludności.

Następne wystąpienie, poświęcone zagadnieniu optymalnego doboru lepiszczy w polskich warunkach klimatycznych, poprowadził mgr inż. Piotr Pokorski z Politechniki Warszawskiej. Z kolei temat właściwości niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych omówili dr inż. Dawid Ryś oraz dr inż. Mariusz Jaczewski z Politechniki Gdańskiej.

Podczas trzeciej sesji uczestnicy seminarium mieli okazję pogłębić wiedzę z zakresu diagnostyki nawierzchni. Stanisław Szpinek z Polskiej Inżynierii opowiedział o zawiłościach procedury oceny poślizgowości (szorstkości, właści-

wości przeciwpoślizgowych) oraz równości nawierzchni drogowych w aspekcie obowiązujących dawniej i dziś oraz proponowanych zmian wymagań technicznych. Bartosz Brzeziński oraz Szymon Węgliński z Politechniki Poznańskiej zreferowali temat ugięć nawierzchni asfaltowych przy zastosowaniu belki Benkelmana w świetle wzmocnień i remontów oraz technologii ZiSPON. Popołudniową sesję zakończył Paweł Raczkowski z SASOL Polska z prezentacją zatytułowaną: „SASOBIT – 20 lat – zawsze w mieszance", przedstawiającą rozwój i praktyczne zastosowanie tego dodatku zapewniającego długowieczność nawierzchni asfaltowych.

Kolejny dzień konferencji upłynął pod hasłem: „Mieszanki mineralno-asfaltowe różnych zastosowań". Pierwsze wystąpienie, poświęcone analizom LCCA konstrukcji nawierzchni drogowych z asfaltami wysokomodyfikowanymi, poprowadził dr hab. inż. Jan Król z Politechniki Warszawskiej. Z zaprezentowanych przez niego wniosków wynika m.in., że lepiszcza takie jak PMB HiMA wpływają na wydłużenie trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej, a wydłużenie okresów międzyremontowych poprawia efektywność ekonomiczną inwestycji.

Następnie Bernd Jannicke z IBA-Ingenieurbüro Jannicke z Niemiec wygłosił prelekcję pod tytułem: „Benefits of evotherm warm mix technology on compaction in cold climate conditions and on lowering the production temperature of asphalt mix".

Bartłomiej Zieliński z Budimex SA zaprezentował zagadnienie nawierzchni mostowych z lepiszczem wysokomodyfikowanym na przykładzie drogi ekspresowej S7 i DK 16.

Dr inż. Przemysław Buczyński oraz dr inż. Grzegorz Mazurek z Politechniki Świętokrzyskiej poruszyli kwestię głębokiego recyklingu nawierzchni asfaltowych z asfaltem spienionym.

Seminarium zamknęło wystąpienie Wojciecha Sorociaka z Eurovia Polska S.A. dotyczące wielokryterialnej oceny asfaltowych warstw przeciwspękaniowych VIASAF.

Prof. Karol Kowalski z Politechniki Warszawskiej, pełniący rolę moderatora dyskusji podczas ostatniego dnia konferencji, podkreślił konkludując, że program spotkania był zdywersyfikowany: przedstawiono w jego trakcie 5 referatów naukowych, 4 naukowo-przemysłowe, 4 z branży dostawców i wykonawców oraz 2 w dziedzinie administracji dróg krajowych. Wszystkie wygłoszone referaty zostały bardzo wysoko ocenione przez prof. Kowalskiego. Zwrócił on także uwagę na duże zainteresowanie uczestników prezentowanymi tematami w postaci ożywionych konstruktywnych dyskusji i przekazanych trafnych spostrzeżeń. Profesor Kowalski zaakcentował również nowy dobry trend zaistnienia partnerskich relacji i dialogu między przedstawicielami GDDKiA a wykonawcami. Są one konieczne dla realizacji wspólnego ambitnego celu, jakim są trwałe, bezpieczne, przyjazne środowisku i uzasadnione ekonomicznie nawierzchnie asfaltowe tworzące sieć dróg niezbędną do rozwoju gospodarczego naszego kraju.

Sponsorem głównym seminarium była firma NYNAS Sp. z o.o. Wśród sponsorów znalazły się także firmy: DYNAPAC POLAND Sp. z o.o., INGEVITY HOLDINGS SPRL oraz SASOL POLAND Sp. z o.o. Patronat medialny nad wydarzeniem objęły czasopisma „Autostrady" oraz „Mosty", a także „Infrastruktura: Ludzie, Innowacje, Technologie".

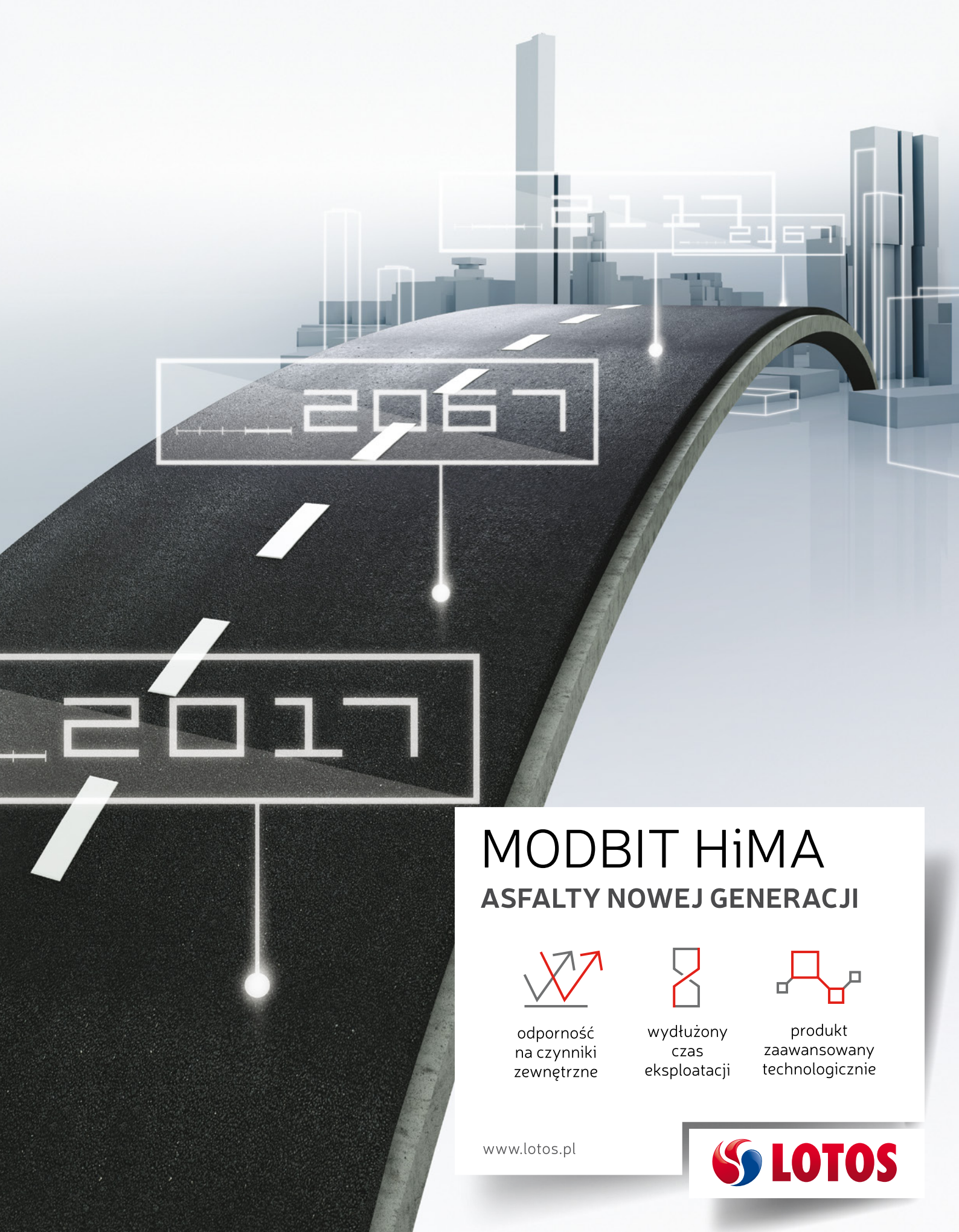
Na zakończenie Andrzej Wyszyński wręczył wyżej wymienionym firmom i mediom dyplomy z podziękowaniami oraz podsumował spotkanie. – Seminarium pokazało, co się aktualnie dzieje w branży drogowej, jaki jest kierunek postępu oraz przede wszystkim nasze główne przesłanie, że drogi można budować bardzo dobrze i że my umiemy to robić. W drogownictwie jest bardzo dużo ciekawych realizacji, a my włożyliśmy sporo wysiłku w to, jak dzisiaj wyglądają nasze drogi. Na pewno jest jeszcze mnóstwo do zrobienia, ale z całą pewnością mamy też czym się pochwalić.

Uczestnicy seminarium

Wszystkim uczestnikom, prelegentom i gościom naszego seminarium dziękujemy za możliwość wspólnego spotkania. Zachęcamy do zapoznania się z zamieszczonymi na stronie internetowej pswna.pl materiałami i do pobrania ich oraz zapraszamy do udziału w kolejnej wiosennej edycji seminarium, która odbędzie się w dniach 21–23 marca w hotelu Windsor w Jachrance k/Warszawy. Jego tematem przewodnim będą „Asfalty w budownictwie drogowym – ekonomia, ekologia, innowacje". ■

Anna Arczewska

Zdjęcia: PSWNA


2017
2067
2117
2167
MODBIT HiMA
ASFALTY NOWEJ GENERACJI
odporność na czynniki zewnętrzne
wydłużony czas eksploatacji
produkt zaawansowany technologicznie
www.lotos.pl
LOTOS