



JAN KRÓL

Politechnika Warszawska  
j.krol@il.pw.edu.pl



KAROLINA  
MATRASZEK

Politechnika Warszawska

## Właściwości wysokotemperaturowe lepiszczy asfaltowych w badaniu cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCR)

Specyfikacja wymagań Superpave opracowana w programie badawczym SHRP (*Strategic Highway Research Program*) w Stanach Zjednoczonych ma już prawie 20 lat. Prace przygotowawcze nad opracowaniem założeń programu SHRP rozpoczęto w połowie lat osiemdziesiątych XX wieku. Etap prac badawczych rozpoczął się w 1987 roku, trwał 5 lat i kosztował około 150 mln dolarów. Niewątpliwą zaletą realizowanego programu był jego międzystanowy zasięg oraz

jego dobra organizacja polegająca na podziale Stanów Zjednoczonych na obszary, w których utworzono Centra Superpave koordynujące pracę grup naukowo-badawczych. Etap wdrażania programu rozpoczął się w roku 1993 i do dnia dzisiejszego wymagania Superpave są poddawane weryfikacji i zmianom [1].

Głównym założeniem specyfikacji Superpave dotyczącej lepiszczy asfaltowych jest uzależnienie właściwości lepiszczy asfaltowych od strefy klimatycznej, w której dane lepiszcze powinno spełniać wymagania. Jednocześnie specyfikacja Superpave nie narzuca wymagań odnośnie składu i pochodzenia lepiszcza. Producenci lepiszczy asfaltowych w Stanach Zjednoczonych, w celu podniesienia funkcjonalnego zakresu użytkowania lepiszcza, zaczęli powszechnie stosować modyfikację lepiszczy asfaltowych.

Wymagania Superpave w pierwotnym założeniu były opracowane z uwzględnieniem średniej prędkości i obciążenia ruchem. Przyjęto zasadę, że uwzględnienie ciężkiego i/lub powolnego ruchu odbywa się na zasadzie podniesienia rodzaju funkcjonalnego lepiszcza. Przykładowo projektant przy typowych warunkach obciążenia w danej strefie klimatycznej stosując lepiszcze PG 58-28, po uwzględnieniu ciężkiego i powolnego ruchu przyjmuje lepiszcze PG 70-28, pomimo że średnia najwyższa siedmiodniowa temperatura nie przekracza w danej strefie klimatycznej 58°C. Konieczność podniesienia górnego rodzaju funkcjonalnego o 12°C (z PG 58 na PG 70) wymusza na producentach lepiszczy konieczność ich przeszywniania np. poprzez bardzo wysoki stopień modyfikacji, a co za tym idzie, powoduje wzrost kosztów i podniesienie temperatury technologicznej stosowania.

Drugim poważnym problemem przy podnoszeniu górnego rodzaju funkcjonalnego jest brak „wrażliwości metody badawczej” na rodzaj zastosowanej modyfikacji. W USA w celu usztywnienia lepiszcza i podniesienia rodzaju PG, zaczęto stosować różnego rodzaju modyfikatory, niekoniecznie rodzaju polimerowego, co doprowadziło do sytuacji, w której

lepiszcza spełniały wymagania specyfikacji Superpave bez widocznego przełożenia na właściwości nawierzchni drogowej. Wartość parametru  $G^*/\sin\delta$  jest w przeważającej mierze uzależniona od wartości modułu zespolonego sztywności i w o wiele mniejszym stopniu zależy od wartości kąta przesunięcia fazowego. Natomiast przewaga właściwości asfaltów modyfikowanych polimerami typu elastomerowego nad tradycyjnymi asfaltami polega na zwiększeniu sprężystości, która nie zależy od sztywności lepiszcza, natomiast jest silnie uzależniona od wartości kąta przesunięcia fazowego [2].

W odpowiedzi na konieczność weryfikacji wymagań Superpave, dostosowania ich do zmieniających się uwarunkowań materiałowych oraz konieczności uwzględnienia charakteru ruchu w procesie doboru lepiszcza w wymaganiach Superpave wprowadzono metodę badania cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCR – *Multiple Stress Creep Recovery*).

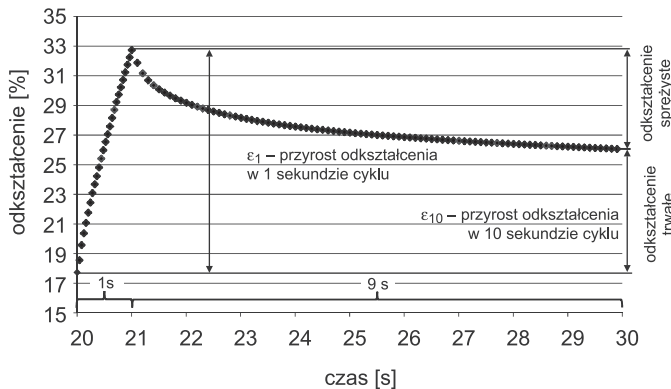
### Założenia metody badania MSCR

Cykliczna próba pełzania z odprężaniem (MSCR) jest badaniem charakteryzującym wysokotemperaturowe właściwości asfaltów i służy do wyznaczenia górnego zakresu rodzaju funkcjonalnego PG wg projektu wymagań AASHTO MP 19-10<sup>1</sup>. Badanie przeprowadza się w aparacie dynamicznego ścinania (DSR), z użyciem układu pomiarowego równoległych płytek o średnicy 25 mm ze szczeliną 1 mm, zgodnie z procedurą opisaną w AASHTO TP 70-09<sup>2</sup>. Procedura testu polega na powtarzalnym zadawaniu obciążenia trwającego jedną sekundę na próbkę asfaltu przy stałym naprężeniu. Po każdym cyklu obciążenia następuje dziewięciosekundowe odprężenie materiału. Wg projektu specyfikacji AASHTO MP 19-10 badanie przeprowadza się na asfaltach po starzeniu technologicznym RTFOT. Pojedynczy cykl trwa 10 sekund i jest powtarzany dziesięciokrotnie przy naprężeniu 0,1 kPa i następnie 3,2 kPa. Badanie przeprowadza się w najwyższej średniej siedmiodniowej temperaturze przyjętej wg rodzaju funkcjonalnego PG w celu sprawdzenia przydatności badanego lepiszcza w danej strefie klimatycznej. Temperaturę tę określa się dla danego regionu geograficznego. Dla Polski wg badań przeprowadzanych przez IBDiM z lat 1998–1999 temperatura PG wynosi 58°C w przypadku warstwy ścieralnej i 52°C w przypadku warstwy wiążącej [3]. W każdym cyklu

<sup>1</sup> AASHTO MP 19-10 Standard Specification for Performance-Graded asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test

<sup>2</sup> AASHTO TP 70-09 Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)

pełzania i odprężenia rejestrowana jest zmiana odkształcenia w pierwszej i dziesiątej sekundzie. Analizując zmianę odkształceń w czasie, cykl można podzielić na odkształcenie sprężyste, czyli odwracalne oraz odkształcenia trwałe.



Rys. 1. Przykładowy przebieg jednego cyklu obciążenia lepiszczka modyfikowanego wyrażony zmianą odkształcenia w czasie zarejestrowany w trzecim cyklu, przy naprężeniu 0,1 kPa.

Wynikiem badania MSCR jest średnie procentowe odkształcenie sprężyste  $R$  obliczane wg wzoru (1) oraz nieodwracalna część modułu podatności  $J_{nr}$  obliczana wg wzoru (2). Średnie procentowe odkształcenie sprężyste  $R$  określa sprężyste właściwości lepiszczka [4], natomiast moduł podatności  $J_{nr}$  charakteryzuje zdolność materiału do utrwalania deformacji. Im wyższa wartość nieodwracalnego modułu podatności, tym mniejsza odporność na deformacje trwałe [5].

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{10} \varepsilon_r(\tau, N)}{10}, \quad (1)$$

w którym:

$\tau$  – wartość przykładanego naprężenia,

$N$  – liczba cykli,

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \cdot 100 / \varepsilon_1,$$

$\varepsilon_1$  – przyrost odkształcenia po pierwszej sekundzie cyklu (na końcu fazy pełzania),

$\varepsilon_{10}$  – przyrost odkształcenia po dziesiątej sekundzie cyklu (na końcu fazy odprężenia).

$$J_{nr} = \frac{\sum_{i=1}^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10}, \quad (2)$$

w którym:

$\tau$  – wartość przykładanego naprężenia,

$N$  – liczba cykli,

$$J_{nr} = \varepsilon_{10} / \tau,$$

$\varepsilon_{10}$  – przyrost odkształcenia po dziesiątej sekundzie cyklu (na końcu fazy odprężenia).

Do projektu wymagań AASHTO MP 19-10 dołączono dodatkowo wymaganie procentowej różnicy nieodwracalnej części modułu podatności  $J_{nr\text{diff}}$  obliczanej ze wzoru (3) i mierzonej przy naprężeniu 3,2 kPa oraz 0,1 kPa. Wartość ta wyraża wrażliwość asfaltu na zmianę wartości naprężenia i zaleca się, żeby była nie więk-

sza niż 75%. Im mniejszą wartość  $J_{nr\text{diff}}$  uzyskuje się w badaniu MSCR tym lepsze asfaltowe zachowuje się bardziej stabilnie [4].

$$J_{nr\text{diff}} = \frac{(J_{nr3.2} - J_{nr0.1}) \cdot 100}{J_{nr0.1}}, \quad (3)$$

w którym:

$J_{nr0.1}$  – nieodwracalna część modułu podatności przy naprężeniu 0,1 kPa,

$J_{nr3.2}$  – nieodwracalna część modułu podatności przy naprężeniu 3,2 kPa.

Dotychczasowa klasyfikacja asfaltów wg AASHTO M320<sup>3</sup> uwzględnia jedynie strefy klimatyczne i uzależnia wybór lepiszczka od temperatury. Powoduje to pewne zakłamania, ponieważ w celu podniesienia wymagań lepiszczki spowodowanych np. przez zmniejszenie prędkości pojazdów na danej drodze, zwiększany jest górny przedział temperaturowy o 6°C. W efekcie asfalt musi spełniać wymaganie, w temperaturze, w której nigdy nie będzie pracował [4].

Nowy projekt wymagań AASHTO MP 19-10, wprowadza dodatkową klasyfikację w obrębie danego rodzaju funkcjonalnego. Wprowadzone zostają cztery klasy ruchu: standardowy – S, wysoki – H, bardzo wysoki – V, oraz ekstremalnie wysoki – E.

- Klasa standardowa „S” – przeznaczona jest do ruchu ze średnią prędkością powyżej 70km/h oraz o natężeniu mniejszym niż 10 milionów ESAL (*equivalent single axle loads* – obciążenie pojedynczą równoważną osią obliczeniową). Za odpowiednik w Polsce można uznać drogi o kategorii ruchu KR1, KR2, KR3 oraz częściowo KR4.
- Klasa ruchu wysoka „H” – przeznaczona jest do dróg o natężeniu od 10 do 30 milionów ESAL, co odpowiada w Polsce kategorii ruchu KR4 lub KR5. Na drogach klasy „H” średnia prędkość pojazdów wynosi od 20 km/h do 70 km/h.
- Klasa bardzo wysoka „V” – przeznaczona jest do dróg o natężeniu większym niż 30 milionów ESAL lub prędkości poniżej 20 km/h [6].
- Klasa ruchu ekstremalnie wysoka „E” – przeznaczona jest natomiast do dróg o natężeniu zarówno większym niż 30 milionów ESAL, jak i prędkości poniżej 20 km/h.

Klasa „V” oraz „E” jest w Polsce odpowiednikiem kategorii ruchu KR5 oraz KR6. Wartość nieodwracalnej części modułu podatności lepiszczka klasy standardowej nie może przekraczać 4 kPa<sup>-1</sup>. Asfalt przeznaczony do dróg o klasie „H” może przyjmować wartość nieodwracalnej części modułu podatności nie większą niż 2 kPa<sup>-1</sup>. Do dróg o klasie „V” wartość nieodwracalnej części modułu podatności nie może przekraczać 1 kPa<sup>-1</sup>, natomiast do dróg o klasie ruchu ekstremalnie wysokiej nie może przekraczać 0,5 kPa<sup>-1</sup> (tabela 1).

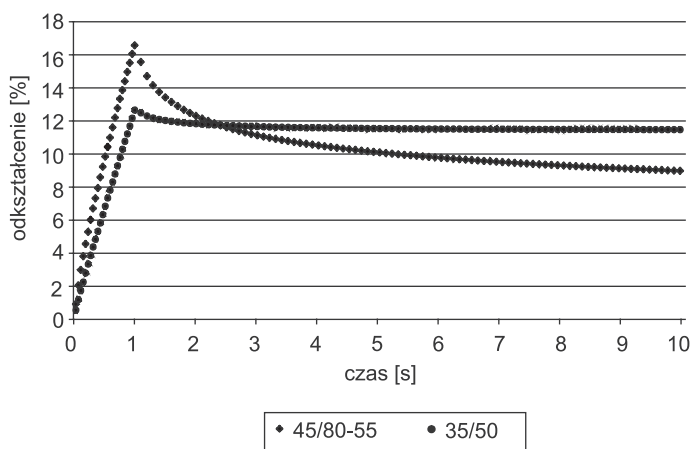
<sup>3</sup> AASHTO M 320-09 Performance-Graded Asphalt Binder

Tabela 1. Wymagania w zakresie odporności na deformacje trwałe lepiszczki asfaltowych wg AASHTO MP 19-10.

Wymaganie (lepiszczko po RTFO)	Klasa ruchu			
	Standardowy S	Wysoki H	Bardzo wysoki V	Ekstremalnie wysoki E
$J_{nr3.2} \leq 4,0 \text{ kPa}^{-1}$ $J_{nr\text{diff}} \leq 75\%$	$J_{nr3.2} \leq 2,0 \text{ kPa}^{-1}$ $J_{nr\text{diff}} \leq 75\%$	$J_{nr3.2} \leq 1,0 \text{ kPa}^{-1}$ $J_{nr\text{diff}} \leq 75\%$	$J_{nr3.2} \leq 0,5 \text{ kPa}^{-1}$ $J_{nr\text{diff}} \leq 75\%$	

## Ocena porównawcza podatności asfaltu i polimeroasfaltu

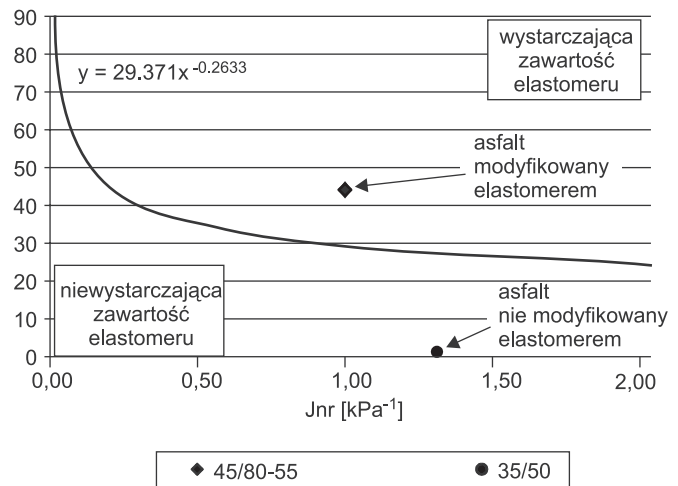
Interpretacja wartości odkształcenia sprężystego  $R$  umożliwia ocenę właściwości sprężystych lepiszcza, dostarcza informacji na temat zastosowanego do modyfikacji polimeru oraz w sposób pośredni określa jego zawartość w lepiszczu. Asfalt łożyskowy niemodyfikowany wykazuje niewielki poziom odkształcenia sprężystego. Zjawisko to można zaobserwować w badaniu MSCR, kiedy w końcowym etapie odciążenia zakumulowane odkształcenie przeważa nad odkształceniem sprężystym. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie zmiany odkształcenia przy obciążeniu i odprężeniu, asfaltu modyfikowanego 45/80-55 oraz asfaltu zwykłego 35/50, wg procedury MSCR.



Rys. 2. Zależność zmiany odkształcenia w czasie asfaltu 45/80-55 oraz asfaltu 35/50

Norma AASHTO MP 19-10 wprowadza prosty sposób weryfikacji obecności elastomeru w asfalcie. Na wykres przedstawiający zależność procentowego odkształcenia sprężystego od nieodwracalnej części modułu podatności, należy nanieść krzywą o równaniu  $y = 29.371x^{-0.2633}$ . Wszystkie asfalty, których procentowe odkształcenie sprężyste przy naprężeniu 3,2 kPa będzie przyjmowało wartości ze zbioru powyżej krzywej, zawierają odpowiednią ilość elastomeru i charakteryzują lepiszcza modyfikowane. Natomiast asfalty, których procentowe odkształcenie sprężyste przyjmuje wartości ze zbioru poniżej krzywej, charakteryzują lepiszcza zwykłe lub modyfikowane polimerem w niedostatecznej ilości. Na rysunku 3 przedstawiono wartości procentowego odkształcenia sprężystego w funkcji modułu podatności w celu weryfikacji stopnia modyfikacji badanych lepiszczy. Lepiszcz modyfikowane polimerem 45/80-55 przyjmuje wartość powyżej krzywej i jest modyfikowane elastomerem w ilości zgodnej z wymaganiem AASHTO, natomiast asfalt 35/50 charakteryzuje się większą podatnością oraz brakiem właściwości sprężystych, co świadczy o braku zawartości polimeru.

Procentowe odkształcenie sprężyste jest ponadto parametrem, którym można oszacować jakość i stopień modyfikacji polimerem. Według J. D'Anglego [4] badanie MSCR



Rys. 3. Funkcja zależności procentowego odkształcenia sprężystego od nieodwracalnej części modułu podatności stosowana przy sprawdzaniu stopnia i efektywności modyfikacji lepiszczy asfaltowych polimerem

ma znaczną przewagę nad badaniem nawrotu sprężystego oraz ciągłości ponieważ pozwala uzyskać informację nie tylko o tym czy asfalt jest modyfikowany polimerem, ale również o jego strukturze, sile wiązań, rodzaju modyfikacji oraz stabilności.

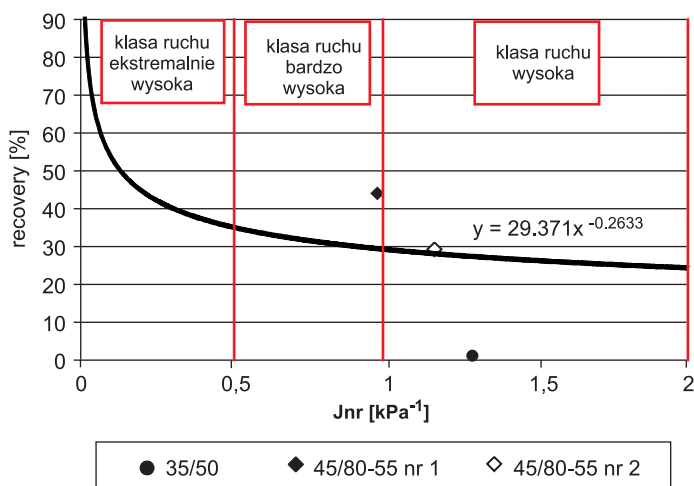
S. Dreesen w swoich badaniach [4] wykazał, że nieodwracalna część modułu podatności  $J_{nr}$  lepiej charakteryzuje właściwości asfaltu w kontekście przewidywania podatności na deformacje trwałe niż parametr  $G^*/\sin\delta$  lub temperatura mięknięcia. Badanie MSCR różnicuje lepiszcza o podobnej penetracji, temperaturze mięknięcia i rodzaju funkcjonalnym. Nie znaleziono korelacji pomiędzy parametrem  $J_{nr}$ , a temperaturą mięknięcia, penetracją, modułem zespolonym ( $G^*$ ) lub parametrem  $G^*/\sin\delta$ . Moduł  $J_{nr}$  może służyć natomiast zarówno do określania właściwości asfaltów modyfikowanych, jak i zwykłych oraz daje dużo lepszą korelację z wynikami badań koleinowania w 60°C niż parametr  $G^*/\sin\delta$ , temperatura mięknięcia lub penetracja [5], [7].

Badaniom poddano trzy lepiszcza asfaltowe: jeden asfalt 35/50 i dwa lepiszcza modyfikowane rodzaju 45/80-55 pochodzące z różnych źródeł. Badane lepiszcza charakteryzują się porównywalnymi właściwościami w zakresie podstawowych wymagań normowych (tabela 2). Wykorzystując badanie dynamicznego ścinania w reometrze DSR określono, zgodnie z wymaganiami Superpave (AASHTO M320), górny rodzaj funkcjonalny lepiszczy. Wszystkie badane lepiszcza spełniają kryteria parametru  $G^*/\sin\delta$  w strefie klimatycznej PG 70 (temp. 70°C). Lepiszcz 45/80-55 nr 1 spełnia również wymagania parametru  $G^*/\sin\delta$  w strefie klimatycznej PG 76 (temp. 76°C).

Analiza wartości modułu podatności przy naprężeniu 3,2 kPa, zgodnie z projektem wymagań AASHTO MP 19-10, wykazała przydatność wszystkich badanych lepiszczy do ruchu standardowego (klasa S) i ruchu wysokiego (klasa H). Lepiszcz modyfikowane 45/80-55 nr 1 ze względu na mniejszą wartość modułu podatności oraz większą sprężystość można stosować w strefie klimatycznej PG 70 (temp. 70°C) również do ruchu bardzo wysokiego (klasa V).

Tabela 2. Właściwości reologiczne badanych lepiszczy

Właściwość	Jednostka	Lepiszczce		
		35/50	45/80-55 nr 1	45/80-55 nr 2
Penetracja	0,1 mm	44	52	50
TPIK	°C	54,0	57,8	60,6
Temperatura tamiwości	°C	-13	-13	-14
Nawrót sprężysty w 25°C	%	-	85	78
Penetracja po RTFOT	0,1 mm	26	32	34
TPIK po RTFOT	°C	60,4	65,0	65,2
Nawrót sprężysty w 25°C po RTFOT	%	-	77	72
$G^*/\sin\delta \geq 1$ kPa	PG max	70	70 i 76	70
$G^*/\sin\delta \geq 2,2$ kPa po RTFOT	PG max	70	70 i 76	70
$J_{nr3,2} \leq 4,0$ kPa <sup>-1</sup> po RTFOT	PG 70	1,29	0,99	1,17
$J_{nr3,2} \leq 2,0$ kPa <sup>-1</sup> po RTFOT	PG 70	1,29	0,99	1,17
$J_{nr3,2} \leq 1,0$ kPa <sup>-1</sup> po RTFOT	PG 70	nie spełnia	0,99	nie spełnia
$J_{nr3,2} \leq 0,5$ kPa <sup>-1</sup> po RTFOT	PG 70	nie spełnia	nie spełnia	nie spełnia
$J_{nrdiff} \leq 75\%$	PG 70	13,4	32,5	42,1



Rys. 4. Wykres zależności procentowego odkształcenia sprężystego od nieodwracalnej części modułu podatności badanych lepiszczy

Graficzną interpretacją klasyfikacji lepiszczy na podstawie modułu podatności oraz odkształcenia sprężystego przedstawiono na rysunku 4. Można stwierdzić, że badanie MSCR różnicuje lepiszcza modyfikowane należące do tej samej grupy rodzaju 45/80-55. Asfalt modyfikowany 45/80-55 nr 1 charakteryzuje się lepszymi właściwościami sprężystymi i można go stosować do budowy dróg przeznaczonych do wyższej kategorii ruchu.

## Podsumowanie

Badanie MSCR, w którym można wyznaczyć nieodwracalną część modułu podatności  $J_{nr}$ , jest metodą badawczą wdrażaną w nowych wymaganiach Superpave do oceny

właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych. Na podstawie doniesień krajowej i zagranicznej literatury można stwierdzić, że metoda MSCR umożliwiła rozróżnienie właściwości asfaltów modyfikowanych oraz asfaltów niemodyfikowanych i daje dużo lepszą korelację z wynikami badań koleinowania w 60°C niż parametr  $G^*/\sin\delta$ . Jak wykazały przeprowadzone badania, metoda MSCR różnicuje lepiszcza o zbliżonej penetracji, temperaturze mięknięcia i rodzaju funkcjonalnym określanych dotychczasowymi metodami oraz umożliwia uwzględnienie parametrów obciążenia ruchem w procesie doboru materiałowego. Lepiszczka modyfikowane rodzaju 45/80-55 spełniające jednakowe wymagania wg normy PN-EN 14023, wg kryteriów Superpave mogą być stosowane do różnych klas obciążenia ruchem.

## Bibliografia

- [1] R.S. McDaniel, R.B. Leahy, G.A. Huber, J.S. Moulthrop, T. Ferragut: *The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program*. NCHRP Final Report, document 186. 2011
- [2] Asphalt Institute. Implementation of the multiple stress creep recovery test and specification. Asphalt Institute Guidance Document April 2010, dostępny na [http://www.asphaltinstitute.org/Upload/MSCR\\_Implementation\\_Guidance\\_1058794596\\_542010\\_142630.pdf](http://www.asphaltinstitute.org/Upload/MSCR_Implementation_Guidance_1058794596_542010_142630.pdf)
- [3] I. Gawel, M. Kalabińska, J. Piłat: *Asfalty drogowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001
- [4] D'Angelo J.: *New high-temperature binder specification using multistress creep and recovery*. Development in Asphalt Binder Specifications. Transportation Research Circular E-C147. 2010
- [4] S. Dreessen, J.P. Planche, V. Gardel: *A new performance related test method for rutting prediction: MSCRT*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials. Vol. 1/2009 pp. 971-980
- [5] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. IBDiM, Warszawa 1997
- [6] M. Gajewski, A. Wróbel, S. Jemiolo, D. Sybilski: *Wpływ właściwości reologicznych lepiszcza na koleinowanie MMA*. XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport 2010

## Podziękowania

Autorzy dziękują dr Karolowi J. Kowalskiemu z Politechniki Warszawskiej za cenne uwagi i pomoc przy zbieraniu materiałów do opracowania niniejszego artykułu.

Jan B. Król jest stypendystą Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej w ramach projektu „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego ■