

# Analiza reologicznego zachowania drogowych kompozytów elastomerowo-asfaltowych poddanych próbie rozciągania w duktylometrze

Mieczysław Słowik

*Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,  
Politechnika Poznańska, e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl*

**Streszczenie:** Jedną z podstawowych metod pomiarowych stosowanych w celu oceny właściwości asfaltów modyfikowanych polimerami jest próba rozciągania. W niniejszej pracy badaniom poddano próbki kompozytów elastomerowo-asfaltowych o zróżnicowanej zawartości elastomeru SBS (w zakresie od 3% do 9%), ale o zbliżonej penetracji w temperaturze 25°C. W celu oceny właściwości reologicznych oraz wrażliwości termicznej lepiszcza asfaltowe wybrane do badań poddano próbie rozciągania z rejestracją siły w duktylometrze. Pomiary wykonano w temperaturze 0, 10 i 25°C. Na podstawie uzyskanych rezultatów wyznaczono wskaźnik maksimum siły (*MFR*), który można wykorzystywać jako miarę efektywności modyfikacji asfaltów elastomerami. Ponadto, na podstawie wartości pierwszego maksimum siły rozciągającej oznaczonych w temperaturze 0 i 25°C obliczono indeks maksimum siły (*MFI*), który może stanowić alternatywę dla powszechnie stosowanego indeksu penetracji.

**Słowa kluczowe:** Asfalt modyfikowany polimerem, właściwości reologiczne, kohezja, próba rozciągania, wrażliwość temperaturowa, praca odkształcenia

## 1. Wprowadzenie

Asfalty modyfikowane polimerami stały się w ciągu ostatnich kilkunastu lat jednymi z najważniejszych materiałów budowlanych stosowanych do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych układanych w warstwach nawierzchni drogowych. Dzięki ich zastosowaniu możliwe jest znaczne ograniczenie wielu niekorzystnych zjawisk prowadzących do zniszczenia nawierzchni tj. odkształceń trwałych, spękań niskotemperaturowych, a także zwiększenie odporności na zmęczenie [1]. Jednym ze sposobów pozwalających na dokonanie oceny właściwości asfaltów modyfikowanych jest poddanie ich próbie rozciągania w określonych warunkach prędkości i temperatury. Wśród najczęściej stosowanych metod pomiarowych można wymienić dwie: test bezpośredniego rozciągania DTT (ang. *Direct Tension Test*) [2, 3, 4, 5, 6] oraz test rozciągania z rejestracją siły w duktylometrze (ang. *Force-Ductility Test*) [6, 7, 8, 9].

Celem niniejszej pracy była ocena właściwości reologicznych oraz wrażliwości termicznej kompozytów elastomerowo-asfaltowych o zbliżonej twardości charakteryzowanej wartością penetracji oznaczonej w temperaturze 25°C, na podstawie prób rozciągania ze stałą prędkością realizowanych w duktylometrze.

## 2. Charakterystyka badanych lepiszczy asfaltowych

Planując program badawczy przyjęto, że lepiszcza asfaltowe wybrane do badań powinny spełniać następujące warunki:

- zbliżone wartości penetracji oznaczonej w temperaturze 25°C
- znany rodzaj i zawartość elastomeru we wszystkich asfaltach modyfikowanych
- proces modyfikacji asfaltu dodatkiem elastomeru przeprowadzony w warunkach produkcji przemysłowej (np. w rafinerii).

Uwzględniając powyższe założenia, w celu sporządzenia kompozytów elastomerowo-asfaltowych, wykorzystano koncentrat asfaltu modyfikowanego kopolimerem blokowym SBS (styren-butadien-styren) Kraton D-1101CM, którego stężenie wynosi  $(9,0 \pm 0,2)\%$  (w pracy koncentrat oznakowano symbolem C9%SBS). Kraton D-1101CM jest czystym kopolimerem blokowym o strukturze liniowej wytworzonym na bazie polistyrenu i polibutadienu, o zawartości masowej polistyrenu równej  $(31 \pm 1)\%$ . Penetracja koncentratu oznaczona w temperaturze 25°C wynosi  $(74,3 \pm 1,2)$  mm/10, natomiast temperatura mięknięcia  $(100,3 \pm 2,0)$ °C (tab. 1). Próbki lepiszczy modyfikowanych uzyskano poprzez wymieszanie, w zróżnicowanych proporcjach, koncentratu z dwoma asfaltami drogowymi 50/70. Jeden z nich został wyprodukowany z wenezuelskiej (V50/70), a drugi – z rosyjskiej ropy naftowej (R50/70). Ich penetracja oznaczona w temperaturze 25°C wynosi odpowiednio  $(66,0 \pm 0,8)$  mm/10 oraz  $(69,3 \pm 0,3)$  mm/10 (tab. 1). Przyjęto założenie, że wszystkie asfalty modyfikowane uzyskane poprzez wymieszanie koncentratu z asfaltami 50/70 będą charakteryzować się niewielkim zróżnicowaniem penetracji. Analizując wartości penetracji w 25°C zestawione w tabeli 1 można stwierdzić, że dla wszystkich badanych lepiszczy zawierają się one w przedziale  $(70 \pm 5)$  mm/10. Ważny jest również fakt, że modyfikacja asfaltu kopolimerem SBS została wykonana metodą przemysłową (w rafinerii), a jedynie procedura mieszania koncentratu z asfaltami niemodyfikowanymi odbywała się w laboratorium. Można zatem stwierdzić, że wszystkie lepiszcza wybrane do przeprowadzenia zaplanowanego eksperymentu spełniają postawione im wcześniej wymagania.

Tabela 1. Podstawowe właściwości badanych lepiszczy asfaltowych

Symbol lepiszcza	Penetracja w 25°C [mm/10]	Temperatura mięknięcia [°C]	Temperatura łamliwości [°C]	Indeks penetracji (Pen <sub>25</sub> / Pen <sub>10</sub> )
V50/70	66,0 ± 0,9	47,4 ± 0,2	-15,1 ± 2,0	-0,69 ± 0,30
R50/70	69,3 ± 0,3	47,8 ± 0,4	-17,0 ± 2,0	-1,32 ± 0,07
V3%SBS	71,3 ± 0,8	52,8 ± 2,0	-18,8 ± 2,9	-0,61 ± 0,10
R3%SBS	71,3 ± 0,4	49,5 ± 0,3	-15,3 ± 1,8	-1,00 ± 0,07
V4,5%SBS	66,4 ± 0,6	74,5 ± 2,0	-20,9 ± 2,1	0,28 ± 0,10
R4,5%SBS	69,5 ± 0,5	77,0 ± 1,1	-17,8 ± 1,8	-0,73 ± 0,14
V6%SBS	66,3 ± 0,8	87,9 ± 1,3	-19,6 ± 1,4	0,53 ± 0,14
R6%SBS	71,9 ± 1,0	83,8 ± 0,6	-18,6 ± 1,2	-0,49 ± 0,15
C9%SBS	74,3 ± 1,2	100,3 ± 2,0	-28,1 ± 1,3	0,84 ± 0,11

Procedura przygotowania próbek kompozytów elastomerowo-asfaltowych składała się z następujących etapów:

- rozgrzanie składników do właściwej temperatury (140°C dla obydwu asfaltów niemodyfikowanych 50/70 oraz 190°C dla koncentratu kopolimeru SBS)
- odważenie właściwej ilości każdego z składników; asfalty 50/70 łączono z koncentratem w trzech proporcjach: 2:1, 1:1 oraz 1:2, otrzymując asfalty modyfikowane o zawartości elastomeru SBS równej odpowiednio: 3%, 4,5% oraz 6% (w stosunku do całkowitej masy otrzymanego asfaltu modyfikowanego)
- wymieszanie składników odważonych w opisanych powyżej proporcjach, z zastosowaniem mieszadła laboratoryjnego o prędkości kątowej równej 150 obr./min,
- w celu uzyskania jednorodnego kompozytu asfaltowo-elastomerowego.

Procedury tej nie stosowano w przypadku próbek asfaltów niemodyfikowanych 50/70 oraz koncentratu kopolimeru SBS, które pozyskano od producentów w postaci gotowej do użycia w badaniach. Sporządzone kompozyty elastomerowo-asfaltowe oznakowano kodem rozpoczynającym się od litery V lub R, oznaczającej odpowiednio asfalt wenezuelski lub rosyjski, a następnie wskazując ostateczną zawartość kopolimeru SBS w kompozycie. W tabeli 1 zamieszczono wyniki oznaczenia podstawowych właściwości lepiszczy wybranych do badań: penetracji w temperaturze 25°C (według PN-EN 1426: 2009), temperatury mięknięcia metodą „Pierścień i kula” (według PN-EN 1427: 2009), temperatury łamliwości metodą Fraassa (według PN-EN 12593: 2009). Zestawiono również wartości indeksu penetracji  $PI$  obliczone na podstawie wyników oznaczenia penetracji lepiszczy w temperaturach 25°C ( $Pen_{25}$ ) i 10°C ( $Pen_{10}$ ), według wzorów:

$$PI = \frac{300 - 500\Delta \log Pen}{15 + 50\Delta \log Pen} \quad (1)$$

$$\Delta \log Pen = \log Pen_{25} - \log Pen_{10} \quad (2)$$

Wszystkie rezultaty zamieszczone w tabeli 1 przedstawiono w postaci średniej arytmetycznej oraz niepewności pomiarowej obliczonej przy poziomie ufności równym 95% zgodnie z zasadami opisanymi w pracach [10, 11]. Szczegółowe omówienie wyników badań zestawionych w tabeli 1 znajduje się w monografii [9].

### 3. Opis zastosowanej metody badawczej

Lepiszczta asfaltowe wybrane do badań poddano próbie rozciągania ze stałą prędkością w duktylometrze wyposażonym w cztery stanowiska pomiarowe, z niezależnymi siłomierzami o zakresie pomiarowym do 500 N i dokładności odczytu 0,02 N. Procedurę pomiarową opracowano korzystając z zapisów normy PN-EN 13589: 2011.

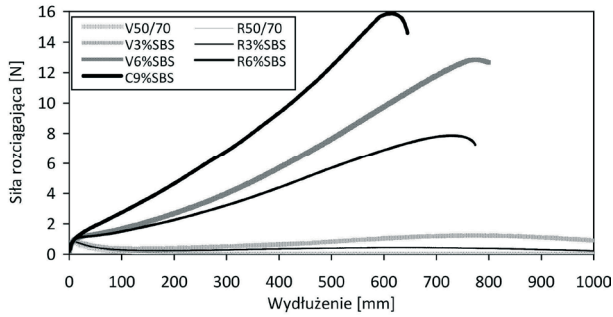
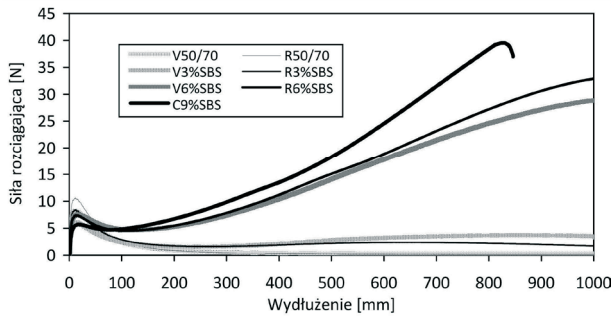
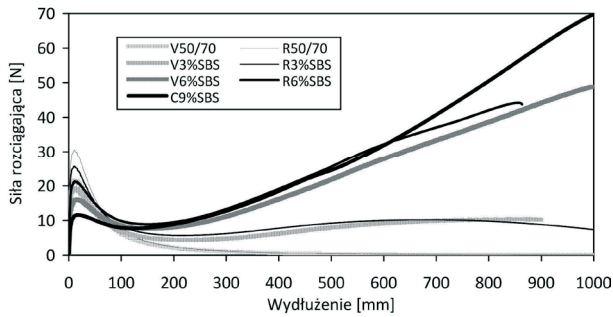
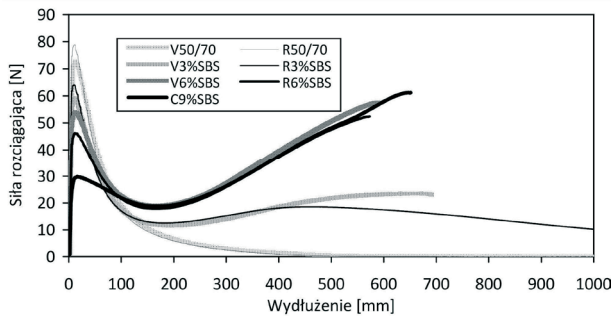
Rozciąganie próbek asfaltowych prowadzono aż do uzyskania wydłużenia 1000 mm, co odpowiada maksymalnej wartości zakresu pomiarowego duktylometru. Wyjątek stanowiły przypadki, gdy doszło do ich zerwania przed osiągnięciem wydłużenia równego 1000 mm. Badania wykonywano zachowując następujące warunki pomiaru:

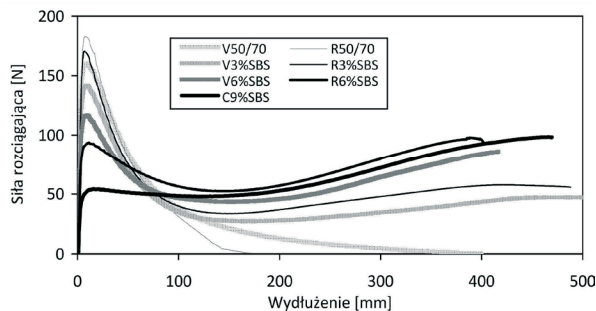
- temperatura pomiaru: 0, 10 i 25°C, utrzymywana z tolerancją  $\pm 0,2^\circ\text{C}$
- prędkość rozciągania próbek:
  - w temperaturze 10°C: 10, 50 i 250 mm/min
  - w temperaturze 0°C i 25°C: 50 mm/min
- zapis wartości wielkości mierzonych: siły rozciągającej, wydłużenia, temperatury cieczy w łaźni duktylometru - w odstępach czasowych równych: 2, 1 oraz 0,2 s, przy prędkości rozciągania próbek równej odpowiednio 10, 50 i 250 mm/min.

Na podstawie zarejestrowanych wyników pomiarów, wyznaczono charakterystyczne wielkości badanych lepiszczy w danych warunkach pomiarowych: maksymalne wartości siły rozciągającej oraz pracę odkształcenia, którą określano zgodnie z PN-EN 13703: 2009.

### 4. Analiza wyników

Rezultaty badań lepiszczy asfaltowych przedstawiono na rysunkach 1-5 w postaci wykresów zależności siły rozciągającej w funkcji wydłużenia (uśrednione wyniki pomiarów przeprowadzonych z użyciem czterech próbek).

Rys. 1. Wykres zależności siły rozciągającej od wydłużenia przy  $T = 25^\circ\text{C}$  i  $v = 50\text{ mm/min}$ Rys. 2. Wykres zależności siły rozciągającej od wydłużenia przy  $T = 10^\circ\text{C}$  i  $v = 10\text{ mm/min}$ Rys. 3. Wykres zależności siły rozciągającej od wydłużenia przy  $T = 10^\circ\text{C}$  i  $v = 50\text{ mm/min}$ Rys. 4. Wykres zależności siły rozciągającej od wydłużenia przy  $T = 10^\circ\text{C}$  i  $v = 250\text{ mm/min}$



Rys. 5. Wykres zależności siły rozciągającej od wydłużenia przy  $T = 0^{\circ}\text{C}$  i  $v = 50$  mm/min

Analizując zależności siły rozciągającej od wydłużenia (rys. 1-5), zaobserwowano bardzo duże zróżnicowanie kształtu wykresów uzyskanych dla badanych lepiszczy asfaltowych. Asfalty niemodyfikowane V50/70 i R50/70, po osiągnięciu wartości maksymalnej  $F_{\max 1}$  (przy wydłużeniu wynoszącym około 10 mm), wykazują systematyczne zmniejszanie wartości siły rozciągającej. Natomiast wszystkie badane kompozyty elastomerowo-asfaltowe, o zawartości kopolimeru SBS w zakresie od 3% do 9%, po osiągnięciu wartości maksymalnej siły rozciągającej  $F_{\max 1}$  (przy wydłużeniu równym 5–30 mm) wykazują początkowo jej zmniejszanie i osiągnięcie wartości minimalnej, po czym ponowny przyrost i osiągnięcie drugiego maksimum siły rozciągającej  $F_{\max 2}$  (w niektórych przypadkach nie zaobserwowano drugiego maksimum ze względu na wyczerpanie zakresu pomiaru wydłużenia duktylometru – wtedy  $F_{\max 2}$  przyjmowano równą wartości siły pomierzonej przy wydłużeniu 1000 mm). Zjawisko to ma najbardziej intensywny charakter w przypadku asfaltów modyfikowanych o dużej zawartości elastomeru (6% lub 9%).

Wartości siły rozciągającej osiągane przy pierwszym maksimum związane są głównie z cechami asfaltu, natomiast zaobserwowane wzmocnienie (przyrost wartości siły) wynika z właściwości elastomeru SBS.

Stwierdzono znaczne zmniejszenie wartości siły rozciągającej badanych lepiszczy przy zwiększaniu temperatury pomiaru w zakresie od 0 do  $25^{\circ}\text{C}$ . Zmiany te są jednak bardzo zróżnicowane i zależą od zawartości elastomeru SBS w asfalcie oraz od analizowanej fazy badania. Największe zmiany zaobserwowano w przypadku pierwszego maksimum i asfaltów niemodyfikowanych (np. dla V50/70 wartość  $F_{\max 1}$  zmniejsza się ze 160 N w temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$  do 0,81 N w  $25^{\circ}\text{C}$ , czyli 198-krotnie). Tak dużą zmienność wartości  $F_{\max 1}$  można wytłumaczyć zwiększeniem sztywności lepiszczy przy obniżeniu ich temperatury.

Znaczną zmienność wartości  $F_{\max 1}$  stwierdzono również w przypadku badań wykonanych w temperaturze  $10^{\circ}\text{C}$  przy zróżnicowanej prędkości rozciągania. Można zauważyć, że im większa była prędkość rozciągania, tym większe wartości  $F_{\max 1}$  zostały uzyskane. Ponieważ próbki lepiszczy asfaltowych rozciągane z prędkością 10 mm/min osiągają określony poziom wydłużenia w czasie 25-krotnie dłuższym niż przy prędkości 250 mm/min, powstają dogodne warunki, aby dochodziło w nich do częściowej relaksacji naprężeń. Jest to ważna przesłanka świadcząca o reologicznym charakterze badanych lepiszczy (w przypadku ciał sprężystych, o wartości siły i naprężeń rozciągających decyduje wyłącznie wartość odkształcenia, a nie prędkość rozciągania). Największe zmiany wartości  $F_{\max 1}$ , wynikające ze zróżnicowania prędkości rozciągania zaobserwowano w przypadku lepiszcza V3%SBS (zmiana 9,7-krotna), a najmniejsze dla C9%SBS (zmiana 4,5-krotna).

Drugie maksimum siły rozciągającej ( $F_{\max 2}$ ) występuje w końcowej fazie rozciągania próbek badanych kompozytów elastomerowo-asfaltowych. Stan ten można utożsamiać ze

zniszczeniem materiału, gdyż po osiągnięciu  $F_{\max 2}$  wartości siły rozciągającej zaczynają się zmniejszać coraz intensywniej, po czym najczęściej można zaobserwować zerwanie próbki. Można stwierdzić, że podobnie jak w przypadku pierwszego maksimum, wartości  $F_{\max 2}$  poszczególnych lepiszczy zwiększają się, gdy zmniejsza się temperatura pomiaru i gdy zwiększa się prędkość rozciągania (przy  $T = 10^{\circ}\text{C}$ ). Natomiast zaobserwowano, że odwrotnie niż w przypadku  $F_{\max 1}$ , wartości  $F_{\max 2}$  zwiększają się przy zwiększeniu zawartości kopolimeru SBS w asfalcie.

Powyższe spostrzeżenia wskazują, że wzajemne relacje pomiędzy wartościami drugiego i pierwszego maksimum siły w teście rozciągania kompozytów elastomerowo-asfaltowych wynikają z ich reologicznego charakteru. Można zatem wprowadzić prosty parametr pozwalający oceniać efektywność modyfikacji asfaltu elastomerem, tj. wskaźnik maksimum siły *MFR* (ang. *maximum force ratio*) obliczany według wzoru:

$$MFR = \frac{F_{\max 2}}{F_{\max 1}} \cdot 100\% \quad (3)$$

W tabeli 2 zestawiono wartości wskaźnika *MFR* obliczone dla badanych asfaltów modyfikowanych (nie obliczono wartości *MFR* dla asfaltów V50/70 i R50/70, ponieważ w ich przypadku nie zaobserwowano drugiego maksimum). Wartości *MFR* zależą od zawartości elastomeru SBS w asfalcie we wszystkich analizowanych przypadkach temperatury pomiaru i prędkości rozciągania próbek. Przy zwiększaniu temperatury pomiaru oraz przy zmniejszaniu prędkości rozciągania (dla  $T = 10^{\circ}\text{C}$ ) stwierdzono przyrost wartości *MFR*. Relacje pomiędzy wartościami pierwszego i drugiego maksimum siły rozciągającej świadczą o wpływie poszczególnych składników lepiszczy modyfikowanych: asfaltu i elastomeru SBS na przebieg krzywej zależności siły rozciągającej od wydłużenia. Zatem wskaźnik maksimum siły *MFR* może być wykorzystany jako kryterium oceny efektywności modyfikacji asfaltów elastomerami. Spośród wyników przedstawionych w tabeli 2, najbardziej przydatne do realizacji tego zadania, zdaniem autora, są rezultaty badań wykonanych w temperaturze  $10^{\circ}\text{C}$  przy prędkości rozciągania równej 250 mm/min. Wyniki uzyskane w tych warunkach pomiaru dla lepiszczy zawierających identyczną zawartość elastomeru SBS wykazują różnice nieprzekraczające 11%. Parametr *MFR* może stanowić alternatywę dla pracy (energii) odkształcenia określanej według PN-EN 13703:2009 jako pole powierzchni zawartej pod linią wykresu zależności siły w funkcji wydłużenia, w przedziale wartości wydłużenia od 0,2 do 0,4 m. Obliczone wartości pracy odkształcenia analizowanych lepiszczy asfaltowych zamieszczono w publikacji [9]. Za mankament metody oceny efektywności modyfikacji asfaltów polimerami na podstawie pracy odkształcenia można uznać fakt, że w żadnym z analizowanych przypadków, przy obliczaniu tego parametru nie zostały uwzględnione wartości ekstremalne  $F_{\max 1}$  i  $F_{\max 2}$ .

Tabela 2. Wartości wskaźnika maksimum siły *MFR* badanych kompozytów elastomerowo-asfaltowych

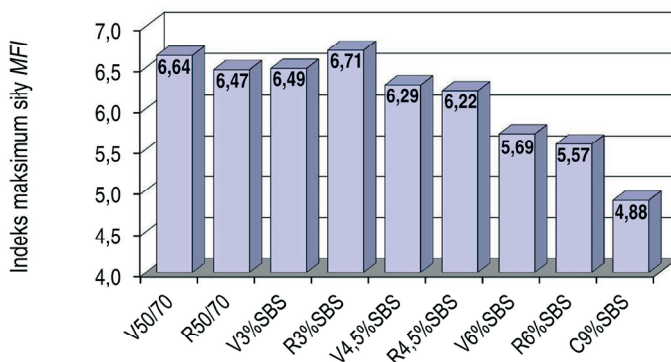
Symbol badanego lepiszcza	<i>MFR</i> [%]				
	$T = 25^{\circ}\text{C}$ $v = 50 \text{ mm/min}$	$T = 10^{\circ}\text{C}$ $v = 10 \text{ mm/min}$	$T = 10^{\circ}\text{C}$ $v = 50 \text{ mm/min}$	$T = 10^{\circ}\text{C}$ $v = 250 \text{ mm/min}$	$T = 0^{\circ}\text{C}$ $v = 50 \text{ mm/min}$
V3%SBS	151	61	54	40	34
R3%SBS	56	100	42	29	34
V4,5%SBS	446	202	155	70	50
R4,5%SBS	618	195	139	72	57
V6%SBS	1075	380	304	108	74
R6%SBS	705	446	209	114	102
C9%SBS	1293	583	601	207	183

Wyniki oznaczenia pierwszego maksimum siły  $F_{\max 1}$  w różnych temperaturach można wykorzystać do oceny wrażliwości termicznej lepiszczy asfaltowych. Opierając się na równaniu Walthera [12] sformułowano wzór na obliczenie indeksu maksimum siły *MFI* (ang. *maximum force index*):

$$MFI = \frac{\log \log F_{\max 1}^{T_2} - \log \log F_{\max 1}^{T_1}}{\log T_2 - \log T_1} \quad (4)$$

gdzie:  $F_{\max 1}^{T_1}, F_{\max 1}^{T_2}$  – wartości pierwszego maksimum siły rozciągającej [mN] odpowiednio w temperaturze  $T_1$  i  $T_2$  wyrażonej w Kelwinach; do obliczeń przyjęto wyniki badań wykonanych w temperaturach  $T_1 = 273,15$  K (0°C) i  $T_2 = 298,15$  K (25°C).

Wartości indeksu maksimum siły *MFI* obliczone według wzoru (4) przedstawiono na rys. 6. Można zauważyć, że wrażliwość termiczna badanych lepiszczy asfaltowych określana na podstawie wartości pierwszego maksimum siły rozciągającej zależy od zawartości elastomeru SBS w asfalcie. Przy czym wartości uzyskane dla asfaltów modyfikowanych zawierających 3% kopolimeru SBS nie wykazują znaczących różnic w porównaniu z asfaltami niemodyfikowanymi 50/70. Natomiast, w odróżnieniu od indeksu penetracji (tab. 1) nie stwierdzono zależności wrażliwości termicznej od pochodzenia asfaltu niemodyfikowanego 50/70.



Rys. 6. Wartości indeksu maksimum siły *MFI*

## 5. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań sformułowano następujące wnioski:

- kształt wykresu siły rozciągającej w funkcji wydłużenia zależy istotnie od zawartości elastomeru SBS w asfalcie modyfikowanym
- dla asfaltów modyfikowanych zawierających 3-9% kopolimeru SBS występują dwa maksima siły rozciągającej; zaproponowany wskaźnik maksimum siły MFR obliczany jako stosunek wartości drugiego i pierwszego maksimum siły można wykorzystać do oceny efektywności modyfikacji asfaltów elastomerami; za najbardziej przydatne uznano wyniki badań wykonanych w temperaturze 10°C przy prędkości rozciągania równej 250 mm/min
- indeks maksimum siły *MFI* określony na podstawie wartości pierwszego maksimum siły określonych w temperaturze 0 i 25°C zależy od zawartości elastomeru SBS w lepiszczy i może stanowić ciekawą alternatywę dla indeksu penetracji.

## Literatura

- 1 Yildirim Y., Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 2007, 21, s. 66–72.
- 2 Sybilski D., Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce, *Studia i materiały, zeszyt 50*, Warszawa, IBDiM 2000
- 3 Cerni G., Cardone F., Colagrande S., Low-temperature tensile behaviour of asphalt binders: Application of loading time–temperature–conditioning time superposition principle, *Construction and Building Materials*, 2011, 25, s. 2133–2145.
- 4 Ho S., Zanzotto L., The low temperature properties of conventional and modified asphalt binders evaluated by the failure energy and secant modulus from direct tension tests, *Materials and Structures*, 2005, 38, s. 137–143.
- 5 Largeaud S., Raffégeau H., Simaillaud B., Eckmann B., Sauger E., Ollier S., Hervé G., Wendling L., Pascot J., Vaniscote J.-C., Chabert D., The use of direct tension tests for the assessment of low temperature properties of bituminous binders, *Materials and Structures*, 2004, 37, s. 351–355.
- 6 Blomberg T., Low temperature test methods for bituminous binders, *Bitumen*, 2003, 65, s. 22–25.
- 7 Radziszewski P., Kalabińska M., Piłat J., Ocena kohezji lepiszczy drogowych na podstawie badania ciągliwości w funkcji temperatury, *Drogi i Mosty*, 2002, 1, s. 101–113
- 8 Radziszewski P., Wpływ modyfikacji elastomerem SBS na właściwości reologiczne lepiszczy asfaltowych, *Polimery*, 2008, 53(7–8), s. 559–563.
- 9 Słowik M., Wybrane zagadnienia lepkosprężystości drogowych asfaltów modyfikowanych zawierających elastomer SBS, seria Rozprawy, Nr 508, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
- 10 Konieczka P., Namieśnik J. (red.), Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2007.
- 11 Słowik M., Analiza niepewności pomiarowych przy ocenie właściwości asfaltów drogowych, *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, 2010, 7, s. 129–144.
- 12 Sybilski D., Polimeroasfalty drogowe. Jakość funkcjonalna. Metodyka i kryteria oceny, *Studia i materiały, zeszyt 45*, Warszawa, IBDiM 1996.

## Analysis of the rheological behavior of polymer modified asphalt binders subjected to force-ductility test

Mieczysław Słowik

*Institute of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering,  
Poznan University of Technology, e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl*

**Abstract:** The basic measurement method used to assess the properties of polymer modified bitumens is a tensile test. In this study, PMB specimens of various elastomer SBS content (in the range from 3% to 9%), but a similar penetration, determined at 25°C were tested. In order to evaluate the rheological properties and temperature susceptibility, the Force-Ductility Tests were conducted at 0, 10 and 25°C. On the basis of the obtained results, the values of the maximum force ratio (*MFR*) were calculated. It could characterize the efficiency of bitumen modification by elastomer addition. Moreover, on the basis of the first tensile force maximum determined at 0 and 25°C, values of the maximum force index (*MFI*) were calculated. This parameter may be an alternative to commonly used penetration index.

**Keywords:** Polymer Modified Bitumen, Rheological Properties, Cohesion, Force-Ductility test, Temperature Susceptibility, Deformation Energy