



MIECZYŚŁAW SŁOWIK<sup>1)</sup>  
PRZEMYSŁAW ADAMCZAK<sup>2)</sup>

## OCENA WPŁYWU STARZENIA KRÓTKOTERMINOWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH MODYFIKOWANYCH ELASTOMEREM SBS<sup>3)</sup>

**STRESZCZENIE.** Przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych poddanych symulowanemu starzeniu z zastosowaniem różnych procedur laboratoryjnych. Badaniom poddano próbki asfaltu drogowego gatunku 50/70 zwykłego oraz modyfikowanego dodatkiem elastomeru SBS w ilości 3, 5 i 7% (m/m). Starzenie krótkoterminowe lepiszczy asfaltowych symulowano stosując trzy wybrane metody laboratoryjne: TFOT (*Thin Film Oven Test*), RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) oraz TFOTmod (zmodyfikowaną metodę TFOT).

Wpływ starzenia krótkoterminowego na zachowanie asfaltów modyfikowanych oceniano na podstawie zmiany ich konsystencji, wrażliwości temperaturowej oraz cech reologicznych – lepkości i sprężystości, zaobserwowanych jako efekt starzenia symulowanego w laboratorium z zastosowaniem każdej z metod. Analiza wyników dotyczyła zmian w zachowaniu badanych lepiszczy asfaltowych będących efektem starzenia symulowanego różnymi metodami laboratoryjnymi oraz wpływu zawartości modyfikatora (elastomeru SBS) na zachowanie lepiszczy poddanych procesowi starzenia. Wykazano znaczne zróżnicowanie odporności na starzenie badanych lepiszczy asfaltowych, w zależności od zawartości kopolimeru SBS. Zaobserwowano istotne różnice w zachowaniu lepiszczy poddanych starzeniu z zastosowaniem różnych metod.

<sup>1)</sup> dr inż. – Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej

<sup>2)</sup> mgr inż. – Grupa Kapitałowa PBG S.A.

<sup>3)</sup> Artykuł stanowi rozszerzoną wersję referatu zaprezentowanego podczas X Międzynarodowej Konferencji „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2004 [1]

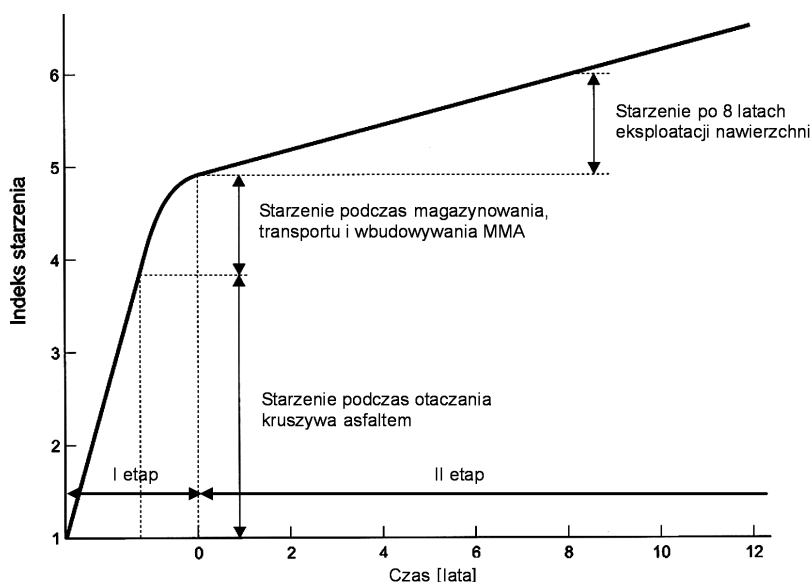
## 1. WPROWADZENIE

Zjawisko starzenia asfaltów jest jedną z podstawowych przyczyn powodujących degradację nawierzchni asfaltowych. Wśród najistotniejszych rodzajów zniszczenia nawierzchni związanych ze starzeniem lepiszcza można wymienić: spękania wywołane obciążeniem ruchem oraz zmianami temperatury, a także zjawisko degradacji nawierzchni poprzez ubytki ziaren kruszywa oraz lepiszcza [2]. W procesie starzenia asfaltów można wyróżnić dwa odrębne mechanizmy. Podstawowy mechanizm powoduje nieodwracalne zmiany w strukturze chemicznej lepiszcza i ma znaczący wpływ na jego właściwości reologiczne. Najważniejszymi zjawiskami występującymi w tym typie starzenia są: utlenianie, utrata lotnych składników olejowych (odparowanie) oraz migracja składników olejowych z asfaltu do ziaren kruszywa („pocenie”). Drugim mechanizmem starzenia asfaltów jest proces odwracalny zwany stwardnieniem fizycznym. Zjawisku temu przypisywane są zmiany struktury molekularnej (mikrostruktury) lepiszcza asfaltowego związane z dążeniem do osiągnięcia optymalnego stanu termodynamicznego w określonych warunkach – najczęściej w niskich temperaturach (poniżej 0 °C) [2, 3]. Stwardnienie fizyczne wywołuje zmiany właściwości reologicznych przy niezmienionej budowie chemicznej asfaltu. Jest to jedno z najslabiej rozpoznanych zjawisk fizycznochemicznych mających wpływ na cechy fizyczne oraz reologiczne asfaltów [4].

Asfalty stosowane w nawierzchniach drogowych są narażone na procesy starzenia podczas ich magazynowania, otaczania kruszywa, transportu mieszanki mineralno-asfaltowej na miejsce wbudowania, układania warstwy asfaltowej, jak również w całym okresie eksploatacji nawierzchni. Najbardziej gwałtowny przebieg starzenia asfaltów zachodzi na powierzchni ziaren kruszywa w wysokiej temperaturze jaka występuje podczas produkcji i wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej. W fazie eksploatacji nawierzchni proces starzenia ulega wyraźnemu spowolnieniu ze względu na stosunkowo niską temperaturę występującą w użytkowanej nawierzchni [5]. Można zatem wyodrębnić dwa etapy procesu starzenia asfaltów:

- I etap – starzenie krótkoterminowe (technologiczne) zachodzące podczas produkcji, transportu i układania mieszanki mineralno-asfaltowej. Asfalt jest wówczas poddany działaniu podwyższonej temperatury (140 - 200 °C) i tlenu zawartego w powietrzu;
- II etap – starzenie długoterminowe (eksploatacyjne) zachodzące w czasie użytkowania nawierzchni, kiedy jej temperatura w okresie letnich upałów może wynosić 60 - 70 °C, jednakże asfalt jest narażony nie tylko na działanie powietrza, lecz również promieniowania słonecznego, wody, środków chemicznych oraz innych czynników o mniejszym znaczeniu [6].

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie starzenie lepiszczy asfaltowych zachodzące w czasie produkcji i wbudowania mieszanki mineralno-asfaltowej oraz eksploatacji nawierzchni asfaltowej.



Rys.1. Wykres starzenia lepiszczy asfaltowych zachodzącego w czasie produkcji i w budowania mieszanki mineralno-asfaltowej (MMA) oraz eksploatacji nawierzchni [7]  
 Fig.1. Ageing of bituminous binders during asphalt mix manufacturing and paving and finally in service [7]

Wśród czynników mających wpływ na starzenie asfaltów można wymienić [2]:

- właściwości asfaltu i jego zawartość w mieszance mineralno-asfaltowej;
- rodzaj kruszywa (naturalne, łamane, sztuczne);
- uziarnienie mieszanki mineralnej;
- zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej;
- parametry związane z procesami technologicznymi, tj. temperatura i czas.

Wszystkie wymienione powyżej czynniki działają w tym samym czasie i powodują, że starzenie asfaltów jest procesem bardzo złożonym. Poznanie zjawiska starzenia jest szczególnie skomplikowane w przypadku asfaltów modyfikowanych, gdyż w wyniku starzenia może dojść do zniszczenia struktury polimeru. Właściwości asfaltów modyfikowanych poddanych starzeniu zależą od utleniania asfaltu oraz stopnia rozpadu polimeru. Wpływ na to mają typ chemiczny i rodzaj asfaltu oraz rodzaj i zawartość polimeru [6].

Opracowano wiele metod laboratoryjnych służących do ilościowej oceny starzenia asfaltów zachodzącego zarówno w czasie produkcji oraz w budowywania mieszanki mineralno-asfaltowej, jak i podczas eksploatacji nawierzchni [3]. Symulację starzenia można przyspieszyć w laboratorium poprzez zastosowanie podwyższonej temperatury, zmniejszonej grubości warstwy asfaltu, podwyższonego ciśnienia tlenu, lub poprzez kombinację powyższych zabiegów [2, 4]. W tabelicy 1 zestawiono wybrane

metody laboratoryjnej symulacji starzenia asfaltów (nazwy metod pozostawiono w oryginalnej wersji w języku angielskim).

Tablica 1. Metody symulacji starzenia asfaltów [3]  
Table 1. Test methods for bitumen ageing [3]

Nazwa metody	Zachodzące zjawiska	Warunki starzenia	Masa próbek
Thin Film Oven Test (TFOT)	utlenianie, odparowanie	163 °C, 5 h	50 g
Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)	utlenianie, odparowanie	163 °C, 75 min	35 g
Rotating Flask Test (RFT)	utlenianie, odparowanie	163 °C, 2,5 h	100 g
Loss On Heating Test (LOHT)	utlenianie, odparowanie	163 °C, 5 h	50 g
ARRB Durability Test	utlenianie	100 °C	odpowiadająca grubości 20 µm
Pressure Ageing Vessel (PAV)	utlenianie, odparowanie	60-110 °C, 2,10 MPa, 20 h	do 50 g
Rolling Microfilm Circulating Oven Test (RMF-C)	utlenianie	99 °C, 48 h	2,5 g
Thin Film Accelerated Aging Test (TFAAT)	utlenianie, odparowanie	113 °C, 72 h	4 g
Test acc. to CRR	utlenianie	85 °C, 144 h	500 g

Do oceny starzenia krótkoterminowego (technologicznego) najczęściej wykorzystywane są dwie metody: TFOT oraz RTFOT [9 – 13]. Metody te zostały opracowane w Stanach Zjednoczonych w latach 1940 (TFOT) oraz 1959 (RTFOT). Choć w obydwu metodach stosowana jest identyczna temperatura wygrzewania próbek ( $163 \pm 1^\circ\text{C}$ ), część badaczy uważa, że nie mogą być stosowane zamiennie, a metoda RTFOT jest testem ostrzejszym niż TFOT [8]. Porównanie kluczowych parametrów metod TFOT i RTFOT zestawiono w tablicy 2. Zarówno jedna jak i druga metoda mają na celu postarzenie asfaltu i wywołanie zmian jego właściwości zbliżonych do zmian zachodzących w warunkach rzeczywistych, jakie występują w mieszalniku wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych przy temperaturze nie przekraczającej  $150^\circ\text{C}$  [8, 14]. W przypadku zastosowania asfaltu konwencjonalnego w mieszance mineralno-asfaltowej warunek ten przeważnie jest spełniony i symulacja starzenia z użyciem metod TFOT i RTFOT odbywa się przy temperaturze podwyższonej w stosunku do temperatury produkcji MMA. Natomiast asfalty modyfikowane elastomerami charakteryzują się większą lepkością w porównaniu z asfaltami konwencjonalnymi. Dlatego też w celu prawidłowego otoczenia ziaren kruszywa, ułożenia i zagęszczenia warstwy asfaltowej zawierającej asfalt modyfikowany elastomerem niezbędne jest zastosowanie wyższej

temperatury (nawet do 190 °C – producent nie zaleca przekraczania temperatury 200°C – ze względu na możliwość rozpadu polimeru). W takich warunkach zarówno odparowanie i utlenianie asfaltu, jak i zmiany struktury polimeru mogą zachodzić znacznie gwałtowniej niż w temperaturze 163°C, jaka została umownie przyjęta w metodach TFOT i RTFOT. Z tego powodu autorzy zmodyfikowali metodę TFOT i przeprowadzili symulowane starzenie lepiszczy w zróżnicowanych warunkach temperatury - przyjęto temperaturę badania, w której asfalt osiąga lepkość o wartości 0,2 Pa·s (EVT 0,2).

Tablica 2. Porównanie metod starzenia TFOT i RTFOT [8]  
Table 2. Comparison of TFOT and RTFOT ageing test methods [8]

Parametr	Metoda TFOT	Metoda RTFOT
Naczynie do próbek	płaski cylinder metalowy	szklana butelka
Wymiary naczynia	średnica 140 mm, głębokość 9,5 mm	średnica 64 mm, głębokość 140 mm
Masa próbki	50 g na każdy cylinder	35 g na każdą butelkę
Prędkość obracania próbek	5-6 obr/min (dookoła osi pionowej)	15 obr/min (dookoła osi poziomej)
Wymuszony dopływ powietrza	brak	strumień gorącego powietrza
Czas badania	300 min	85 min
Temperatura badania	163 ± 1°C	163 ± 1°C
Ograniczenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• łuszczenie się, tworzenie się skorupy na powierzchni próbek,</li> <li>• czas badania jest zbyt długi aby mógł być praktycznie wykorzystany w systemie zapewnienia jakości produkcji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• asfalt może wyciekać z butelek, szczególnie podczas badania lepiszczy modyfikowanych polimerami,</li> <li>• możliwość wystąpienia segregacji podczas badania lepiszczy modyfikowanych polimerami</li> </ul>

Asfalty poddane starzeniu wykazują istotne zmiany właściwości mechanicznych oraz struktury chemicznej. Dlatego efekt starzenia może być oceniany zarówno poprzez badania cech reologicznych, jak i analizę chemiczną. W większości przypadków do oceny starzenia wykorzystuje się jedynie wyniki oznaczania standardowych właściwości charakteryzujących konsystencję asfaltów, tj. penetracji i temperatury mięknięcia [3]. W niniejszym artykule do oceny starzenia badanych asfaltów wykorzystano również rezultaty oznaczania cech reologicznych: lepkości dynamicznej i nawrotu sprężystego, a także wrażliwości termicznej.

Celem pracy była ocena zmian zachowania asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS poddanych symulowanemu starzeniu krótkoterminowemu z zastosowaniem metod standardowych TFOT i RTFOT, a także zaproponowanej przez autorów artykułu zmodyfikowanej metody TFOT (TFOTmod). Ocenie ilościowej poddano również wpływ zawartości kopolimeru SBS (w zakresie od 0 do 7 %) na zachowanie lepiszczy poddanych symulowanemu starzeniu.

## 2. METODYKA BADAWCZA

Badaniom poddano asfalt drogowy gatunku 50/70 (zgodnie z klasyfikacją według normy PN-EN 12591), otrzymany w wyniku destylacji wenezuelskiej ropy naftowej, stosowany do budowy nawierzchni drogowych także w Polsce. Asfalt ten modyfikowano w warunkach laboratoryjnych poprzez wprowadzenie elastomeru SBS o strukturze liniowej (nazwa handlowa Kraton D-1101 CM) i mieszanie składników w czasie dwóch godzin w temperaturze uzależnionej od zawartości elastomeru: 3 % – 170 °C, 5 % – 180 °C, 7% – 190 °C, aż do uzyskania jednorodnej struktury. W tablicy 3 zestawiono próbki badanych lepiszczy asfaltowych wraz z ich symbolicznym oznaczeniem stosowanym w niniejszej pracy.

Tablica 3. Zestawienie próbek badanych lepiszczy asfaltowych  
Table 3. List of bituminous binder specimens

Oznaczenie próbki	Zawartość procentowa masy asfaltu i elastomeru SBS w próbce
50/70	100 % asfaltu 50/70
50/70+3% SBS	97% asfaltu 50/70 z dodatkiem 3% elastomeru SBS
50/70+5% SBS	95% asfaltu 50/70 z dodatkiem 5% elastomeru SBS
50/70+7% SBS	93% asfaltu 50/70 z dodatkiem 7% elastomeru SBS

Każdą z próbek opisanych w tablicy 3 poddano symulowanemu starzeniu technologicznemu z zastosowaniem trzech metod laboratoryjnych:

- TFOT (Thin Film Oven Test), zgodnie z PN-EN 12607-2,
- RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), zgodnie z PN-EN 12607-1,
- TFOTmod – zmodyfikowana metoda TFOT, zaproponowana przez autorów pracy.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach lepiszczy postarzonych z użyciem poszczególnych metod symulacji laboratoryjnej, jak również na próbkach, których nie poddano starzeniu. Przeprowadzono pomiary następujących właściwości lepiszczy:

- penetracji w temperaturze 25 °C (Pen25) oraz 5 °C (Pen5), wg PN-EN 1426: 2001; wykonano po 6 pomiarów, uzyskując średnią wartość współczynnika zmienności [15] równą 2,3 % (dla wyników oznaczenia Pen25) oraz 7,0 % (dla wyników oznaczenia Pen5);

- temperatury mięknięcia według metody „Pierścień i Kula”  $T_{PK}$ , zgodnie z PN-EN 1427: 2001; wykonano po 2 pomiary, uzyskując średnią wartość współczynnika zmienności równą 0,6 %;
- temperatury łamliwości według Fraassa  $T_F$ , zgodnie z PN-EN 12593; wykonano po 2 pomiary, uzyskując średnią wartość współczynnika zmienności równą 7,5 %;
- lepkości dynamicznej w temperaturze 60 °C  $\eta_{60}$ ; pomiary przeprowadzono metodą wiskozymetru rotacyjnego (z zastosowaniem naczynia cylindrycznego oraz wirnika w kształcie walca umieszczonych na wspólnej osi pionowej); wykonano po 3 pomiary, uzyskując średnią wartość współczynnika zmienności równą 4,0 %;
- nawrotu sprężystego  $ER$  - zgodnie z procedurą pomiarową opisaną w [16]; wykonano po 3 pomiary, uzyskując średnią wartość współczynnika zmienności równą 2,2 % (dla wyników nawrotu sprężystego oznaczonego po 30 min);

Na podstawie uzyskanych rezultatów wyznaczono, korzystając z metod analitycznych, następujące parametry lepiszczy:

- indeks penetracji  $PI$  – według wzoru [7, 17]:

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}, \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – tzw. wrażliwość temperaturowa obliczona według wzoru [7, 17]:

$$A = \frac{\log(Pen\ 25) - \log(Pen\ 5)}{25 - 5}, \quad (2)$$

- indeks starzenia ( $VAI$  – *Viscosity Ageing Index*) – według wzoru [14]:

$$VAI = \frac{\eta_{60}^{aged}}{\eta_{60}}, \quad (3)$$

gdzie:

$\eta_{60}^{aged}$  – lepkość dynamiczna oznaczona w temperaturze 60 °C na próbce lepiszcza asfaltowego poddanego starzeniu metodą TFOT, RTFOT lub TFOTmod;

- współczynnik opóźnienia sprężystego  $\alpha_s$  – według wzoru [18, 19]:

$$\alpha_s = \left( 1 - \frac{ER^{2\ min}}{ER^{180\ min}} \right) \cdot 100, \quad [\%] \quad (4)$$

gdzie:

$ER^{2\ min}$  – nawrót sprężysty oznaczony po 2 min od przecięcia próbki [%],

$ER^{180\ min}$  – nawrót sprężysty oznaczony po 180 min od przecięcia próbki [%].



Laboratoryjne metody symulacji starzenia krótkoterminowego (technologicznego) polegające na poddaniu próbek asfaltów działaniu wysokiej temperatury, przy jednoczesnym zapewnieniu dostępu tlenu zawartego w powietrzu atmosferycznym, pozwalają w sposób przybliżony ocenić odporność lepiszczy na to zjawisko. W niniejszej pracy badane lepiszcza poddano symulowanemu starzeniu wykorzystując standardowe metody: TFOT (*Thin Film Oven Test*) oraz RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), w których cienka warstwa asfaltu jest wygrzewana w temperaturze  $163 \pm 1^\circ\text{C}$  w czasie odpowiednio 5 h oraz 75 min. Szczegółowe procedury tych badań opisano w normach PN-EN 12607-1 oraz PN-EN 12607-2.

Symulację starzenia zmodyfikowaną metodą TFOT (TFOTmod) przeprowadzono w różnych temperaturach odpowiadających lepkości dynamicznej o wartości 0,2 Pa·s. Temperatury ekwiwalentne lepkości 0,2 Pa·s wyznaczono na podstawie wyników oznaczania lepkości dynamicznej poszczególnych asfaltów w temperaturach  $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  oraz  $135^\circ\text{C}$ , które opublikowano w pracy [1] korzystając z wykresu BTDC (*Bitumen Test Data Chart*) Heukeloma [6, 7, 17, 20]. Temperaturę, w której lepkość asfaltu wynosi 0,2 Pa·s przyjmuje się umownie jako optymalną temperaturę stosowaną w procesie otaczania kruszywa asfaltem [7, 21]. Wartości tej temperatury dla badanych lepiszczy zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Temperatury starzenia zastosowane w metodzie TFOTmod  
Table 4. Temperature of ageing process applied in TFOTmod method

Lepiszczce asfaltowe	50/70	50/70+3 % SBS	50/70+5 % SBS	50/70+7 % SBS
Temperatura zastosowana w metodzie TFOTmod, °C	145	156	177	178

### 3. ANALIZA I DYSKUSJA REZULTATÓW BADAŃ

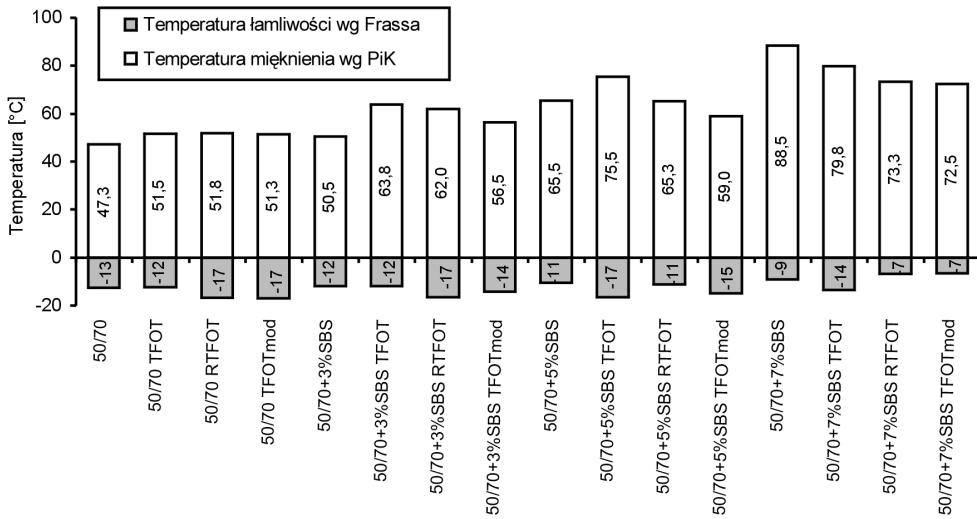
Wyniki badań w postaci średniej arytmetycznej, a także wartości parametrów obliczonych na ich podstawie przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 1-7.

Analizując rezultaty badań szczególną uwagę zwrócono na dwa problemy:

- zmiany w zachowaniu badanych lepiszczy asfaltowych będące efektem starzenia technologicznego symulowanego różnymi metodami laboratoryjnymi;
- wpływ zawartości modyfikatora (elastomeru SBS) na zachowanie lepiszczy poddanych procesowi starzenia.

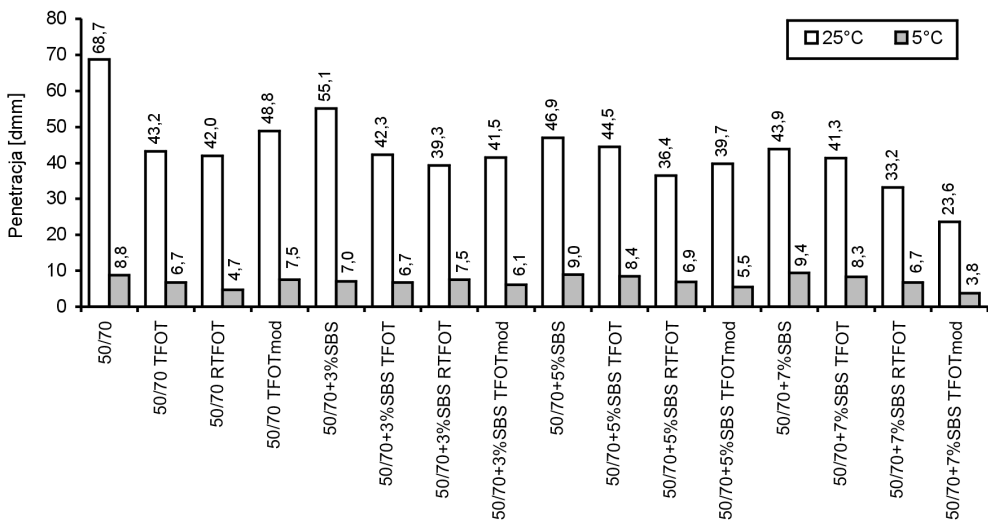
W pierwszej kolejności analizie poddano właściwości badanych lepiszczy opisujące ich konsystencję oraz wrażliwość termiczną w zakresie temperatur eksploatacyjnych nawierzchni. Wyniki oznaczenia temperatury mięknięcia oraz temperatury łamliwości przedstawiono na wspólnym wykresie na rysunku 2. Taki sposób prezentacji rezultatów pozwala dodatkowo ocenić temperaturowy zakres plastyczności [6, 20] – wielkość charakteryzującą przedział temperatur, w których lepiszcze wykazuje właściwości lepkosprężyste, umownie przyjmowany jako różnica pomiędzy temperaturą mięknięcia i temperaturą łamliwości.



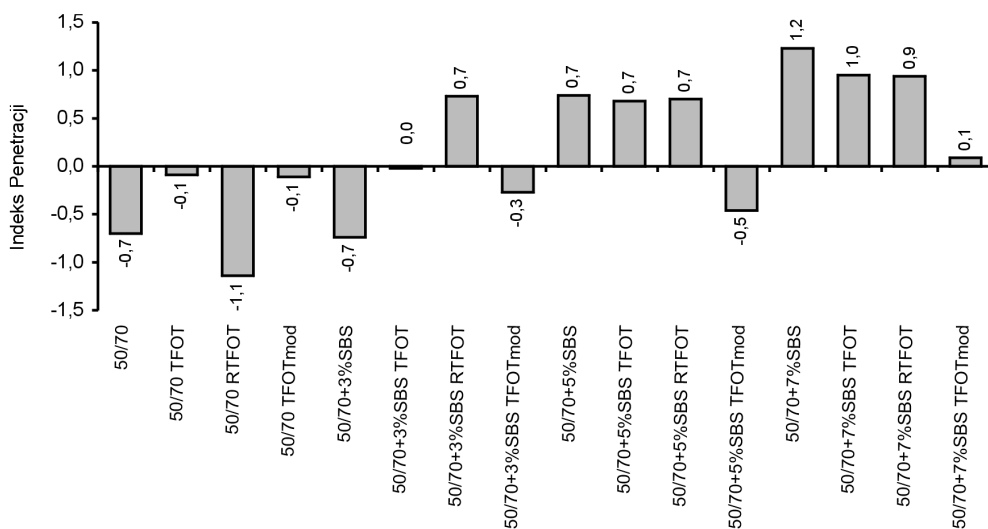


Rys.2. Temperatura mięknięcia oraz temperatura łamiwości badanych lepiszczy asfaltowych  
Fig.2. Softening Point (R&B) and Fraass Breaking Point of the tested bituminous binders

Rysunek 3 przedstawia wartości penetracji oznaczonej w temperaturze 25 oraz 5 °C. Na ich podstawie wyznaczono metodą analityczną – zgodnie z wzorami (1) i (2) – wartości indeksu penetracji poszczególnych lepiszczy, a wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 4.



Rys.3. Penetracja badanych lepiszczy asfaltowych oznaczona w temperaturach 25 i 5°C  
Fig.3. Penetration of the tested bituminous binders determined at 25 and 5°C



Rys.4. Indeks penetracji badanych lepiszczy asfaltowych  
Fig.4. Penetration Index of the tested bituminous binders

Zaobserwowano, że w przypadku asfaltu 50/70 wartości temperatury mięknięcia (rys. 2) wzrosły w wyniku zastosowania poszczególnych metod starzenia o 4,0 – 4,5 °C, a zatem usztywnienie asfaltu nie jest duże. Większe zróżnicowanie wpływu starzenia na wartość temperatury mięknięcia stwierdzono w przypadku lepiszczy modyfikowanych. Modyfikacja dodatkiem elastomeru w ilości 3, 5 i 7 % (m/m) powoduje wzrost wartości  $T_{PIK}$  – odpowiednio o 3,2; 18,2 oraz 41,2 °C. Efekt starzenia jest uzależniony od zawartości elastomeru. W przypadku asfaltu 50/70 + 3 % SBS zaobserwowano podobne zmiany jak w asfalcie wyjściowym – nastąpił przyrost temperatury mięknięcia, ale zmiany ilościowe są większe – od 6,0 °C (TFO Tmod) do 13,3 °C (TFOT). Bardzo interesujące zjawisko zauważono badając asfalt 50/70 + 5 % SBS. Starzenie symulowane metodą TFOT spowodowało wzrost wartości  $T_{PIK}$  – o 10,0 °C, metodą TFOTmod – spadek o 6,5 °C, natomiast nie stwierdzono istotnej różnicy po starzeniu metodą RTFOT. W przypadku asfaltu 50/70 + 7 % SBS każda z zastosowanych metod starzenia spowodowała obniżenie wartości temperatury mięknięcia, przy czym największy spadek odnotowano dla metody TFOTmod (o 16,0 °C), a najniższy – TFOT (o 8,7 °C).

Temperatura łamliwości oznaczana metodą Fraassa (rys. 2) jest od wielu lat podstawowym narzędziem służącym do oceny zachowania asfaltów drogowych w niskich temperaturach eksploatacji nawierzchni. Wiarygodność tej metody pozostawia jednak wiele do życzenia – w szczególności wykazuje słabą powtarzalność pomiarów. Dlatego też uzyskane wyniki należy analizować z dużą ostrożnością, tym bardziej, że w większości przypadków różnice pomiędzy wynikami nie są statystycznie istotne. Można jednak zauważyć pewną prawidłowość polegającą na zwiększaniu wartości temperatury łamliwości wraz ze wzrostem zawartości elastomeru w asfalcie. Jest to

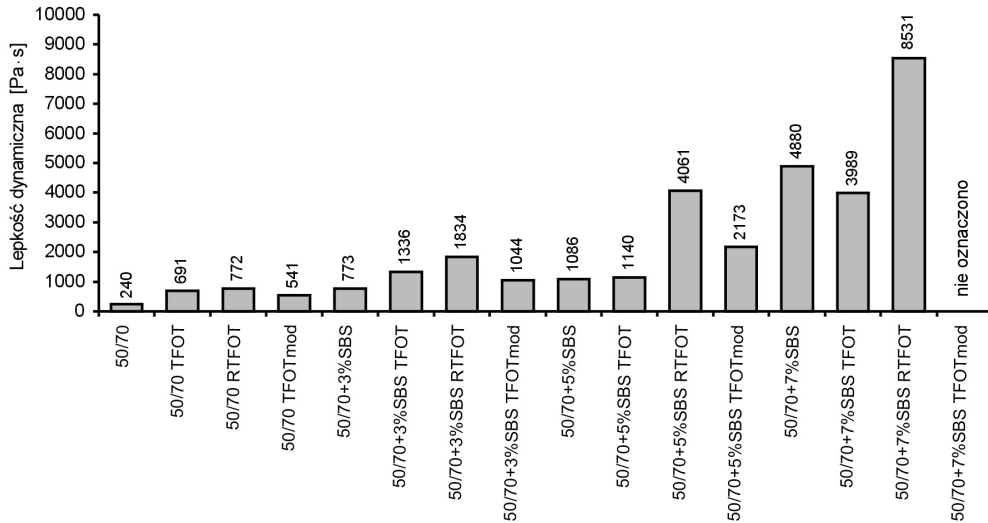
dziwne spostrzeżenie, gdyż polepszenie właściwości sprężystych lepiszcza (poprzez modyfikację elastomerem) powinno powodować zwiększenie wartości odkształceń krytycznych, przy których dochodzi do pęknięcia warstwy asfaltu, a to z kolei winno skutkować obniżeniem temperatury łamliwości, jak wykazano m. in. w pracy [21]. Jednak wyniki uzyskane w niniejszej pracy nie potwierdziły powyższych stwierdzeń. Ponadto w większości przypadków odnotowano niższe wartości temperatury łamliwości asfaltów poddanych starzeniu w porównaniu do próbek wyjściowych. Jak zauważono wcześniej, do otrzymanych wyników pomiaru temperatury łamliwości należy podchodzić z rezerwą i nie wyciągać radykalnych wniosków.

Wartości penetracji oznaczonej w temperaturze 25 °C (rys. 3) na próbkach asfaltu 50/70 poddanych starzeniu są niższe w porównaniu z asfaltem wyjściowym. Największy spadek zaobserwowano po zastosowaniu metody RTFOT (o 39 %), a najmniejszy – TFOTmod (o 29 %). W przypadku lepiszczy modyfikowanych dodatkiem elastomeru SBS, których penetracja ma wartości coraz niższe przy wzrastającej zawartości modyfikatora, starzenie również powoduje ich usztywnienie i spadek penetracji. Największe zmiany ilościowe zaobserwowano w przypadku asfaltu 50/70 + 7 % SBS, dla którego spadek penetracji spowodowany starzeniem metodą TFOTmod wynosi 46 %. Pomiar penetracji w temperaturze 5 °C może być obarczony znacznie większym błędem pomiarowym niż w przypadku oznaczenia w temperaturze 25 °C. Dlatego uzyskanych rezultatów nie analizowano, a jedynie wykorzystano je do obliczenia indeksu penetracji (rys. 4).

W przypadku próbki asfaltu 50/70 zaobserwowano zróżnicowany wpływ starzenia na wrażliwość termiczną charakteryzowaną wartościami indeksu penetracji – w wyniku zastosowania metody TFOT oraz TFOTmod uzyskano wzrost wartości  $PI$  o 0,6, natomiast metoda RTFOT spowodowała spadek wartości  $PI$  o 0,4. Asfalty modyfikowane dodatkiem 5 oraz 7 % elastomeru SBS wykazały większe wartości  $PI$ , a tym samym większą odporność na zmiany temperatury – odnotowano przyrosty wartości  $PI$  odpowiednio o 1,4 oraz 1,9. Asfalty te wykazały niewielkie zmiany indeksu penetracji (nie przekraczające 0,3) po starzeniu metodą TFOT i RTFOT. Natomiast metoda TFOTmod wywołała największy spadek wartości  $PI$  – odpowiednio 1,2 i 1,1.

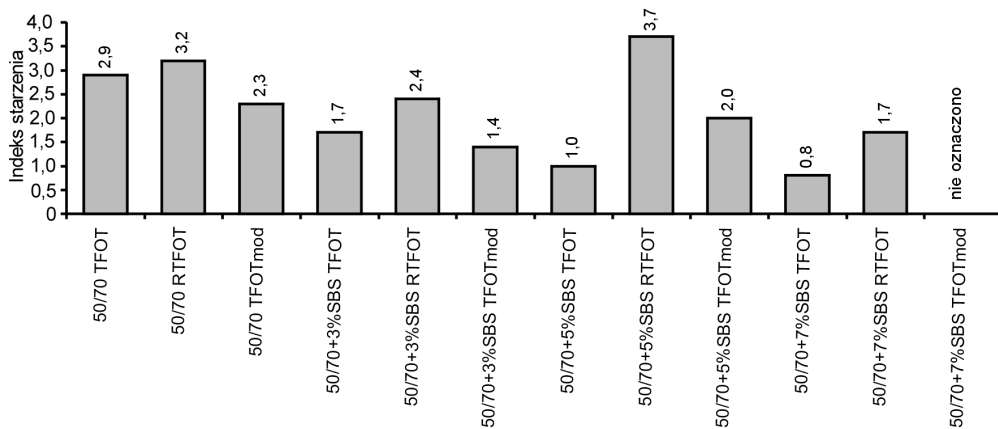
Podstawową zmianę właściwości reologicznych asfaltu poddanego starzeniu stanowi zwiększenie jego lepkości [6]. Wyniki pomiaru lepkości dynamicznej w temperaturze 60 °C zestawiono na rys. 5. Można zauważyć, że modyfikacja dodatkiem 3, 5 i 7 % elastomeru SBS powoduje bardzo duży przyrost wartości lepkości w stosunku do asfaltu wyjściowego – odpowiednio o 222 %, 352 % oraz 1933 %. Zawartość elastomeru w asfalcie ma również wpływ na zmiany lepkości zachodzące na skutek starzenia. W celu łatwiejszej oceny wpływu zjawiska starzenia na lepkość badanych lepiszczy asfaltowych obliczono korzystając z wzoru (3) wartości indeksu starzenia  $VAI$ , które przedstawiono na rys. 6. Spośród trzech zastosowanych metod starzenia, największe przyrosty lepkości ( $VAI = 1,7 \div 3,7$ ) zaobserwowano w przypadku próbek lepiszczy poddanych starzeniu metodą RTFOT. Natomiast starzenie metodą TFOT nie wywołało zmiany lepkości próbki 50/70 + 5 % SBS, a w przypadku próbki 50/70 + 7 % SBS zaobserwowano spadek wartości lepkości o 18 %. Można stwierdzić, że dodatek

elastomeru SBS do asfaltu zwiększa zdecydowanie wartości lepkości dynamicznej mierzonej w temperaturze 60 °C, natomiast nie ma istotnego wpływu na zmianę stosunku lepkości asfaltu poddanego starzeniu do lepkości asfaltu wyjściowego.



Rys.5. Lepkość dynamiczna badanych lepiszczy asfaltowych oznaczona w temperaturze 60 °C

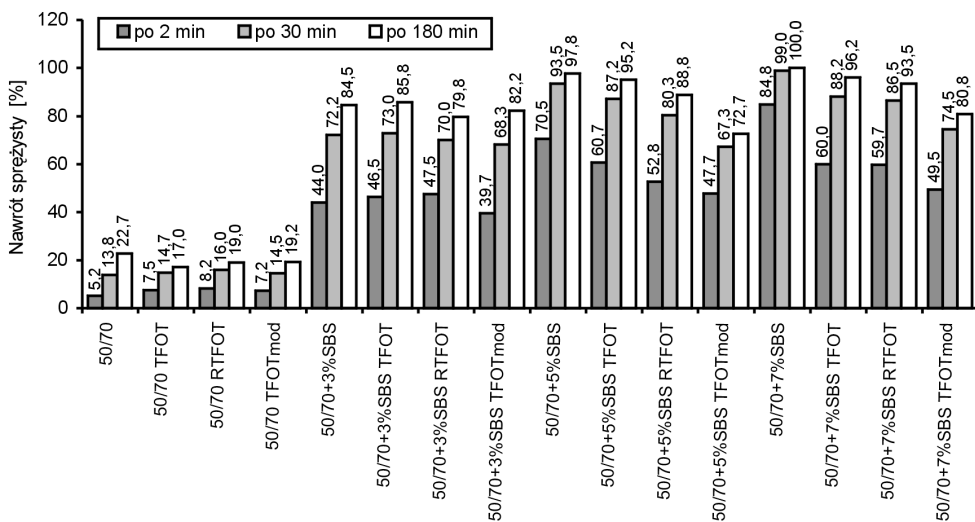
Fig.5. Dynamic Viscosity of the tested bituminous binders determined at 60 °C



Rys.6. Indeks starzenia badanych lepiszczy asfaltowych

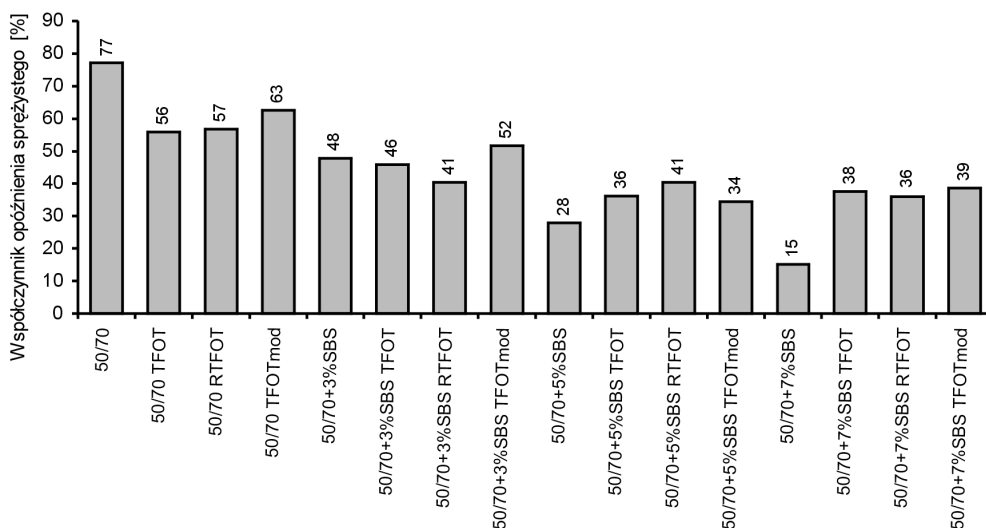
Fig.6. Viscosity Ageing Index of the tested bituminous binders

Modyfikacja asfaltu dodatkiem elastomeru powoduje istotne polepszenie jego sprężystości. Wpływ starzenia krótkoterminowego na właściwości sprężyste badanych lepiszczy oceniano analizując zmiany wartości nawrotu sprężystego mierzonego po 2, 30 oraz 180 minutach od chwili przecięcia próbki (rys. 6), a także zmiany wartości współczynnika opóźnienia sprężystego obliczonego według wzoru (4) – rys. 7. W przypadku lepiszczy 50/70 oraz 50/70 + 3 % SBS starzenie każdą z zastosowanych metod nie powoduje istotnych zmian wartości nawrotu sprężystego – zaobserwowano zarówno nieznaczne przyrosty jak i spadki wartości  $ER$ . Natomiast w przypadku lepiszczy 50/70 + 5 % SBS oraz 50/70 + 7 % SBS stwierdzono zmniejszenie wartości nawrotu sprężystego w efekcie starzenia, przy czym największe zmiany ilościowe odnotowano po starzeniu metodą TFOTmod, a najmniejsze – TFOT.



Rys.7. Nawrót sprężysty badanych lepiszczy asfaltowych oznaczony w temperaturze 25 °C  
Fig.7. Elastic recovery of the tested bituminous binders determined at 25 °C

Współczynnik opóźnienia sprężystego  $\alpha_s$  (rys. 8), zaproponowany przez J. Judyckiego [19], jest empiryczną wielkością charakteryzującą prędkość nawrotu odkształceń po odciążeniu (przecięciu próbek). Może przyjmować wartości w przedziale od 0 do 100 %. Analizując wzór (4) można stwierdzić, że  $\alpha_s = 0$  jedynie wówczas, gdy  $ER^{2\text{ min}} = ER^{180\text{ min}}$ , czyli całość nawrotu odkształcenia odbywa się w ciągu pierwszych 2 minut po zdjęciu obciążenia. Można wtedy mówić o ciele charakteryzującym się sprężystością natychmiastową o właściwościach zbliżonych do cieczy Maxwella [19]. Drugi skrajny przypadek, czyli  $\alpha_s = 100\%$  zachodzi, gdy  $ER^{2\text{ min}} = 0$  i  $ER^{180\text{ min}} \neq 0$ . Występuje on dla ciał z dominującym opóźnieniem sprężystym, w których nie występuje sprężystość natychmiastowa. Można zatem stwierdzić, że im większa wartość nawrotu sprężystego oraz im mniejsza wartość współczynnika opóźnienia sprężystego, tym korzystniejsze są właściwości sprężyste badanego lepiszcza asfaltowego.



Rys.8. Współczynnik opóźnienia sprężystego badanych lepiszczy asfaltowych  
Fig.8. Retardation coefficient of the tested bituminous binders

Spośród badanych próbek lepiszczy największe wartości współczynnika opóźnienia sprężystego odnotowano dla asfaltu 50/70, przy czym starzenie z zastosowaniem każdej z metod spowodowało zmniejszenie wartości  $\alpha_s$  (zjawisko korzystne). Wraz ze zwiększeniem zawartości elastomeru SBS w asfalcie wartości  $\alpha_s$  maleją. W przypadku asfaltu 50/70 + 7 % SBS  $\alpha_s = 15\%$ , co świadczy o bardzo dużej prędkości nawrotu odkształceń. Można jednak zauważyć, że w przypadku lepiszczy 50/70 + 5 % SBS oraz 50/70 + 7 % SBS starzenie wywołuje efekt odwrotny niż w asfalcie wyjściowym, tzn. zaobserwowano zwiększenie wartości  $\alpha_s$  po starzeniu symulowanym każdą z metod (zjawisko niekorzystne).

W tabelicy 5 zestawiono wartości współczynników korelacji  $R$  opisujących zależności pomiędzy wybranymi parametrami badanych lepiszczy. Największe wartości współczynnika korelacji (powyżej 0,9) zaobserwowano w przypadku nawrotu sprężystego oznaczonego po różnym czasie liczonym od chwili odciążenia (2, 30 i 180 min). Bardzo silna zależność [15] nie stanowi zaskoczenia, ponieważ wartości te dla danej próbki asfaltu uzyskiwano podczas jednego badania prowadzonego na tych samych próbkach w identycznych warunkach pomiarowych. Można jednak zauważyć, że znaczącą zależność stwierdzono również w przypadku parametrów lepiszczy oznaczonych z zastosowaniem całkowicie odmiennych metod i w różnych warunkach pomiarowych, np. pomiędzy temperaturą mięknięcia i indeksem penetracji ( $|R| = 0,84$ ), pomiędzy temperaturą mięknięcia i nawrotem sprężystym ( $|R| = 0,75 \div 0,85$ ), a także pomiędzy indeksem penetracji i nawrotem sprężystym ( $|R| = 0,67 \div 0,76$ ). Natomiast pomiędzy wartościami penetracji oznaczonej w temperaturze  $5^\circ\text{C}$  i temperaturą łamliwości oraz lepkością dynamiczną stwierdzono brak związku liniowego ( $|R| < 0,1$ ) [15].

Tablica 5. Wartości współczynników korelacji analizowanych parametrów lepiszczy asfaltowych  
 Table 5. Correlation coefficient values of analyzed parameters of bituminous binders

Parametr	$T_{PIK}$	$T_{Fr}$	$Pen_{25}$	$Pen_5$	$PI$	$\eta_{60}$	$ER^{2\min}$	$ER^{30\min}$	$ER^{180\min}$
$T_{PIK}$	1,00	0,44	-0,50	0,28	0,84	0,68	0,85	0,80	0,75
$T_{Fr}$	0,44	1,00	-0,33	-0,06	0,36	0,67	0,45	0,43	0,41
$Pen_{25}$	-0,50	-0,33	1,00	0,59	-0,39	-0,57	-0,39	-0,42	-0,39
$Pen_5$	0,28	-0,06	0,59	1,00	0,51	0,08	0,32	0,24	0,22
$PI$	0,84	0,36	-0,39	0,51	1,00	0,65	0,76	0,72	0,67
$\eta_{60}$	0,68	0,67	-0,57	0,08	0,65	1,00	0,57	0,55	0,52
$ER^{2\min}$	0,85	0,45	-0,39	0,32	0,76	0,57	1,00	0,98	0,95
$ER^{30\min}$	0,80	0,43	-0,42	0,24	0,72	0,55	0,98	1,00	0,99
$ER^{180\min}$	0,75	0,41	-0,39	0,22	0,67	0,52	0,95	0,99	1,00

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych rezultatów badań oraz ich analizy przeprowadzonej w punkcie 3, sformułowano następujące wnioski:

- Asfalt 50/70 modyfikowany dodatkiem 3 % kopolimeru SBS (50/70 + 3 % SBS) reaguje na starzenie w podobny sposób jak asfalt niemodyfikowany. Największe zmiany właściwości tych lepiszczy zostały wywołane starzeniem metodą RTFOT: obniżenie penetracji oraz wzrost lepkości, natomiast metoda TFOT wpływa najsilniej na podwyższenie temperatury mięknięcia.
- W przypadku asfaltów z większą zawartością modyfikatora (w niniejszej pracy 50/70 + 5 % SBS oraz 50/70 + 7 % SBS) największy wpływ na zmianę ich właściwości zaobserwowano po zastosowaniu zmodyfikowanej metody TFOT (TFOTmod). Pogorszenie właściwości badanych asfaltów wywołane jest wygrzewaniem w temperaturze wyższej o około 15 °C od standardowych laboratoryjnych metod starzenia. Należy zaznaczyć, że duży wpływ na pogorszenie właściwości w przypadku lepiszcza 50/70 + 7 % SBS, mogła mieć degradacja polimeru w asfalcie podczas starzenia w temperaturze 178 °C, którą stwierdzono na podstawie analizy makroskopowej stopnia jednorodności próbki asfaltu.
- Dodatek kopolimeru SBS spowodował poprawę odporności na starzenie technologiczne symulowane standardowymi metodami laboratoryjnymi TFOT i RTFOT, w których wygrzewanie odbywa się w temperaturze 163 °C, niezależnie od rodzaju badanego lepiszcza. W przypadku zastosowania zaproponowanej przez autorów pracy zmodyfikowanej metody TFOT, w której jako temperaturę wygrzewania zastosowano temperaturę ekwiwalentną otaczania kruszywa (0,2 Pa·s), uzyskano odmienne wyniki. Asfalt zwykły oraz modyfikowany dodatkiem



3 % elastomeru SBS wygrzewane w temperaturze odpowiednio 145 °C i 156 °C, a więc poniżej 163 °C, wykazują mniejsze zmiany ilościowe w stosunku do próbek postarzonych metodami TFOT i RTFOT. Natomiast w przypadku lepiszczy modyfikowanych elastomerem SBS w ilości 5 %, a zwłaszcza 7 %, poddanych starzeniu w temperaturze odpowiednio 177 °C i 178 °C, stwierdzono większe zmiany ilościowe w stosunku do próbek postarzonych metodami TFOT i RTFOT. Asfalt modyfikowany dodatkiem 7 % elastomeru SBS jest stosowany w budownictwie drogowym bardzo rzadko, natomiast asfalt 50/70 + 5 % SBS można uznać jako materiał o właściwościach zbliżonych do stosowanych w kraju asfaltów modyfikowanych klasy C. Pomimo, że zgodnie ze specyfikacją produktu, rozpad polimeru SBS zachodzi w temperaturze wyższej niż 200 °C, zaobserwowano znaczne pogorszenie właściwości tych lepiszczy, w szczególności temperatury łamliwości, indeksu penetracji oraz cech sprężystych. Można stwierdzić, że standardowe metody symulacji starzenia technologicznego TFOT i RTFOT nie uwzględniają faktu, iż mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające lepiszcza modyfikowane elastomerem są wytwarzane, wbudowywane i zagęszczane w temperaturze wyższej niż mieszanki z udziałem asfaltów zwykłych. W metodzie TFOTmod takie ograniczenie nie występuje.

- Podczas procesów technologicznych związanych zarówno z modyfikacją asfaltów jak i wytwarzaniem mieszanek mineralno-asfaltowych konieczne jest ściśle przestrzeganie temperatur technologicznych; na podstawie wyników symulowanego starzenia przeprowadzonego metodą TFOTmod należy wyrazić obawę, że przekroczenie wartości tych temperatur może spowodować przyspieszone starzenie oraz doprowadzić do degradacji kopolimeru zawartego w asfalcie modyfikowanym.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Słowik M., Adamczak P.*: Wpływ starzenia symulowanego metodami laboratoryjnymi na właściwości asfaltów modyfikowanych elastomerem SBS. X Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2004, 149-156
- [2] *Lu X., Isacsson U.*: Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, **16**, 2002, 15-22
- [3] *Johansson L.S., Lu X., Isacsson U.*: Ageing of Road Bitumens – State of the Art. TRITA-IP FR 98-36, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- [4] *Lu X., Isacsson U.*: Laboratory study on the low temperature physical hardening of conventional and polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, **14**, 2000, 79-88
- [5] *Lu X., Isacsson U.*: Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. *Fuel*, **77**, 9/10, 1998, 961-972
- [6] *Gaweł I., Kalabińska M., Pilat J.*: *Asfalty drogowe*. WKŁ, Warszawa 2001
- [7] *Whiteoak D.*: *The Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen UK, Surrey, 1990

- [8] *Shalaby A.*: Modelling short-term aging of asphalt binders using the rolling thin film oven test. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **29**, 2002, 135-144
- [9] *Gawel I.*: Starzenie asfaltów drogowych. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, Poznań 1998, 82-88
- [10] *Gonzalez J.M., Torres J., Peralta X.*: Correlation between the properties of bitumens after TFOT and RTFOT. Papers 5th Eurobitume Congress, Stockholm, 1993, T. IA, 201
- [11] *Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P.*: Wpływ procesu starzenia technologicznego i eksploatacyjnego na właściwości lepiszczy asfaltowych produkowanych w Polsce. *Drogi i Mosty*, nr 4/2002, 57-76
- [12] *Mastrofini D., Scarsella M.*: The application of rheology to the evaluation of bitumen ageing. *Fuel*, **79**, 2000, 1005-1015
- [13] *Sybilski D., Horodecka R., Wróbel A.*: Porównanie właściwości asfaltów po starzeniu TFOT i RTFOT. IV Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 1998, tom I, 119-128
- [14] *Siddiqui M.N., Ali M.F.*: Studies on the aging behaviour of the Arabian asphalts. *Fuel*, **78**, 1999, 1005-1015
- [15] *Buga J., Kiedrowicz E., Malecka G., Olbrych B.*: Statystyka opisowa w przykładach. Skrypt Politechniki Radomskiej, nr 12, Radom 2000
- [16] *Grabowski W., Słowik M.*: Badania właściwości reologicznych asfaltów drogowych modyfikowanych polimerami. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, No. 3, 2002, 5-36
- [17] *Kalabińska M., Piłat J.*: Reologia asfaltów i mas mineralno - asfaltowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982
- [18] *Judycki J.*: Drogowe asfalty i mieszanki mineralno - asfaltowe modyfikowane elastomerem. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991
- [19] *Judycki J.*: Sprężystość asfaltów drogowych modyfikowanych elastomerami, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, Tom XXXV, 3-4/1989, 373-385
- [20] *Piłat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. WKŁ, Warszawa 2004
- [21] *Sybilski D.*: Polimeroasfalty drogowe. *Studia i materiały*, zeszyt 45, IBDiM, Warszawa 1996

## PODZIĘKOWANIE

Autorzy artykułu składają serdeczne podziękowania Dyrekcji oraz Pracownikom Laboratorium Drogowego GDDKiA w Poznaniu za okazaną życzliwość i udostępnienie sprzętu laboratoryjnego niezbędnego do wykonania badań, których rezultaty zamieszczono w niniejszym artykule.

## **EVALUATION OF SHORT-TERM AGEING INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF SBS ELASTOMER MODIFIED ROAD BITUMENS**

### **Abstract**

The paper presents selected rheological properties of bituminous binders aged by using various laboratory procedures. Samples of 50/70 penetration grade road bitumen pure as well as modified with SBS elastomer addition of amount 3%, 5% and 7% (by mass) have been investigated. The short-term ageing of the bituminous binders has been simulated by making use three selected laboratory methods: TFOT (Thin Film Oven Test), RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), TFOTmod (modified TFOT method).

A short-term ageing influence on modified bitumens behavior has been assessed analyzing changes in their consistency, temperature susceptibility, and rheological properties – viscosity and elasticity, that were observed as effect of ageing process simulated in the laboratory by using each method. The analysis of test results has been focused in changes in behavior of the investigated bituminous binders caused by ageing simulated using various laboratory methods, as well as the influence of modifier (SBS elastomer) content on the behavior of aged binders. The analysis of the results showed a large diversity of resistance to ageing of the tested binders, that depends on the SBS copolymer content. The significant difference in behavior of the binders aged using various methods has been observed.