mgr inż. Marta Mielczarek[1]

dr hab. inż. Mieczysław Słowik, prof. PP[1]

dr hab. Karol Andrzejczak[2]

[1] Institute of Civil Engineering
Poznan University of Technology, ,
Piotrowo St. 5, 60-965 Poznań, Poland
E-mail: marta.mielczarek@put.poznan.pl
mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl

[2] Institute of Mathematics
Poznan University of Technology, ,
Piotrowo St. 3A, 60-965 Poznań, Poland
E-mail: karol.andrzejczak@put.poznan.pl

Ocena wpływu zawartości elastomeru styren-butadien-styren na właściwości funkcjonalne lepiszczy asfaltowych

Keywords: *dynamic shear rheometer (DSR), rutting factor, copolymer SBS, bitumen, complex shear modulus*

Słowa kluczowe: *reometr dynamicznego ścinania, wskaźnik odkształcalności, kopolimer SBS, asfalt, dynamiczny moduł ścinania*

Abstract : Tematyka pracy związana jest z zagadnieniem polepszenia właściwości funkcjonalnych drogowych nawierzchni asfaltowych poprzez modyfikację lepiszcza asfaltowego kopolimerem SBS. Głównym celem pracy jest ocena odporności na odkształcenia trwałe oraz wrażliwości na zmiany temperatury asfaltów drogowych modyfikowanych polimerami, które są najczęściej używane w wierzchnich warstwach konstrukcji nawierzchni drogowych i lotniskowych. Przedmiotem badań były asfalty pochodzące z różnych złóż ropy naftowej (rosyjskiej i wenezuelskiej). Asfalty te poddano modyfikacji w warunkach laboratoryjnych z dodatkiem koncentratu o znanej zawartości kopolimeru SBS równej 9%. Otrzymano w ten sposób lepiszcza asfaltowe o znanej zawartości kopolimeru SBS równej 1,5%; 3,0%; 4,5% oraz 6%. Właściwości reologiczne badanych asfaltów oznaczono z użyciem reometru dynamicznego ścinania DSR stosując w testach obciążenie sinusoidalnie zmienne, w szerokim zakresie temperatury pomiarowej (od 40°C do 100°C). Analizując wartości dynamicznego modułu ścinania |G*| wszystkich badanych asfaltów można stwierdzić, iż wzrost zawartości kopolimeru SBS w badanym lepiszczu zwiększa wartość |G*|, co może skutkować większą odpornością na odkształcenia trwałe nawierzchni drogowej spowodowane wielokrotnie powtarzającymi się obciążeniami ruchem pojazdów, w szczególności w przypadku nawierzchni eksploatowanej w wysokiej temperaturze Odporność mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) na powstawanie kolein jest jednym z podstawowych parametrów związanych z eksploatacją nawierzchni drogowych, wpływając zarówno na bezpieczeństwo, jak i komfort jazdy użytkowników.

1. Wprowadzenie

Nawierzchnie drogowe w dzisiejszych czasach są poddawane coraz to większym obciążeniom wywołanym ruchem drogowym [4]. Zwracając uwagę na koszty zarówno podczas budowy, jak i eksploatacji drogi [6], należałoby optymalizować m.in. skład materiałów, z których wykonana jest konstrukcja nawierzchni drogowej. Analizując wyniki badań przedstawione w pracach [1,11,12] można stwierdzić, iż jednym z kluczowych czynników, wpływających na powstawanie kolein w nawierzchniach drogowych jest skład mieszanki mineralno-asfaltowej (MMA), a zwłaszcza zastosowane lepiszcze asfaltowe. W związku z tym dąży się, aby uzyskać jak najlepsze właściwości reologiczne stosowanych asfaltów uzyskiwanych w procesie destylacji ropy naftowej. Poprawę tych właściwości uzyskuje się poprzez wprowadzenie do struktury lepiszcza różnego rodzaju modyfikatorów, tj. polimery [5], rozdrobniona guma z opon samochodowych [6], czy też asfalty naturalne [7]. W licznych artykułach naukowych analizie poddano efekty modyfikacji asfaltu najczęściej używanymi polimerami, wśród nich plastomery (np. polietylen, polipropylen, etylen octan winylu [17]), elastomery termoplastyczne: SBS (styren-butadien-styren)) [1,16]; SIS (styren izopren styren) lub modyfikatory mieszane składające się z kilku polimerów [2,12]. Lepiszcza modyfikowane polimerami wykazują poprawę właściwości reologicznych w porównaniu z asfaltami niemodyfikowanymi [20]. Najczęściej używany w budownictwie drogowym jest kopolimer blokowy SBS, po dodaniu do gorącego asfaltu zwiększa swoją objętość kilkukrotnie w stosunku do wartości początkowej [21]. W przypadku gdy stężenie polimeru w asfalcie modyfikowanym wynosi około 6%, polimer ten stanowi fazę rozpraszającą i tworzy ciągłą sieć w strukturze asfaltu. Przy mniejszym stężeniu elastomeru SBS, sieć polimeru może nie być ciągła. Dlatego bardzo ważne jest, zarówno ze względów technicznych jak i ekonomicznych, określenie granicznej zawartości kopolimeru SBS w lepiszczu asfaltowym, przy którym tworzy się ciągła sieć polimeru. Elastomeroasfalty w temperaturach eksploatacyjnych charakteryzują się sprężystością natychmiastową (odkształcenie sprężyste) i opóźnioną (pełzanie) [19,21]. W pracach [1,12,21] przedstawiono sposoby modyfikacji oraz korzyści jakie niesie zastosowanie kopolimeru SBS do modyfikacji lepiszcza, tj. przyrost temperatury mięknienia, zmniejszenie wrażliwości temperaturowej (następuje rozszerzenie temperaturowego zakresu lepkosprężystości), zwiększenie kohezji w niskiej temperaturze, powoduje znaczne polepszenie właściwości sprężystych (obserwowane np. w teście nawrotu sprężystego). Poprawa właściwości reologicznych lepiszczy przekłada się na właściwości uzyskanych MMA, w których zastosowano lepiszcze modyfikowane. [13] tj. zwiększenie odporności na odkształcenia trwałe i pękanie indukowane termicznie.

Airey w pracy [1] analizie poddał asfalty pochodzące z dwóch złóż ropy naftowej (rosyjskiej i wenezuelskiej). Do modyfikacji asfaltów wykorzystał kopolimer SBS, uzyskując stężenia polimeru w asfalcie odpowiednio 3%, 5% i 7%. Zauważył istotny wpływ polimeru na właściwości reologiczne asfaltu modyfikowanego; tj. przyrost wartości dynamicznego modułu ścinania oraz większy udział części sprężystej asfaltu zwłaszcza w wysokiej temperaturze. Ukazał również problem kompatybilności układu asfalt-polimer. Airey [1] wykazał, że asfalty parafinowe (pochodzenia rosyjskiego) poprzez większą zawartość części aromatycznych lepiej wiążą polimer w strukturze asfaltu modyfikowanego. Behnood i Olek [6] dokonali analizy porównawczej trzech rodzajów modyfikatorów: kopolimeru SBS, gumy oraz kwasu polifosforowego. Do badań właściwości niskotemperaturowych wykorzystali reometr zginanej belki (BBR), natomiast właściwości reologiczne w wysokich temperaturach określili przy użyciu reometru DSR. W wysokich temperaturach zaobserwowali przyrost wartości dynamicznego modułu ścinania dla wszystkich badanych asfaltów. Asfalty wykorzystywane do produkcji MMA, w nawierzchniach drogowych są narażone na procesy starzenia zarówno podczas magazynowania, produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej,

transportu, wbudowania, jak również podczas eksploatacji nawierzchni [22]. Jako najbardziej niekorzystne ze względu na wysokie temperatury uznaje się starzenie występujące podczas produkcji i wbudowania MMA [24]. Podczas starzenia krótkoterminowego (technologicznego) zachodzącego w czasie procesu produkcji i budowy nawierzchni asfaltowej, asfalt poddawany jest działaniu wysokiej temperatury (140 - 200˚C) oraz tlenu zawartego w powietrzu. Airey [1] oraz Sarnowski [19] ukazali problem związany ze starzeniem asfaltów modyfikowanych. Lepiszcza modyfikowane wykazują poprawę właściwości reologicznych w szerokim zakresie lepkosprężystym. Autorzy zaobserwowali, iż po starzeniu asfaltów modyfikowanych występuje większy udział części lepkiej w stosunku do części sprężystej, co może być spowodowane częściową degradacją polimeru w wysokiej temperaturze, jaka występuje podczas procesów technologicznych otaczania kruszywa asfaltem, transportu, wbudowania i zagęszczania MMA [1]. Następny etap starzenia występuje podczas eksploatacji nawierzchni, jest to tzw. starzenie długoterminowe (eksploatacyjne). Lepiszcze narażone jest w tym przypadku na temperatury w okresie letnim dochodzące do 60˚C, przy jednoczesnym oddziaływaniu tlenu, promieniowania słonecznego, wody oraz środków chemicznych [16,22]. Bai [6] wykonał badania wpływu starzenia krótkoterminowego i długoterminowego na właściwości reologiczne asfaltu modyfikowanego kopolimerem SBS. Badaniom poddano trzy stężenia polimeru w asfalcie, tj. 3%, 6% oraz 9%. Na podstawie badań przy użyciu reometru dynamicznego ścinania DSR, aparatu Fraassa oraz penetrometru wykazali negatywny wpływ starzenia na właściwości niskotemperaturowe.

Potrzeby w zakresie utrzymania oraz remontów sieci dróg są bardzo duże. Systematycznie zwiększające się obciążenie ruchem wpływa bardzo niekorzystnie na stan nawierzchni przyśpieszając ich degradację [15]. Duże znaczenie w poznaniu stanu dróg odgrywa diagnostyka nawierzchni i badania cech funkcjonalnych tj. równość podłużna, równość poprzeczna (koleiny) [8], współczynnik tarcia, nośność itp. [14,15,23]. Do podstawowych rodzajów zniszczenia nawierzchni asfaltowych można zaliczyć: koleinowanie, pękanie zmęczeniowe oraz pękanie niskotemperaturowe [10,13]. Na powstawanie odkształceń trwałych (kolein) w nawierzchniach drogowych wpływ ma wiele czynników [13,14] m.in. zastosowane kruszywo, lepiszcze, mieszanka mineralno-asfaltowa (MMA), występujące warunki klimatyczne, obciążenie ruchem [9] czy też zastosowana konstrukcja nawierzchni.

Celem niniejszego artykułu jest analiza właściwości funkcjonalnych lepiszczy modyfikowanych kopolimerem SBS ze szczególnym uwzględnieniem wrażliwości temperaturowej, gdyż rodzaj zastosowanego lepiszcza jest jednym z kluczowych czynników mających wpływ na odporność na powstawanie odkształceń trwałych (kolein) w nawierzchniach asfaltowych. Odporność MMA na powstawanie kolein jest jednym z podstawowych warunków prawidłowej eksploatacji nawierzchni drogowych, wpływając zarówno na bezpieczeństwo, jak i komfort jazdy. Oryginalnym osiągnięciem niniejszej pracy było zastosowanie analizy wrażliwości temperaturowej badanych lepiszczy modyfikowanych w szerokim zakresie temperatur.

2. Charakterystyka badanych lepiszczy

Modyfikacja asfaltów kopolimerem SBS z reguły odbywa się w rafineriach, rzadziej zaś w instalacjach koncernów drogowych. Asfalt modyfikowany polimerem wykorzystywany do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej można uzyskać poprzez zakup z rafinerii gotowego lepiszcza modyfikowanego, produkcję asfaltu modyfikowanego w specjalnej instalacji technologicznej lub zakup asfaltu o znanej zawartości masowej kopolimeru SBS np. 9% i wymieszanie go w odpowiednich proporcjach z ponaftowym asfaltem, drogowym [21].

Badania wykonano wykorzystując asfalty 50/70 o zbliżonej twardości, wyrażonej poprzez wartość penetracji oznaczonej w 25˚C (tab.1), wyprodukowane z ropy naftowej pochodzącej z Wenezueli oraz Rosji. W przeprowadzonych badaniach asfalty połączono z koncentratem asfaltu modyfikowanego kopolimerem SBS (kopolimer blokowy o strukturze liniowej) o zawartości polimeru 9%, poprzez komponowanie w proporcjach 5:1, 2:1, 1:1 oraz 1:2 otrzymując odpowiednio asfalt o zawartości kopolimeru SBS: 1,5%; 3,0%; 4,5% i 6,0% (w stosunku do masy otrzymanego asfaltu modyfikowanego). Badane lepiszcza asfaltowe oznakowano w pracy poprzez podanie pochodzenia asfaltu, a następnie zawartości procentowej kopolimeru SBS, np.:

- R6%SBS – oznacza asfalt wyprodukowany z rosyjskiej ropy naftowej o zawartości 6,0% kopolimeru SBS,
- V50/70 – oznacza asfalt 50/70 pochodzący z wenezuelskiej ropy naftowej, nie zawierający kopolimeru SBS,
- K9%SBS – oznacza koncentrat asfaltu modyfikowanego zawierający 9,0% SBS.

Analizie zostały poddane asfalty zarówno w stanie wyjściowym, jak i po procesie starzenia technologicznego (krótkoterminowego), symulowanego metodą RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) wg PN-EN 12607-1:2014.

Tabela 1. Podstawowe właściwości badanych lepiszczy asfaltowych

Właściwości / Badany materiał	T_{PiK} [°C]	Pen_{25} [mm/10]
V50/70	47,4±0,2	66,0±0,8
V1,5%SBS	47,9±0,3	69,5±0,4
V3%SBS	52,8±1,3	71,3±0,8
V4,5%SBS	74,5±2,0	66,4±0,6
V6%SBS	87,9±1,3	66,3±0,8
R50/70	47,8±0,4	69,3±0,3
R1,5%SBS	48,8±0,3	70,3±0,3
R3%SBS	49,5±0,3	71,3±0,4
R4,5%SBS	77,0±1,1	69,5±0,5
R6%SBS	83,8±06	71,9±1,0
K9%SBS	100,3±1,4	74,3±1,0

gdzie: T_{PiK} -temperatura mięknienia wg PN-EN 1427:2015-08,
Pen_{25} - penetracja w 25°C wg PN-EN1426:2015-08

Analizując wyniki przedstawione w tabeli nr 1 lepiszcza asfaltowe były dobrane w taki sposób, aby uzyskać asfalty o zbliżonej twardości, wyrażonej poprzez penetrację w 25°C (Pen_{25} uzyskano w przedziale 66,0 mm/10 do 74,3 mm/10). Wszystkie badane asfalty modyfikowane można więc zakwalifikować do klasy asfaltów modyfikowanych 45/80 dostępnych na polskim rynku, mimo iż posiadają różne procentowe zawartości kopolimeru SBS.

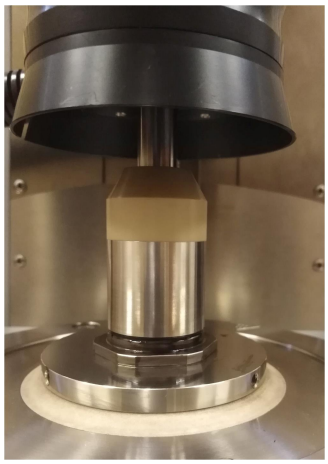
3. Cel i metodyka badań

Głównym celem pracy jest ocena odporności na odkształcenia trwałe oraz wrażliwości temperaturowej asfaltów drogowych modyfikowanych kopolimerem SBS na podstawie badań przeprowadzonych przy pomocy reometru dynamicznego ścinania (DSR) typu Physica MCR 101 (rys. 2). Odkształcenia trwałe oraz wrażliwość na zmiany temperatury w strefie klimatycznej obejmującej Polskę mają kluczowe znaczenie w eksploatacji nawierzchni asfaltowych.

Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 14770:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczenie zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego w reometrze dynamicznego ścinania (DSR)" dwiema metodami, w których zastosowano wymuszenie kinematyczne (sinusoidalne):

a) przy różnych zakresach częstości kątowej od 100 rad/s do 0,1 rad/s oraz stałej temperaturze badania równej 60°C±0,01˚C,
b) o amplitudzie kąta wychylenia wrzeciona równej 10 mrad oraz przy zmiennej temperaturze, tj. od 100°C do 40°C, przy czym co 1 min następowało obniżenie temperatury o 1°C. W tej procedurze badawczej przyjęto stałą wartość częstości kątowej równą 10 rad/s.

Próbkę lepiszcza asfaltowego umieszczano pomiędzy dwiema okrągłymi płytami równoległymi o średnicy Ø25mm, przy zachowaniu zadanej wysokości szczeliny równej 1 mm (rys. 1)



Rys. 1. Widok z boku próbki badanego asfaltu

Rys. 2. Reometr dynamicznego ścinania DSR typu Physica MCR 101

Zgodnie z założeniami amerykańskiej specyfikacji Superpave, podatność lepiszczy asfaltowych na powstawanie odkształceń trwałych w nawierzchniach drogowych określa się za pomocą współczynnika odkształcalności (rutting factor), wyrażonego poprzez wielkość |G*|/sin δ. W pracy wyznaczono ww. współczynnik dla asfaltów zarówno nie poddanych, jak i poddanych starzeniu krótkoterminowemu metodą RTFOT.

Analizie poddano również wartości indeksu modułu ścinania (SMI – Shear Modulus Index), będącego miarą wrażliwości temperaturowej badanych lepiszczy, który obliczono wg wzoru [20]:

$$SMI_{T_2/T_1} = \left| \frac{\log\log\left|G^*_{T_1}\right| - \log\log\left|G^*_{T_2}\right|}{\log(T_1 + 273{,}15) - \log(T_2 + 273{,}15)} \right| \quad (1)$$

gdzie:

SMI - Shear Modulus Index

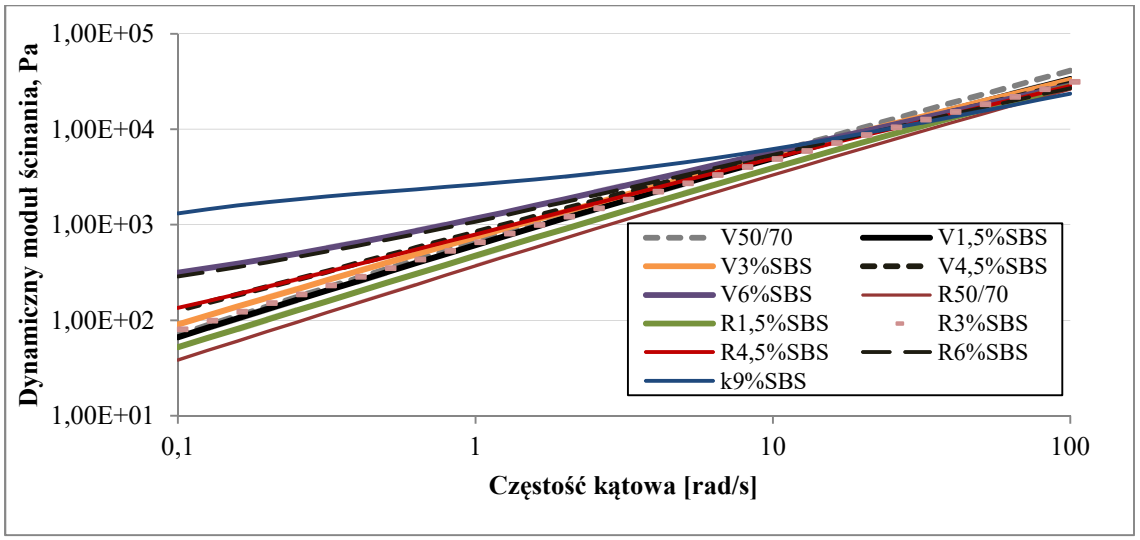
$\left|G^*_{T_1}\right|; \left|G^*_{T_2}\right|$ - dynamiczny moduł ścinania w temperaturze T_1, T_2, [Pa]

T_1; T_2 – ekstremalne temperatury pomiarów wykonanych w reometrze dynamicznego ścinania DSR, przy czym $T_1 > T_2$, [°C]

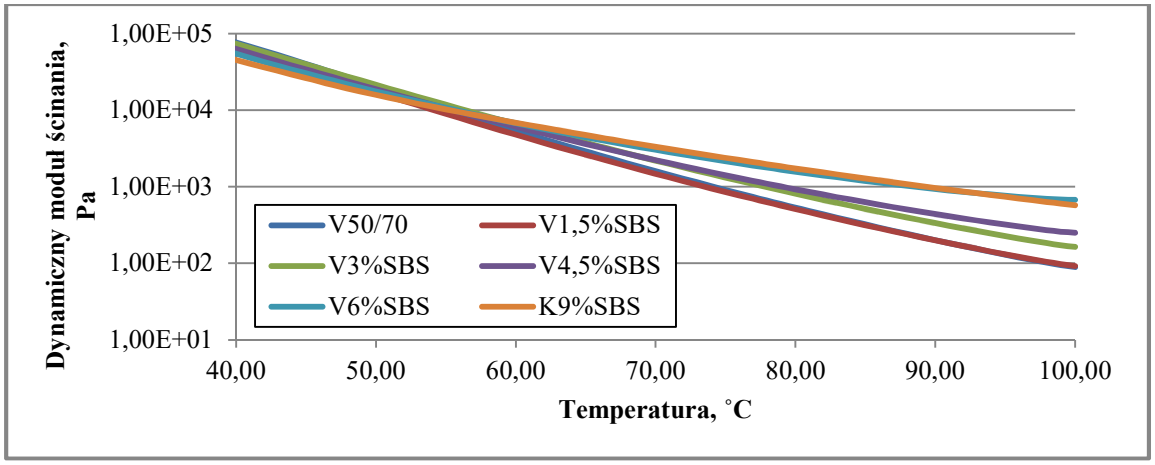
W niniejszej pracy przyjęto $T_1 = 100°C;\ T_2 = 40°C$.

4. Analiza wyników badań

Rysunek nr 3 przedstawia wykres zależności dynamicznego modułu ścinania badanych asfaltów od częstości kątowej (zakres od 0,1 rad/s do 100 rad/s). Dynamiczny moduł ścinania wzrasta wraz ze wzrostem częstości kątowej dla wszystkich analizowanych asfaltów. Największą wartość |G*| przy częstości kątowej 0,1 rad/s posiada asfalt o zawartości kopolimeru SBS równej 9%, natomiast najmniejszą asfalt R50/70. Przy częstości kątowej równej 100 rad/s dynamiczny moduł ścinania uzyskuje wartości na zbliżonym poziomie od wartości równej 23680Pa dla K9%SBS do 41010Pa dla asfaltu V50/70. Reasumując wzrost zawartości kopolimeru SBS w lepiszczu asfaltowym powoduje przyrost wartości dynamicznego modułu ścinania, przy częstości kątowej 10 rad/s.

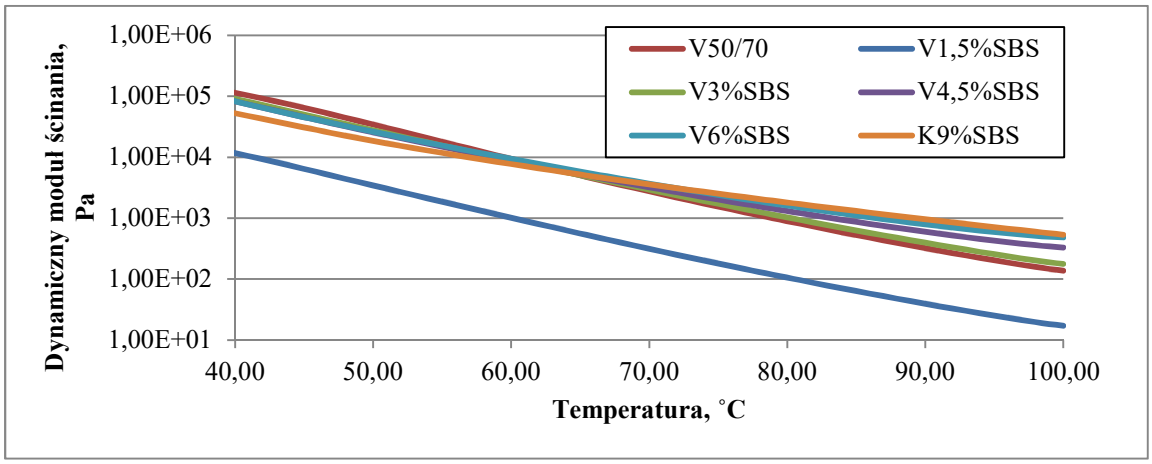


Rys. 3. Wykres zależności dynamicznego modułu ścinania od częstości kątowej asfaltów badanych w 60˚C

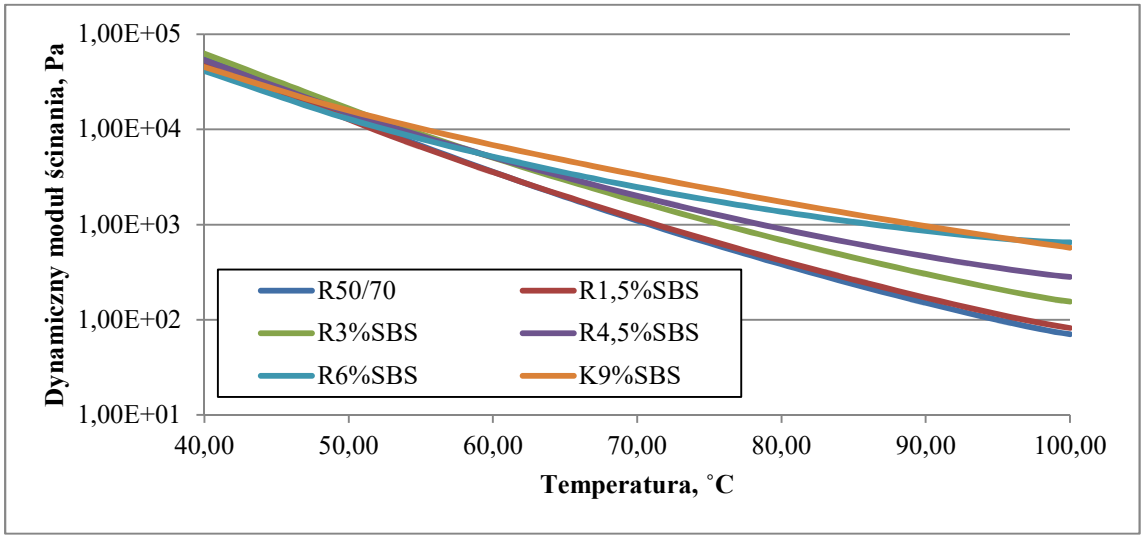


Rys. 4. Wykres zależności dynamicznego modułu ścinania |G*| od temperatury dla asfaltów pochodzenia wenezuelskiego niepoddanych starzeniu, przy stałej częstości kątowej równej 10

rad/s

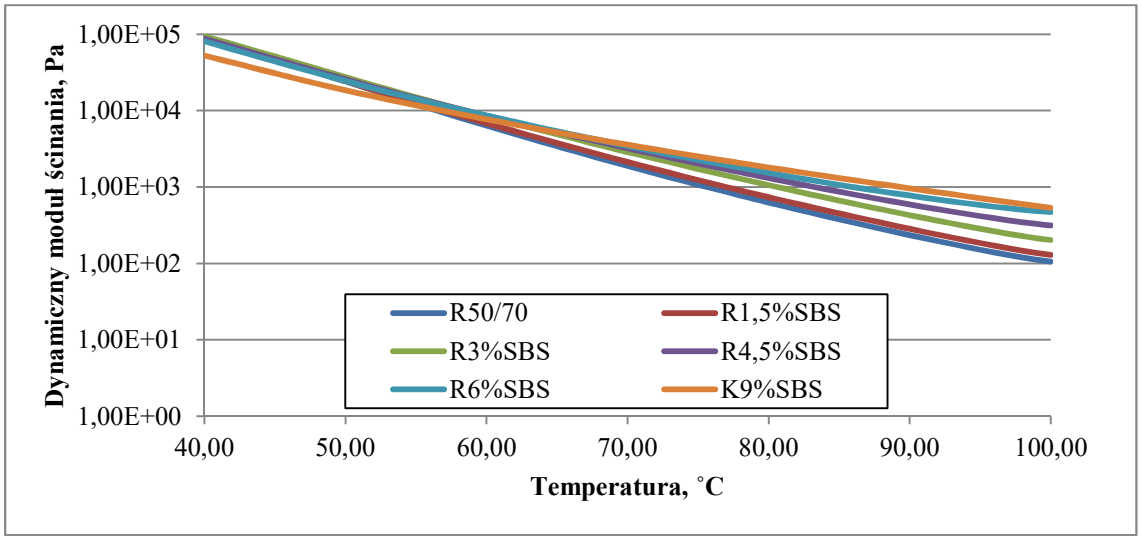


Rys.5. Wykres zależności dynamicznego modułu ścinania |G*| od temperatury dla asfaltów pochodzenia wenezuelskiego poddanych starzeniu RTFOT, przy stałej częstości kątowej równej 10rad/s



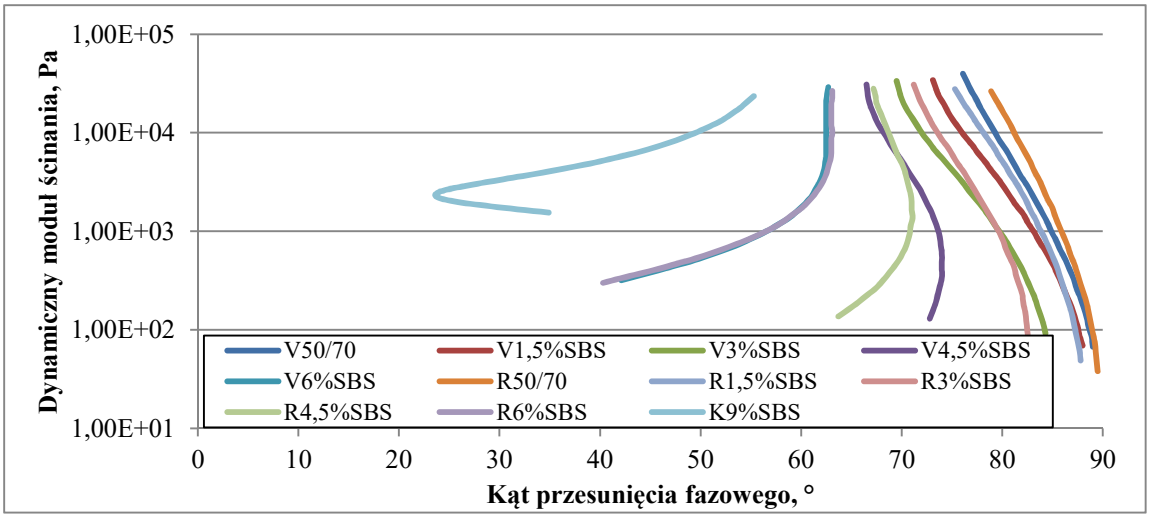
Rys.6. Wykres zależności dynamicznego modułu ścinania |G*| od temperatury dla asfaltów pochodzenia rosyjskiego niepoddanych starzeniu, przy stałej częstości kątowej równej10 rad/s

Lepiszcza asfaltowe są materiałami o właściwościach lepkosprężystych. Analizując wartości kąta przesunięcia fazowego δ można ocenić zmiany właściwości reologicznych asfaltu w całym spektrum temperatur zarówno podczas procesu produkcji, wbudowania, jak i eksploatacji nawierzchni asfaltowej. Materiały lepkie charakteryzują się tym, że współczynnik tłumienia oznaczany jako $\mathrm{tg}\delta \rightarrow \infty$ ($\delta = 90°$), natomiast w przypadku materiałów sprężystych $\mathrm{tg}\delta = 0$ ($\delta = 0°$); materiały lepkosprężyste mają kąt przesunięcia fazowego o wartości zawierającej się w przedziale $0° < \delta < 90°$. Na rys. 4-7 przedstawiono wykresy zależności dynamicznego modułu ścinania |G*| od temperatury badanych lepiszczy asfaltowych pochodzenia wenezuelskiego oraz rosyjskiego, zarówno asfaltów niepoddanych starzeniu, jak i po procesie starzenia RTFOT. Wraz ze wzrostem temperatury badania maleje wartość dynamicznego modułu ścinania |G*| dla wszystkich analizowanych asfaltów.



Rys.7. Wykres zależności dynamicznego modułu ścinania |G*| od temperatury dla asfaltów pochodzenia rosyjskiego poddanych starzeniu RTFOT, przy stałej częstości kątowej równej 10rad/s

Ze względu na wysokie temperatury panujące w okresie letnim istotna jest składowa sprężysta, co wiąże się z małymi wartościami tgδ. Podczas badań zaobserwowano, iż w przypadku asfaltów niemodyfikowanych (R i V) oraz asfaltów o małej zawartości kopolimeru SBS (do 3%), występuje prawidłowość, że im większe wartości dynamicznego modułu ścinania, tym mniejsze wartości kąta przesunięcia fazowego δ, co obrazuje wykres Black'a (rys. 8). Wykresy przedstawiające zależność dynamicznego modułu ścinania od kąta przesunięcia fazowego, zwane wykresami Black'a, pozwalają na wykonanie analizy dwóch podstawowych parametrów wyznaczonych w reometrze DSR [1,3,20]. W przypadku asfaltów o zawartości kopolimeru SBS 6% i 9% uzyskuje się małe wartości kąta przesunięcia fazowego, zarówno przy bardzo małych, jak i przy dużych wartościach |G*|. Największą zmienność wartości kąta przesunięcia fazowego zaobserwowano dla asfaltów referencyjnych 50/70 oraz asfaltów niskomodyfikowanych (o zawartości kopolimeru do 3%). Wartości te w wysokich temperaturach są bliskie 90° można więc uznać, że lepiszcza te w zakresie wysokich temperatur mają właściwości zbliżone do cieczy lepkiej. Zwiększenie zawartości kopolimeru SBS w asfalcie powoduje, że zróżnicowanie wartości δ jest coraz mniejsze. Powyżej temperatury 70°C następuje zmniejszenie wartości δ dla asfaltów o zawartości kopolimeru 4,5%; 6% oraz dla koncentratu 9% SBS, co ukazuje korzystny wpływ zastosowania do modyfikacji polimeru, ponieważ lepiszcza modyfikowane posiadają w wysokich temperaturach większy udział części sprężystej co może świadczyć o większej odporności na odkształcenia trwałe.



Rys.8. Wykres Black'a przedstawiający zależność dynamicznego modułu ścinania od kąta przesunięcia fazowego badanych lepiszczy asfaltowych

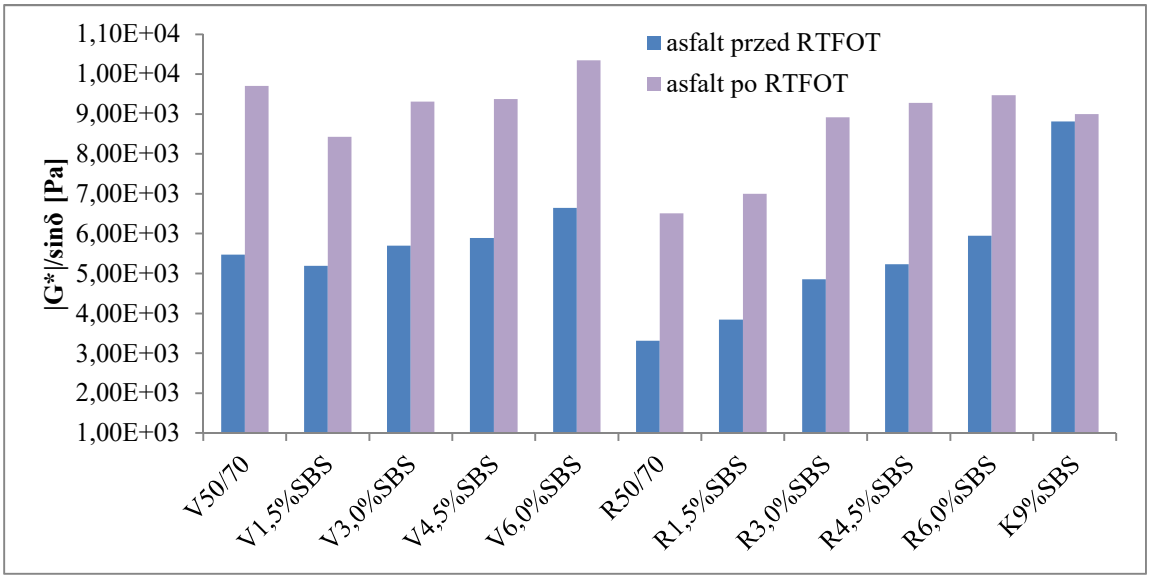
W badaniach wyznaczono wskaźnik odkształcalności (definiowany jako stosunek dynamicznego modułu ścinania |G*| do sinusa kąta przesunięcia fazowego δ (|G*|/sinδ)) w temperaturze 60°C, przyjętej jako temperatura ekstremalna występująca w nawierzchniach asfaltowych w Polsce (w której wykonuje się również test koleinowania MMA wg PN-EN 12697-22:2008).

Specyfikacja Superpave wskazuje na związek pomiędzy odpornością na powstawanie odkształceń trwałych w nawierzchniach asfaltowych, a właściwościami badanych lepiszczy oznaczonych w reometrze DSR wprowadzając następujące wymagania:

$|G^*|/\sin\delta \geq 1{,}0$ kPa - dla asfaltu niepoddanego starzeniu

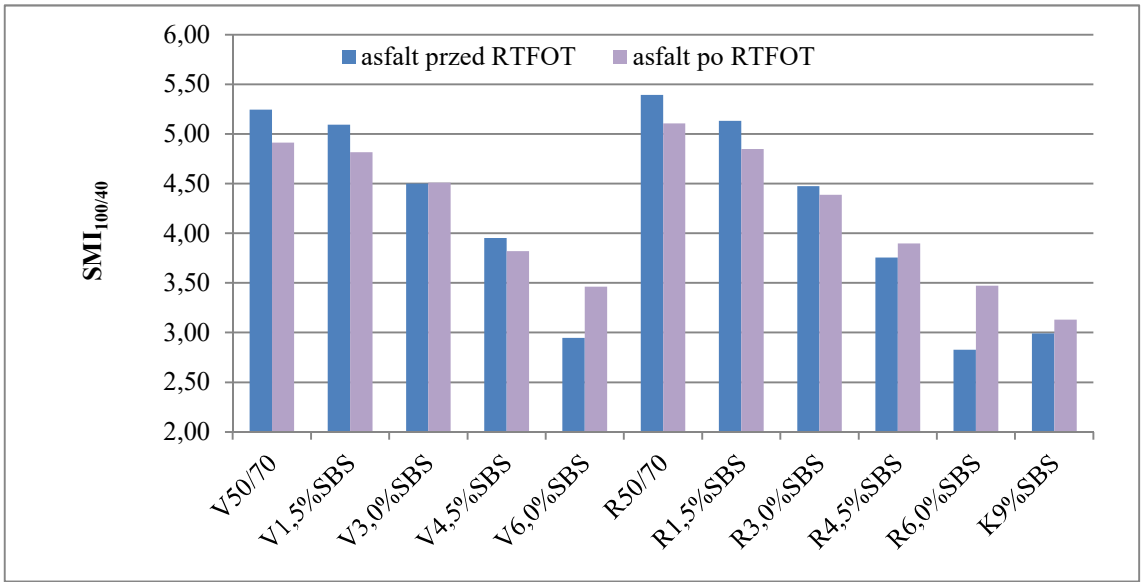
$|G^*|/\sin\delta \geq 2{,}2$ kPa - dla asfaltu poddanego starzeniu technologicznemu symulowanemu metodą RTFOT.

Analizując wyniki zamieszczone na rys.9, można uznać że wszystkie badane lepiszcza asfaltowe spełniają powyższe wymagania stawiane przez specyfikacje Superpave. Większa wartość wskaźnika odkształcalności asfaltu charakteryzującego odporność na odkształcenia trwałe nawierzchni asfaltowych uzyskuje się poprzez większą wartość dynamicznego modułu ścinania |G*| i mniejszą wartość kąta przesunięcia fazowego δ.



Rys.9. G*/sinδ badanych lepiszczy asfaltowych w temperaturze 60˚C.

Najmniejszą wartość wskaźnika odkształcalności zaobserwowano dla asfaltów niemodyfikowanych pochodzenia rosyjskiego zarówno przed jak i po starzeniu metodą RTFOT. Szczególną uwagę należy zwrócić na wartość |G*|/sinδ koncentratu o zawartości kopolimeru SBS 9%, ponieważ różnica wskaźnika odkształcalności przed i po starzeniu wynosi zaledwie 0,2kPa; co może świadczyć o małym wpływie starzenia na wartości wskaźnika odkształcalności (rutting factor).



Rys.10. Shear Modulus Index badanych lepiszczy asfaltowych

Miarą wrażliwości temperaturowej jest indeks penetracji PI. Może być wyznaczony na podstawie wyników penetracji w dwóch temperaturach lub metodą pośrednią wykorzystując penetrację w 25°C i temperaturę mięknienia. Powyższe metody pozwalają oszacować indeks penetracji asfaltów niemodyfikowancych. Natomiast w przypadku asfaltów modyfikowanych elastomerami, wyniki uzyskane z zastosowaniem każdej z metod mogą znacznie się różnić [20]. W niniejszej pracy wrażliwość temperaturową wyznaczono na podstawie wzoru (1). Można wnioskować, że założenia dotyczące penetracji w temperaturze mięknienia (800 mm/10) oraz temperaturze łamliwości (1,25 mm/10) dla asfaltów modyfikowanych elastomerami nie są słuszne [20]. Analiza uzyskanych wartości SMI (rys. 10) wykazała istotny wpływ zawartości kopolimeru na zmniejszenie wrażliwości asfaltów na zmiany sztywności w różnych temperaturach. Asfalt R50/70 okazał się najbardziej wrażliwy na zmiany właściwości pod wpływem zmiany temperatury. Najmniejszą wartość SMI w zakresie temperatur 100°C - 40°C osiągnął asfalt o zawartości kopolimeru SBS równej 6% w stanie wyjściowym (przed procesem starzenia symulowanego metodą RTFOT), natomiast po starzeniu wartość SMI wzrosła dla tej grupy asfaltów (zarówno pochodzenia wenezuelskiego, jak i rosyjskiego), co może świadczyć o częściowym rozpadzie polimeru pod wpływem wysokiej temperatury (163°C) i dopływu tlenu (starzenie metodą RTFOT).

5. Wnioski

Porównując wartości dynamicznego modułu ścinania badanych asfaltów można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem zawartości kopolimeru SBS zwiększa się wartość |G*|, co może świadczyć o większej odporności nawierzchni asfaltowych wykonanych z użyciem

asfaltu modyfikowanego kopolimerem SBS na deformacje wywoływane powtarzającymi się naprężeniami ścinającymi (co obrazuje w warunkach rzeczywistych powtarzające się cykle obciążeń wywołane ruchem pojazdów).

Wraz ze wzrostem zawartości kopolimeru SBS w badanych asfaltach zmniejsza się wartość kąta przesunięcia fazowego, co skutkuje polepszeniem ich właściwości sprężystych.

Analiza wartości SMI (Shear Modulus Index) wykazała znaczący wpływ zawartości kopolimeru styren-butadien-styren (SBS) na zmniejszenie wrażliwości lepiszczy asfaltowych na zmiany sztywności przy zmiennej temperaturze. Zmniejszenie podatności na zmiany temperatury obrazuje bardzo korzystny wpływ zastosowania jako modyfikatora kopolimeru SBS w lepiszczu asfaltowym.

Zastosowanie w MMA lepiszczy modyfikowanych kopolimerem SBS poprawia właściwości funkcjonalne nawierzchni podatnych (co potwierdzają wartości wskaźnika odkształcalności oraz SMI), wpływając tym samym na poprawę parametrów eksploatacyjnych nawierzchni drogowych i tym samym ich trwałość.

References

1. Airey G. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. Fuel 2003; 82: 1709-1719.

2. Ahmedzade P. The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive thermopolymer on the rheological properties of bitumen. Construction and Building Materials 2013; 38: 285-291.

3. Andriescu A, Hesp S.A.M. Time-temperature superposition in rheology and ductile failure of asphalt binders. International Journal of Pavement Engineering 2009; 10(4): 229-240.

4. Andrzejczak K. Zmiany wzrostu wskaźnika nasycenia samochodami osobowymi. Wiadomości Statystyczne 2012; 11: 22-33.

5. Bai M. Investigation of low-temperature properties of recycling of aged SBS modified asphalt . Construction and Building Materials 2017; 150: 766-773

6. Behnood A, Olek J. Rheological properties of asphalt binders modifies with styrene-butadiene-styrene, ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). Construction and Building Materials 2017; 151: 464 - 478

7. Bilski M, Słowik M. Impact of aging on Gilsonite and Trinidad Epuré modified binders resistance to cracking. Bituminous Mixtures and Pavements VII 2019; I: 65-70. ISBN 978-1-351-06326-5

8. Bogdański B, Słowik M. Analiza porównawcza odporności na koleinowanie mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem kryteriów oceny wg metody francuskiej (LCPC) i brytyjskiej (BS). Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym" Poznań 2001: 300-309.

9. Cheng Z, Remenyte-Prescott R. Two probabilistic life-cycle maintenance models for the deteriorating pavement. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2018; 20(3): 394-404.

10. D'Angelo J, Kluttz R, Dongré R, Stephens K, Zanzotto L. Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 2007; 76: 123-157.

11. Gajewski M, Sybilski D, Bańkowski W. The influence of binder rheological properties on asphalt mixture permanent deformation. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 2015; 10(1): 54-60.

12. Gajewski M, Sybilski D, Bańkowski W, Wróbel A, Mirski K. Ocena odporności na deformacje trwałe mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie zaproponowanego parametru funkcjonalnego lepiszcza. Część 1. Badania lepiszczy. Drogownictwo 2009; 9: 279-283.

13. Gajewski M, Wróbel A, Jemioło S, Sybilski D. Wpływ właściwości reologicznych lepiszcza na koleinowanie MMA. XIV International Conference Computer Systems Aided Science 2010: 857-866.

14. Judycki J, Jaskuła P. Diagnostyka i modernizacja konstrukcji nawierzchni drogowych. Diagnostyka, monitoring i modernizacja eksploatowanych obiektów budowlanych 2010; 56: 233-252.

15. Levulyté L, Žuraulis V, Sokolovskij E. The research of dynamic characteristics of vehicle driving over road roughness. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2014; 16(4): 518-525.

16. Lu X, Isacsson U. Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. Construction and Building Materials 2002; 16: 15-22.

17. Merijs-Meri R, Abele A, Zicans J, Haritinovs V. Development of polyolefine elastomer modified bitumen and characterization of its rheological and structural properties. Bituminous Mixtures and Pavements VII 2019; I: 51- 57

18. Radziszewski P. Wpływ modyfikacji elastomerem SBS na właściwości reologiczne lepiszczy asfaltowych. Polimery 2008: 559-563.

19. Sarnowski M. Rheological properties of road bitumen binders modifies with SBS polymer and polyphophosphoric acid. Roads and Bridges - Drogi i Mosty 2015; 1: 47-65.

20. Słowik M. Thermorheological Properties Of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Copolymer Modified Road Bitumen. Procedia Engineering 2017; 208:145-150.

21. Słowik M. Wybrane zagadnienia lepkosprężystości drogowych asfaltów modyfikowanych zawierających elastomer SBS. Rozprawy series Publishing House of Poznan University of Technology 2013; 508.

22. Słowik M, Adamczak P. Ocena wpływu starzenia krótkoterminowego na właściwości asfaltów drogowych modyfikowanych elastomerem SBS. Roads and Bridges - Drogi i mosty 2007; 1: 41-58

23. Surblys V, Žuraulis V, Sokolovskij E. Estimation of road roughness from data of on-vehicle mounted sensors. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2017; 19(3): 396-374.

24. Zicans J, Ivanova T, Merijs-MEri R, Berzina R, Haritonovs V. Aging behavior of bitumen and elastomer modified bitumen. Bituminous Mixtures and Pavements VII 2019; I: 46-50