



MARCIN BILSKI

Politechnika Poznańska
marcin.bilski@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-1445-5749



MIECZYŚLAW SŁOWIK

Politechnika Poznańska
mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0001-8049-591X

Analiza relaksacji w niskiej temperaturze asfaltów drogowych modyfikowanych asfaltami naturalnymi

Wiarygodna ocena właściwości reologicznych asfaltów drogowych wymusza badanie ich zachowania w szerokim zakresie temperatury. O zjawisku relaksacji mówi się np. w sytuacji, kiedy w materiale został wywołany stan odkształcenia (np. w wyniku rozciągania), a naprężenia zmniejszają się w czasie przy stałym odkształceniu. Zdolność lepiszcza asfaltowego do relaksacji w niskiej temperaturze jest korzystna ze względu na ograniczenie podatności nawierzchni asfaltowej na powstawanie spękań. Do kumulacji naprężeń w lepiszczu asfaltowym może dochodzić zarówno w wyniku zmian termicznych (z powodu ochładzania nawierzchni docho-

dzi do skurczu lepiszcza asfaltowego), jak i na skutek obciążenia wywołanego ruchem pojazdów. Czynnikiem determinującym intensywność zjawiska relaksacji jest temperatura. Sposobem na ograniczenie negatywnego wpływu niskiej temperatury na stan nawierzchni drogowej jest odpowiedni dobór lepiszcza asfaltowego, uwzględniający warstwę, w której ma być ono zastosowane oraz strefę klimatyczną, w jakiej ma pracować nawierzchnia. Z punktu widzenia odporności asfaltowej nawierzchni drogowej na powstawanie spękań niskotemperaturowych, pożądaną cechą lepiszcza asfaltowego jest zdolność do szybkiej relaksacji. Lepiszczta asfaltowe charakteryzujące się małą zdolnością do relaksacji są bardziej podatne na pękanie w niskiej temperaturze ze względu na powstawanie naprężeń rozciągających indukowanych termicznie. Lepiszczta asfaltowe jest materiałem lepkosprężystym, a więc w zależności od temperatury zwiększa się lub zmniejsza udział części lepkiej związanej m.in. ze zdolnością do relaksacji. W niskiej temperaturze miękkie lepiszcza asfaltowe (o dużej penetracji w temperaturze 25°C) lub zawierające modyfikatory np. w postaci elastomerów, charakteryzują się większym udziałem części lepkiej w porównaniu do twardych lepiszczy asfaltowych (o małej penetracji w temperaturze 25°C) lub usztywnionych w wyniku modyfikacji np. plastomerami. Większy udział części lepkiej skutkuje mniejszą podatnością lepiszcza asfaltowego na spękania niskotemperaturowe m.in. ze względu na większą i szybszą zdolność do relaksacji [1, 2].

W wyniku modyfikacji asfaltów drogowych dodatkiem w postaci asfaltów naturalnych zwiększa się ich sztywność, co w konsekwencji może skutkować mniejszą odpornością tak modyfikowanego lepiszcza na pękanie w niskiej temperaturze [3]. Reometr zginanej belki BBR jest obecnie aparaturą standardowo wykorzystywaną do oceny usztywnienia próbki lepiszcza asfaltowego w niskiej temperaturze na podstawie wartości modułu sztywności oraz zmian modułu sztywności w dziedzinie czasu obciążenia (zjawisko pełzania przy obciążeniu statycznym i nawrotu po odciążeniu). Ze względu na brak norm czy specyfikacji dotyczących obserwacji zjawiska relaksacji lepiszczy asfaltowych w niskiej temperaturze, autorzy pracy postanowili wykorzystać autorską metodę badawczą.

Cel badań

W celu porównania zdolności do relaksacji asfaltów drogowych oraz lepiszczy modyfikowanych dodatkiem asfaltów naturalnych Gilsonite i Trinidad Epuré zastosowano autorską metodę badawczą, szczegółowo opisaną w pracy [4], umożliwiającą obserwację zjawiska relaksacji lepiszczy w warunkach stałego odkształcenia w niskiej temperaturze.

Przedmiot badań

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano trzy asfalty drogowe 20/30, 35/50 i 50/70 wyprodukowane z rosyjskiej ropy naftowej oraz asfalty naturalne: Gilsonite w postaci sproszkowanej oraz Trinidad Epuré w postaci kruszywa o uziarnieniu 0/8 mm. Zawartość dodatku w postaci asfaltu naturalnego w asfaltach drogowych 35/50 i 50/70 została ustalona po wykonaniu serii próbnych oznaczeń penetracji w temperaturze 25°C w taki sposób, aby po ich modyfikacji uzyskać lepiszcza asfaltowe o zbliżonych wartościach penetracji tzn. założono, że różnice pomiędzy oznaczonymi wartościami penetracji nie będą większe niż 2 mm/10. Zastosowane ilości dodatków w stosunku do masy asfaltu modyfikowanego to 3%, 5%, 7% w przypadku Gilsonite i 15%, 25%, 35% w przypadku Trinidad Epuré. Przyjęto następujący sposób oznakowania uzyskanych lepiszczy asfaltowych: w pierwszej kolejności podano gatunek asfaltu drogowego, a następnie zawartość i rodzaj zastosowanego dodatku. Gilsonite oznaczono w skrócie jako GIL, a Trinidad Epuré jako TE. Przykładowy opis próbek asfaltu 50/70 z dodatkiem 25% Trinidad Epuré – 50/70+25%TE.

Tabela 1. Podstawowe właściwości badanych lepiszczy asfaltowych

Lepiszczce asfaltowe	Penetracja w 25°C, mm/10	Temperatura mięknięcia, °C
20/30	25,6±0,5	63,6±0,2
35/50	40,8±0,3	55,9±0,5
35/50+3% GIL	27,2±0,3	61,1±0,2
35/50+5% GIL	24,4±0,5	62,9±0,3
35/50+7% GIL	19,8±0,3	65,3±0,2
35/50+15% TE	28,6±0,7	57,5±0,3
35/50+25% TE	24,8±0,3	59,5±0,2
35/50+35% TE	19,2±0,5	62,0±0,2
50/70	55,9±0,7	51,6±0,2
50/70+3% GIL	38,6±0,3	55,8±0,4
50/70+5% GIL	32,6±0,4	57,2±0,3
50/70+7% GIL	26,6±0,7	60,4±0,4
50/70+15% TE	39,7±0,6	53,3±0,3
50/70+25% TE	32,0±0,6	55,7±0,3
50/70+35% TE	25,8±0,6	58,6±0,4

Podstawowe właściwości badanych lepiszczy asfaltowych zestawiono w tabeli 1.

Asfalt naturalny Gilsonite jest wydobywany ze złóż znajdujących się w północno-wschodniej części stanu Utah (USA). Surowiec ten stanowi naturalną mieszaninę (w przeliczeniu na masę produktu): węgla – 85%, wodoru – 10%, azotu – 3% oraz tlenu, siarki i pozostałych składników w ilości około 2%. Gilsonite jest materiałem zaliczanym do grupy asfaltów, który z wyglądu przypomina węgiel kamienny. Trinidad Epuré jest to natomiast asfalt naturalny odspojony z powierzchni „jeziora asfaltowego” (Pitch Lake) niedaleko miasta La Brea na wyspie Trynidad i poddany procesowi rafinacji. Proces ten polega m. in. na podgrzewaniu uzyskanego materiału w celu jego zmiękczenia, odparowania z niego wody wolnej i rozpuszczonych w niej związków chemicznych, a także odseparowaniu zanieczyszczeń mineralnych i organicznych np. w postaci kamieni czy drewna [5].

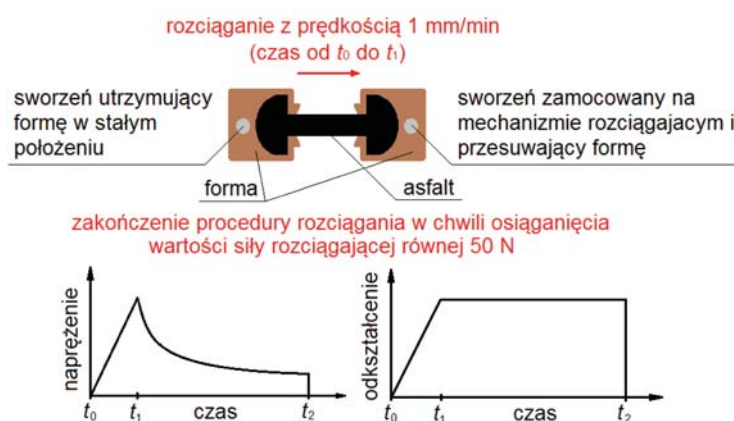
Metodyka badań

Opracowana przez autorów pracy metoda badań została wykorzystana do analizy zjawiska relaksacji w warunkach stałego odkształcenia próbek lepiszczy asfaltowych w niskiej temperaturze ze względu na dużą precyzję pomiarów, w przypadku której wartość średnia siły rozciągającej zawiera się z 95% prawdopodobieństwem w przedziale ± 1 N [4]. Schemat badania przedstawiono na rysunku 1. Próbkę asfaltu rozciąga się do chwili osiągnięcia określonej wartości siły rozciągającej (w czasie od t_0 do t_1 – zakłada się liniowy przyrost naprężenia i odkształcenia w czasie), żeby następnie pozostawić ją w warunkach stałego odkształcenia i ob-

serwować zjawisko relaksacji (czas od t_1 do t_2 – zmniejszanie w czasie wartości naprężenia przy stałym odkształceniu) do chwili zakończenia badania (t_2). W zastosowanej metodzie do oceny zjawiska relaksacji przy stałym odkształceniu w temperaturze $(-16 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ asfaltów drogowych i lepiszczy modyfikowanych asfaltami naturalnymi wykorzystuje się duktylometr składający się z: łaźni cieczerwowej z termostatem, mechanizmu rozciągającego, siłomierzy, a także mosiężne formy stosowane w teście rozciągania asfaltów modyfikowanych wg EN 13589:2008. Łaźnia duktylometru została wyposażona w dodatkowy układ chłodzący, który umożliwia utrzymywanie żądanej temperatury do -20°C w trakcie badania. Temperatura badania została ustalona na -16°C ze względu na możliwość podjęcia próby odniesienia uzyskanych wyników analizowanych w pracy lepiszczy asfaltowych do badań wykonanych w analogicznej temperaturze przy zastosowaniu reometru zginanej belki (BBR).

Procedura przygotowania próbek polegała na zalaniu rozgrzanym lepiszczem asfaltowym mosiężnych form (zgodnych z EN 13589) umieszczonych na wadze laboratoryjnej o dokładności odczytu 0,01 g. Masa lepiszcza umieszczanego w formie wynosiła $(13,75 \pm 0,25)$ g. Następnie na zalanej lepiszczem asfaltowym mosiężnej formie umieszczano silikonową podkładkę, która była dociskana stalowym stemplem w kształcie koła o średnicy 60 mm, w celu uzyskania idealnie równej powierzchni w środkowej części próbki i pozostawiana do wystygnięcia na okres (60 ± 1) minut. Kolejny etap polegał na termostataowaniu próbek w łaźni duktylometru przez okres (30 ± 1) minut. W dalszej kolejności próbki poddawano rozciąganiu z prędkością 1 mm/min do chwili osiągnięcia wartości siły rozciągającej równej 50 N (zakończenie procedury rozciągania) i rejestrowano wartości siły rozciągającej w warunkach stałego odkształcenia przez okres 20 min. Wykonano po cztery powtórzenia w przypadku każdego z badanych lepiszczy asfaltowych.

Wykorzystując wartości siły rozciągającej, uzyskanej w wyniku eksperymentu, obliczono naprężenia rozciągające w lepiszczach asfaltowych według wzoru 1, przyjmując ze względu na małe odkształcenia próbek (nieprzekraczające wartości 0,1% [4]) założenie dotyczące niezmienności przekroju poprzecznego.



Rys. 1. Schemat badania zjawiska relaksacji w duktylometrze [6]

$$\sigma = F \cdot A^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

σ – wartość naprężeń rozciągających, Pa,

F – wartość siły rozciągającej, N,

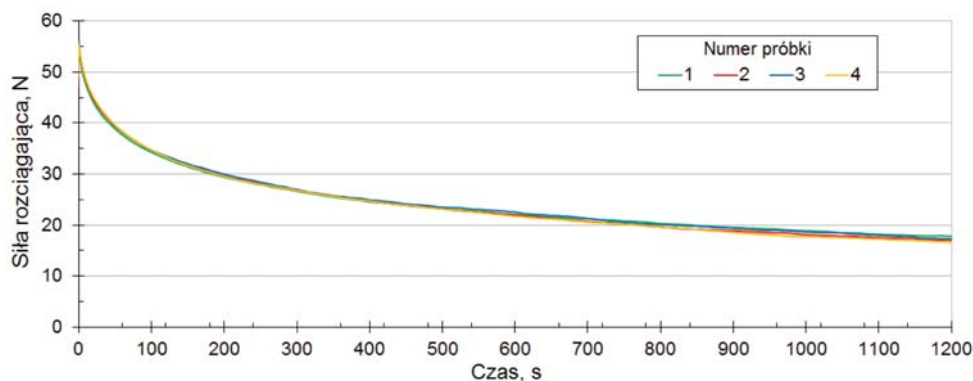
A – pole powierzchni przekroju próbki, 10^{-4} m^2 (próbka o przekroju kwadratowym o długości boku równej 1 cm).

Wyniki badań i ich analiza

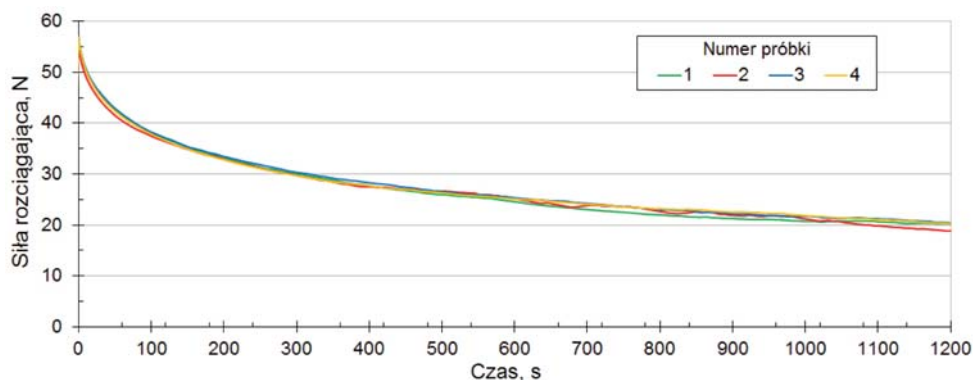
Na rysunkach od 2 do 4 przedstawiono wyniki oznaczania siły rozciągającej w funkcji czasu w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -16°C wybranych próbek lepiszczy asfaltowych – porównywalnych pod względem wartości penetracji w temperaturze 25°C – asfalt drogowy 20/30 oraz lepiszcza modyfikowane 35/50+5%GIL i 35/50+25%TE. Na wykresach przedstawiono wyniki uzyskane na czterech niezależnych kolejno badanych próbkach analizowanego materiału. Widoczne na rysunkach przekroczenie wartości 50 N na początku pomiaru (dla czasu $t = 0 \text{ s}$), a więc po zakończeniu procedury rozciągania badanych próbek lepiszczy asfaltowych, jest spowodowane bezwładnością mechanizmu rozciągającego duktylotromu. Zjawisko to nie ma jednak wpływu na precyzję oznaczeń, gdyż we wszystkich analizowanych przypadkach maksymalna wartość siły rozciągającej mieściła się w przedziale $(56 \pm 2) \text{ N}$. Zauważono, że w przypadku lepiszczy modyfikowanych asfaltem naturalnym Trinidad Epuré różnice w wartościach siły rozciągającej uzyskane dla czterech różnych próbek, w porównaniu do asfaltów drogowych oraz lepiszczy modyfikowanych Gilsonite są nawet dwa razy większe, jednakże odchylenie od wartości średniej w większości przypadków nie przekracza $\pm 1 \text{ N}$. Może być to związane z faktem, że w dodatku Trinidad Epuré prawie połowę (wagowo do 45% masy dodatku) stanowią części mineralne (głównie pyły), które powodują, że struktura przekroju badanych próbek tego samego materiału może być zróżnicowana.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wykresy zależności średnich

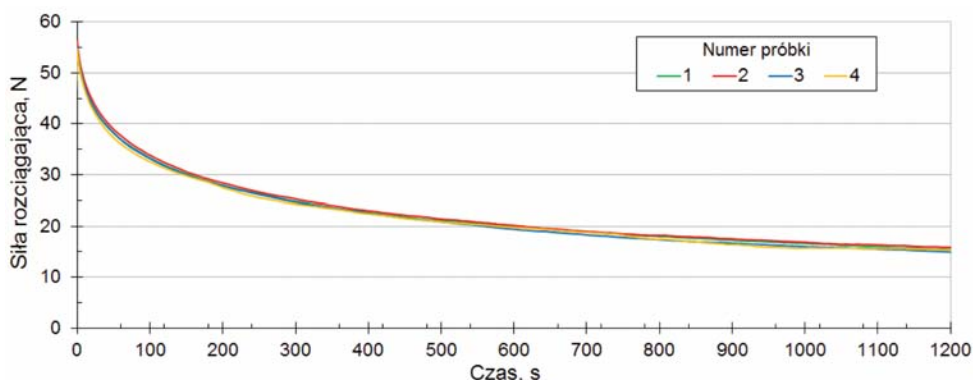
naprężeń rozciągających w dziedzinie czasu, występujących w próbkach analizowanych lepiszczy asfaltowych. Zauważono, że im twardsze lepiszcze asfaltowe (mniejsza wartość penetracji w temperaturze 25°C), tym wolniej zachodzi zjawisko relaksacji w próbce i jego intensywność jest mniejsza. Należy zwrócić uwagę na fakt, że pomimo porównywalnych wartości penetracji w temperaturze 25°C , jakimi charakteryzują się asfalty modyfikowane poszczególnymi dodatkami asfaltów naturalnych, przy zastosowaniu Trinidad Epuré zdolność do relaksacji lepiszcza jest mniejsza niż w przypadku modyfikacji Gilsonite. Jest to najprawdopodobniej związane z faktem dużej zawartości części



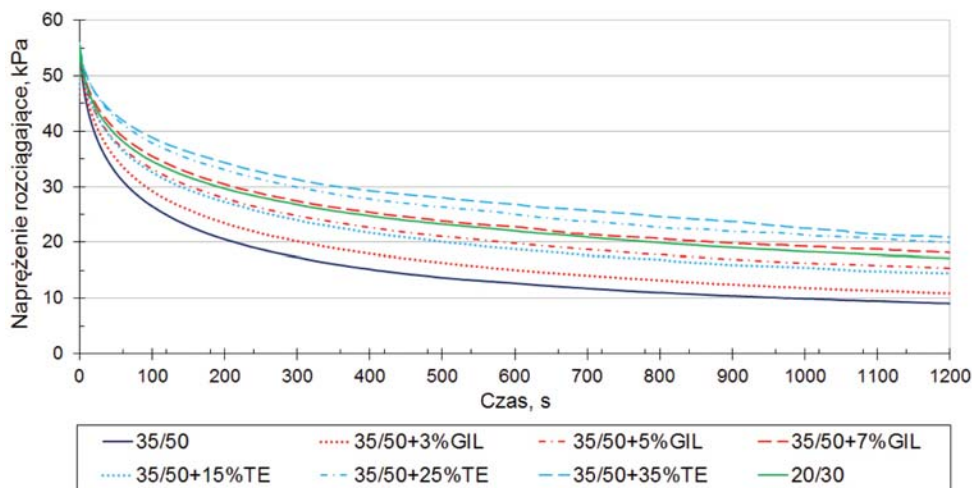
Rys. 2. Wartości siły rozciągającej w dziedzinie czasu w warunkach stałego odkształcenia w przypadku asfaltu drogowego 20/30 w temperaturze -16°C [6]



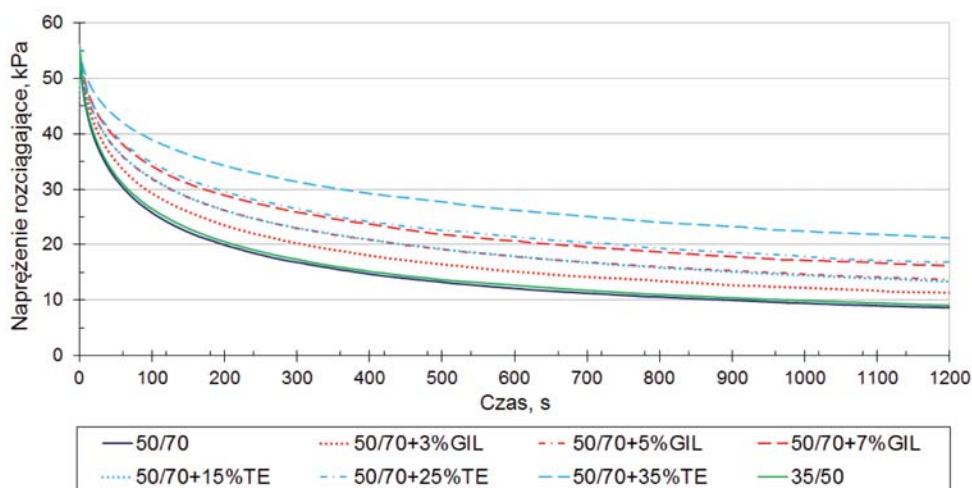
Rys. 3. Wartości siły rozciągającej w dziedzinie czasu w warunkach stałego odkształcenia w przypadku lepiszcza modyfikowanego 35/50+5%GIL w temperaturze -16°C [6]



Rys. 4. Wartości siły rozciągającej w dziedzinie czasu w warunkach stałego odkształcenia w przypadku lepiszcza modyfikowanego 35/50+25%TE w temperaturze -16°C [6]



Rys. 5. Średnie wartości napężenia rozciągającego w dziedzinie czasu w warunkach stałego odkształcenia asfaltu 20/30 i 35/50 oraz lepiszczy modyfikowanych z udziałem asfaltu 35/50 w temperaturze -16°C [6]



Rys. 6. Średnie wartości napężenia rozciągającego w dziedzinie czasu w warunkach stałego odkształcenia asfaltu 35/50 i 50/70 oraz lepiszczy modyfikowanych z udziałem asfaltu 50/70 w temperaturze -16°C [6]

mineralnych w dodatku Trinidad Epuré. Wartości naprężeń rozciągających obliczone dla umownego czasu $t = 60$ s od chwili wywołania warunków stałego odkształcenia w próbce ($t = 0$ s) w przypadku asfaltów modyfikowanych Trinidad Epuré są średnio o około 2 kPa większe, niż w przypadku ich odpowiedników modyfikowanych Gilsonite i nawet o 5 kPa, gdy porównuje się wartości naprężeń w umownym czasie od 300 s do 1200 s. Zauważono występowanie nieznacznie mniejszych różnic w wartościach naprężeń rozciągających pomiędzy lepiszczami asfaltowymi zawierającymi poszczególne dodatki asfaltów naturalnych w przypadku poddania modyfikacji asfaltu bardziej miękkiego, tj. 50/70. Brak wyraźnych różnic w zdolności do relaksacji w przypadku asfaltów drogowych 35/50 i 50/70 można tłumaczyć podobną budową koloidalną i zawartością części olejowej, co odróżnia te lepiszcza od asfaltu drogowego 20/30. Lepiszczka asfaltowe zawierające dodatek Gilsonite lub Trinidad Epuré charakteryzują się większymi warto-

ściami naprężeń rozciągających niż asfalty referencyjne (poddane modyfikacji), ze względu na usztywniające właściwości asfaltów naturalnych. Zbliżoną wartością penetracji w temperaturze 25°C do asfaltu 20/30 charakteryzuje się asfalt 35/50 modyfikowany dodatkiem Gilsonite w ilości 5% lub modyfikowany Trinidad Epuré w ilości 25%. Zdolność do relaksacji w niskiej temperaturze równej -16°C w przypadku asfaltu modyfikowanego 35/50+5%GIL jest większa niż asfaltu 20/30 i lepsza modyfikowanego 35/50+25%TE. Wszystkie asfalty modyfikowane, wykonane z udziałem asfaltu 50/70, charakteryzują się mniejszą zdolnością do relaksacji niż asfalt 35/50.

Dyskusja

Zauważono, że lepiszcza modyfikowane z dodatkiem asfaltów naturalnych Gilsonite i Trinidad Epuré charakteryzują się krzywymi relaksacji o przebiegu mniej malejącym w niskiej temperaturze równej -16°C w porównaniu do asfaltów referencyjnych (stanowiących bazę do modyfikacji), co może skutkować większą podatnością nawierzchni drogowej na powstawanie spękań przy zastosowaniu tak modyfikowanych lepiszczy, szczególnie przy dużych zawartościach asfaltu naturalnego. Na mniejszą zdolność do relaksacji

lepiszczy modyfikowanych zawierających dodatek Trinidad Epuré w porównaniu do zawierających dodatek Gilsonite może mieć wpływ duża zawartość części mineralnych występująca w składzie Trinidad Epuré (wagowo do 45%).

W przypadku zbliżonych wartości penetracji lepiszczy modyfikowanych w temperaturze 25°C lepiszcza modyfikowanych (maksymalna różnica wartości penetracji wynosi 4 mm/10), większą zdolnością do relaksacji charakteryzują się lepiszcza zawierające dodatek Gilsonite niż Trinidad Epuré. Natomiast przy porównywalnej penetracji w temperaturze 25°C lepszą zdolnością do relaksacji niż asfalt drogowy 20/30 charakteryzuje się lepiszcza modyfikowane składające się z asfaltu 35/50 z dodatkiem Gilsonite w ilości 5%. W przypadku asfaltu drogowego 35/50 charakteryzuje się on lepszą zdolnością do relaksacji od wszystkich lepiszczy modyfikowanych asfaltami naturalnymi.

Można stwierdzić, że autorska metoda badawcza zastosowana do oceny zjawiska relaksacji w warunkach stałego

odkształcania w niskiej temperaturze może być wykorzystywana do oceny wpływu modyfikacji asfaltów różnymi dodatkami na zmianę właściwości asfaltów drogowych.

Wnioski

- Większą zdolnością do relaksacji charakteryzują się badane lepiszcza zawierające dodatek Gilsonite niż Trinidad Epuré (w przypadku zbliżonych wartości penetracji w temperaturze 25°C).
- Przy zbliżonej wartości penetracji w temperaturze 25°C lepszą zdolnością do relaksacji niż asfalt drogowy 20/30 charakteryzują się lepiszcza modyfikowane dodatkiem asfaltu naturalnego Gilsonite w ilości nieprzekraczającej 5%.
- Asfalt drogowy 35/50 charakteryzuje się lepszą zdolnością do relaksacji niż wszystkie badane lepiszcza modyfikowane asfaltami naturalnymi.

Bibliografia

- [1] G. Mazurek, M. Iwański, 2017, Relaxation Modulus of SMA with Polymer Modified and Highly Polymer Modified Bitumen, *Procedia Engineering*, nr 172, s. 731-738
- [2] M.R. Nivitha, R. Devika, J. Murali Krishnan, Neethu Roy, 2022, Influence of bitumen type and polymer dosage on the relaxation spectrum of styrene-butadiene-styrene (SBS)/styrene-butadiene (SB) modified bitumen, *Mechanics of Time-Dependent Materials*
- [3] M. Słowik, M. Bilski, 2017, An experimental study of the impact of aging on Gilsonite and Trinidad Epuré modified asphalt binders properties, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, nr 12(2), s. 71-81
- [4] M. Bilski, M. Słowik, M. Mielczarek, 2016, *Badanie zjawiska relaksacji naprężeń zachodzącego w asfaltach drogowych poddanych rozciąganiu w niskiej temperaturze*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury JCEEA”, 63-01-t2, s. 137-144
- [5] M. Bilski, 2018, *Asfalty naturalne – charakterystyka i zastosowanie*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej
- [6] M. Bilski, M. Słowik, 2019, Assessment of Gilsonite and Trinidad Epuré natural asphalt-modified binders ability to relaxation at low temperature, *MATEC Web of Conferences* 262, 05001

KONFERENCJE I SEMINARIA

Tytuł	Organizator	Data i miejsce	Strona www
XIV Międzynarodowa Konferencja Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego GAMBIT 2022	Polski Kongres Drogowy Politechnika Gdańska	Gdańsk, 20–22 czerwca 2022 r.	
Transport Problems 2022	Politechnika Śląska Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej	Katowice, 29 czerwca–1 lipca 2022 r.	https://tp.konferencje.polsl.pl
67. Krynicka Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB	Politechnika Krakowska Wydział Inżynierii Lądowej	Kraków, 11–15 wrzesień 2022 r.	https://krynica2022.pk.edu.pl
13th Central European Congress on Concrete Engineering Next Generation of Concrete Engineering for Post-Pandemic Europe	fib CEB-FIP Poland	Zakopane, 13–14 września 2022 r.	ccc2022zakopane.pl
IX Międzynarodowa Konferencja Technologie Bezwykopowe NO-DIG POLAND 2022	Politechnika Świętokrzyska	Kraków 27–29 września 2022 r.	https://nodigpoland.pl
VI Konferencja Drogowo-Mostowa Warunki gruntowe a projektowanie oraz budowa dróg i mostów	Elamed Sp. z o.o.	Katowice 5–7 październik 2022 r.	https://konferencjadrogowo-mostowa.elamed.pl
XXI Konferencja Naukowo-Techniczna KONTRA'2022 Trwałość budowli i ochrona przed korozją	Komitet Trwałości Budowli PZiTB Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Lądowej	Cedzyna k.Kielc, 13–14 październik 2022 r.	www.kontra.il.pw.edu.pl
XVII Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego	Politechnika Świętokrzyska Wydział Budownictwa i Architektury	Cedzyna k.Kielc, 19–21 października 2022 r.	rzeczoznawstwo2022.tu.kielce.pl
XIX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej	Polski Komitet Geotechniki Politechnika Śląska Katedra Geotechniki i Dróg	Gliwice, 4–7 lipca 2023 r.	