Dr hab. inż. Paweł Mieczkowski
Katedra Dróg i Mostów
Wydział Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Tel. (91) 449 40 36
e-mail: pawel.mieczkowski@zut.edu.pl

Szczecin, 20 maj 2017 r.

OPINIA

o pracy doktorskiej **mgr inż. Marcina Bilskiego**
pt. **„Właściwości reologiczne asfaltów drogowych modyfikowanych dodatkiem asfaltów naturalnych z uwzględnieniem wpływu starzenia"**

wykonanej pod kierunkiem
dr hab. inż. Mieczysława Słowika

Podstawa opracowania

Podstawą do wykonania recenzji pracy doktorskiej jest pismo Pana Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej prof. Tomasza Mroza z dnia 04.04.2017 r., realizującego uchwałę Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej z dnia 31.03.2017 r.

Ogólna charakterystyka dysertacji

Recenzowana rozprawa dotyczy wpływu asfaltu naturalnego na właściwości asfaltów ponaftowych w aspekcie możliwości ich wykorzystania w mieszankach mineralno-asfaltowych dostosowanych pod względem parametrów fizyczno-wytrzymałościowych do warunków klimatyczno-pogodowych występujących w Polsce. Podjęte w pracy rozważania analizowano w oparciu o wybrane podstawowe badania klasyfikacyjne oraz reologiczne, opracowane w ramach programu badawczego SHRP. Dodatkowo, w zakresie niskich temperatur (-16ºC), wykorzystano autorską metodę badawczą do oceny relaksacji naprężeń (wywołanych odkształceniem) w lepiszczu asfaltowym. Oddziaływanie modyfikatora w postaci asfaltu naturalnego na parametry lepiszczy ponaftowych oceniano z uwzględnieniem starzenia krótko- i długoterminowego, które to mają symulować procesy zachodzące podczas produkcji, transportu, wbudowywania i eksploatacji mieszanek mineralno-

asfaltowych. Badane zjawiska reologiczne modelowano z wykorzystaniem formuł matematycznych (odpowiadających ośrodkom liniowo sprężystym), a ocenę zgodności wartości teoretycznych z pomierzonymi przeprowadzono na podstawie testów statystycznych.
Rozprawa składa się 8 rozdziałów uzupełnionych o streszczenie w języku polskim i języku angielskim, bibliografii obejmującej 103 pozycje, spisu norm polskich (11 pozycji) i amerykańskich (4 pozycje), spisu treści, wykazu skrótów oraz spisu tabel i rysunków.
Do pracy dołączono załączniki z wynikami przeprowadzonych badań.
Praca została przedstawiona w formie papierowej i elektronicznej (w formacie *pdf) na płycie CD.

Treść rozprawy
(zawartość, uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania)

Rozdział 1 – Wprowadzenie
W rozdziale przedstawiono rys historyczny dotyczący stosowania asfaltów naturalnych jako materiałów hydroizolacyjnych oraz spełniających funkcję spoiwa. Pierwsze użycie (odnotowane) tego materiału do budowy dróg miało miejsce w Babilonie i jest datowane na 615 rok p.n.e. W Europie (a dokładnie w Paryżu) po raz pierwszy wykorzystano asfalt naturalny najpierw do budowy chodników (1810 r.), a następnie nawierzchni drogowej na Polach Elizejskich (1824 r.). Ze względu na twardość asfaltu naturalnego i podatność na spękania stosowano do jego zmiękczania asfalty ponaftowe. Od około 1910 r. sytuacja się odwróciła i asfalty naturalne zostały wyparte przez lepiszcza pochodzące z destylacji ropy naftowej. Asfalty naturalne są stosowane do chwili obecnej jako dodatki modyfikujące właściwości asfaltów ponaftowych, przede wszystkim w zakresie poprawy ich parametrów wytrzymałościowych.
Rozdział kończą informacje na temat działań podjętych przez Autora, których celem było określenie wpływu modyfikacji asfaltów drogowych dodatkiem asfaltów naturalnych pozyskanych z dwóch źródeł, różniących się zawartością części mineralnych.

<u>Uwagi, pytania:</u>

1. Na str. 10, wers 2-4 g, Autor napisał: „Asfalty naturalne, które są protoplastą *syntetycznego* asfaltu (ponaftowego) mają głównie zastosowanie jako dodatki modyfikujące lepiszcza ponaftowe." Reakcja syntezy to inaczej *reakcja tworzenia*, w wyniku której z prostych substratów powstają bardziej złożone produkty. Asfalty drogowe są produktami destylacji, który to proces polega na ogrzaniu ropy naftowej do temperatury wrzenia, a następnie skraplaniu par z podziałem na frakcje o określonych temperaturach wrzenia. Na rynku funkcjonują również asfalty syntetyczne, ale ich stosowanie jest bardzo ograniczone, przede wszystkim ze względu na cenę.

Rozdział 2 – Studium literatury
Rozdział składa się czterech podrozdziałów głównych.

W pierwszym (*Charakterystyka asfaltów*) zdefiniowano asfalty ponaftowe i asfalty występujące w naturalnych złożach oraz przedstawiono podstawowe informacje na ich temat. W przypadku asfaltów ponaftowych skupiono się na jego składzie chemicznym i grupowym (układ koloidalny) oraz technologii produkcji. Przedstawiono klasyfikacje asfaltów ze względu na przeznaczenie (drogowe, przemysłowe, specjalne) oraz metodę otrzymywania (destylacyjne, utlenianie, ekstrakcyjne, komponowane). Asfalty drogowe zostały podzielone zgodnie z normą na miękkie, twarde, modyfikowane, specjalne oraz wielorodzajowe. W przypadku asfaltów naturalnych podano klasyfikację, która opiera się na ich rozpuszczalności w dwusiarczku węgla (C_2S) – rozpuszczalne (wosk mineralny, piasek roponośny, asfaltyt) i nierozpuszczalne (pyrobitumen). Każdy z wymienionych rodzajów lepiszcza został scharakteryzowany ze względu na miejsce występowania, podstawowe właściwości oraz wykorzystanie w przemyśle. Podrozdział jest zakończony informacją na temat wpływu dodatku w postaci asfaltów naturalnych Gilsonite i Trinidad Epurè na właściwości asfaltów ponaftowych.

Drugi z podrozdziałów obejmuje problematykę wpływu starzenia na zmiany w składzie asfaltu i jego strukturze chemicznej. Miarą tego zjawiska może być indeks starzenia, jako iloraz lepkości dynamicznej asfaltu po i przed starzeniem. Procesy z tym związane podzielono na dwie grupy: starzenie technologiczne oraz eksploatacyjne. Pierwsze charakteryzuje się dużą intensywnością zmian w krótkim czasie i jest związane z wysokimi temperaturami produkcji i wbudowywania oraz dostępem tlenu czy też absorpcją lekkich składników olejowych przez ziarna agregatu mineralnego, natomiast drugie jest długofalowe i zachodzi w mieszance mineralno-asfaltowej na skutek działania tlenu, promieniowania UV oraz czynników zewnętrznych (głównie w warstewce przypowierzchniowej warstwy ścieralnej). Procesy starzeniowe symuluje się w warunkach laboratoryjnych. W przypadku starzenia krótkoterminowego można wyróżnić metodę RTFOT, TFOT i RFT, natomiast przy starzeniu długoterminowym najbardziej popularną jest metoda PAV.

W trzecim podrozdziale omówiono wpływ temperatury na właściwości lepiszczy asfaltowych z uwzględnieniem aparatury umożliwiającej ich określenie. Skupiono się na metodyce opracowanej w ramach programu SHRP, zarówno w zakresie temperatur ujemnych (reometr zginanej belki BBR – Bending Beam Rheometer, aparat do rozciągania bezpośredniego DDT – Direct Tension Tester, aparat do badania właściwości niskotemperaturowych ABCD – Asphalt Binder Cracking Device) jak również średnich i wysokich temperatur (reometr dynamicznego ścinania DSR – Dynamic Shear Rheometer).

Najbardziej obszerną część rozdziału 2 stanowi podrozdział 4, w którym opisano możliwości modelowania zjawisk reologicznych zachodzących w asfaltach. Asfalt jest ciałem reologicznie złożonym, czyli sprężysto-plastyczno-lepkim. Do opisu tego rodzaju reologicznie złożonego materiału wykorzystuje się modele zbudowane z prostych ciał doskonałych: sprężystego Hooke'a (charakteryzowanego przez moduł sprężystości E), lepkiego Newtona (charakteryzowanego rzez lepkość η) oraz plastycznego Saint Venanta (opisywanego przez granicę plastyczności τ_y lub σ_y). Modele zaproponowane przez Autora odpowiadają ciału rzeczywistemu typu lepkosprężystego, tj. model Maxwella, Kelvina oraz stanowiący ich

szeregowe połączenie model Burgersa. Zaletą modelu Maxwella jest możliwość opisu zjawiska relaksacji naprężeń, w przypadku modelu Kelvina – opis zjawiska pełzania i nawrotu, natomiast model Burgersa jest kompilacją obu tych modeli. Zachowanie się rzeczywistych materiałów typu asfalt jest znacznie bardziej skomplikowane niż możliwości jego przybliżenia w oparciu o ww. modele mechaniczne. Jest to związane przede wszystkim z plastycznością lepiszczy asfaltowych w zakresie temperatur użytkowych, a tego elementu nie ujmuje żaden z zaproponowanych modeli. Jednakże dla przyjętej metodyki badawczej są one wystarczające i pozwalają modelować takie parametry, jak pełzanie, nawrót czy też relaksację naprężeń.

Uwagi, pytania:

1. Na str. 11, wers 12-15 g, jest napisane: „Należy nadmienić, że nie wszystkie gatunki ropy naftowej nadają się do produkcji asfaltu ponaftowego spełniającego wymagania europejskich norm i specyfikacji. W tym celu wykorzystuje się tzw. ropy asfaltowe ...." – zdaniem recenzenta ropy asfaltowe (naftenowe) pozwalają uzyskać lepiszcza o odpowiednich parametrach już przy zastosowaniu destylacji atmosferycznej. Wykorzystując procesy destylacji próżniowej oraz utleniania uzyskuje się asfalty o podobnych parametrach z rop mieszanych (lekkich rop naftowych), a nawet w skrajnych przypadkach z rop parafinowych.
2. Na str. 22, wers 8-9g jest napisane: „Największe zmiany zachodzą w warstwie ścieralnej". Zdaniem recenzenta przy prawidłowym wykonawstwie wpływ starzenia eksploatacyjnego (długoterminowego) nie dotyczy całej warstwy ścieralnej (AC S, SMA, MA), ale wyłącznie warstewki przypowierzchniowej, bezpośrednio narażonej na oddziaływanie tlenu z powietrza, promieniowania UV oraz czynników otoczenia.
3. Na str. 20 rys. 2.9 jest opisany jako *przyrost sztywności* asfaltu w funkcji czasu starzenia. Oś pionowa na tym rysunku jest opisana jako *indeks starzenia IS* i określa wzrost lepkości asfaltu na skutek procesów starzeniowych. Tym samym opis rysunku powinien odnosić się do tego parametru. Sztywność jest zależna od lepkości asfaltu, ale nie jest to bezpośrednia zależność – wpływ na nią mają również typ reologiczny asfaltu, temperatura i czas obciążenia.
4. Autor opisując w rozdz. 2.2 starzenie lepiszcza asfaltowego powinien zwrócić uwagę, że na proces ten może mieć wpływ obecność w asfalcie naturalnym różnych, katalitycznie oddziaływujących metali i ich tlenków. W przypadku samych lepiszczy ponaftowych przebieg utwardzania (w wyniku starzenia) będzie zależny od składu chemiczno-grupowego asfaltu.

Rozdział 3 – Tezy, cel i zakres rozprawy

W pracy sformułowano dwie tezy. Pierwsza odnosi się do ograniczenia procesów starzeniowych lepiszczy w wyniku ich modyfikacji dodatkiem asfaltu naturalnego, druga mówi o możliwości zastąpienia w polskich warunkach klimatycznych twardych asfaltów drogowych w mieszankach typu MA lub AC WMS lepiszczami z dodatkiem asfaltu naturalnego.

Cele pracy przedstawione przez Autora dotyczyły określenia wpływu dodatku asfaltu naturalnego na właściwości reologiczne asfaltów przed i po starzeniu, możliwości stosowania tego rodzaju wyrobów w aspekcie warunków klimatycznych charakterystycznych dla obszaru Polski oraz opisu zjawisk reologicznych pełzania, nawrotu i relaksacji naprężeń w oparciu o modele ciał lepkosprężystych, których poprawność weryfikowano analizą statystyczną.
Zakres pracy obejmował analizę literatury z omawianego obszaru wiedzy, charakterystykę lepiszczy oraz metodykę ich badań, modelowanie procesów reologicznych, dyskusje nad uzyskanymi wynikami oraz wnioski.

Uwagi, pytania:

1. Tezę nr 2 można uszczegółowić: „... możliwe jest zastąpienie twardych asfaltów drogowych .... lepiszczami *o mniejszej twardości,* modyfikowanymi dodatkiem asfaltów naturalnych"

Rozdział 4 – Charakterystyka badanych lepiszczy asfaltowych
Rozdział składa się z trzech podrozdziałów.
W pierwszym przedstawiono rodzaje asfaltów drogowych przeznaczonych do badań. Wykorzystano asfalty z rafinerii LOTOS, dwa rodzaje wytypowane do modyfikacji (35/50 i 50/70) oraz jeden jako porównawczy (20/30).
Drugi podrozdział dotyczy asfaltów naturalnych, które Autor wytypował do roli modyfikatora asfaltów drogowych, tj. Gilsonite oraz Trinidad Epurè.
W trzecim podrozdziale przedstawiono składy asfaltów drogowych modyfikowanych dodatkiem asfaltu naturalnego oraz sposób ich oznaczenia. W przypadku Gilsonite ilość dodatku wyniosła 3, 5 i 7%, natomiast dla Trinidad Epurè: 15, 25 i 35%.

Uwagi, pytania:

1. Udziały procentowe asfaltów naturalnych Gilsonite i Trinidad Epurè były dobrane tak, by uzyskać zbliżone wartości penetracji asfaltów modyfikowanych. Zawartość Gilsonite wahała się w zakresie od 3 do 7%. Analizując literaturę z zakresu modyfikacji asfaltów dodatkiem Gilsonite wielokrotnie pojawia się informacja, że jego optymalna ilość w mieszankach mineralno-asfaltowych (AC, MA) wynosi ok. 8-10% (w stosunku do masy asfaltu). Czy Autor uwzględnił to na etapie wyboru ilości modyfikatora typu Gilsonite?
2. Jednym z elementów różniących asfalty naturalne Gilsonite i Trinidad Epurè jest zawartość czystego lepiszcza bądź zawartość części mineralnych. Czy w badaniach Autor określił w tych materiałach zawartość składników pochodzenia węglowodorowego i mineralnego (metodą ekstrakcji) i oznaczył parametry „czystego" lepiszcza.

Rozdział 5 – Metodyka badań lepiszczy asfaltowych
Rozdział składa się z sześciu podrozdziałów głównych.
W pierwszej części omówiono sposób przygotowania próbek asfaltów modyfikowanych. Procedura w przypadku obu modyfikatorów była zbliżona i polegała na rozgrzaniu asfaltów drogowych (35/50 i 50/70) do odpowiedniej temperatury, po osiągnięciu której dodawano asfalt naturalny jednocześnie mieszając szklaną pałeczką. Całość ponownie wygrzewano

przez 30 min., po czym ujednorodniano przy użyciu homogenizatora. Różnica dotyczyła temperatury wygrzewania (a w pierwszym etapie ogrzania) – dla Gilsonite wynosiła ona 185ºC (dla obu asfaltów drogowych), dla Trinidad Epurè 165ºC i 175ºC zależnie od rodzaju asfaltu drogowego (odpowiednio 50/70 i 35/50).

Trzy pozostałe podrozdziały obejmują swym zakresem metodykę przeprowadzonych badań i oznaczeń: starzenia (RTFOT, PAV), penetracji, temperatury mięknienia wg PiK, indeksu penetracji, zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego w DSR, modułu sztywności, pełzania i nawrotu w reometrze BBR oraz relaksacji naprężeń przy użyciu duktylometru.

W końcowej części rozdziału przedstawiono funkcjonalną klasyfikację asfaltów PG (Performance Grade) opracowaną w ramach programu Superpave. Omówiono również zakres analizy statystycznej wykorzystywanej do wartościowania uzyskanych wyników z badań i oznaczeń.

Uwagi, pytania:

1. Przygotowanie próbek asfaltów modyfikowanych wiązało się z ich obróbką termiczną i wymagało wstępnego ogrzewania celem upłynnienia lepiszcza, a następnie wygrzewania przez 30 min. Mimo dużej objętości lepiszcza (0,5 l) i stosunkowo niewielkiej powierzchni kontaktu z tlenem właściwości lepiszcza mogły ulec zmianie. Czy asfalty drogowe (pełniące rolę porównawczych) 35/50 i 50/70 były kondycjonowane w warunkach odpowiadających procesowi modyfikacji?
2. Na str. 44 wers 11-1g, jest napisane: „Do oceny wrażliwości temperaturowej asfaltu wykorzystano obliczone wartości indeksu penetracji ....". Indeks penetracji I_p jest wskaźnikiem określającym reologiczne właściwości asfaltów w zakresie stanu lepkosprężystego i wyznacza się go na podstawie wrażliwości temperaturowej asfaltu. Wartości I_p jest przyporządkowany typ reologiczny lepiszcza (zol, żel, zol-żel), który pozwala określić zachowanie się lepiszcza w wyniku zmian temperatury.
3. Na str. 50 w opisie wzoru (5.3) jednostką ugięcia $\delta(t)$ jest *s* – powinno być mm.

Rozdział 6 – Wyniki badań lepiszczy asfaltowych i ich analiza

Rozdział składa się trzech podrozdziałów głównych, w których przedstawiono wyniki badań asfaltów referencyjnych (20/30, 35/50 i 50/70) i modyfikowanych dodatkiem TE i GIL (35/50 i 50/70) oraz ich analizę. Pierwsza część obejmuje podstawowe właściwości, tj. penetrację w 25ºC, temperaturę mięknienia, indeks penetracji i zmianę masy po starzeniu krótkookresowym. W drugiej części opisano wyniki uzyskane z oznaczeń parametrów reologicznych, tj. zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego w DSR, pełzania i nawrotu w BBR oraz relaksacji naprężeń w duktylometrze. Dodatkowo na podstawie badań w DSR określono wskaźnik odkształcalności przed i po starzeniu RTFOT ($|G^*|/\sin(\delta)$), moduł stratności ($|G^*|\cdot\sin(\delta)$), wskaźniki usztywnienia pozwalające ocenić odporność lepiszczy na koleinowanie ($SI_{Rutting}$) i zmęczenie ($SI_{Fatigue}$) oraz indeksy zespolonego modułu ścinania CMI po RTFOT i PAV. W trzeciej części uzyskane wyniki z oznaczeń i pomiarów odniesiono do

wymagań Superpave. Wyznaczono temperaturę równoważną i krytyczną przed i po procesie starzenia oraz sklasyfikowano asfalty wg wymagań PG (Performance Grade).

Uwagi, pytania:

1. Na str. 61, wers 14-15g jest napisane, że obliczone wartości niepewności rozszerzonej *U(x)* w przypadku wszystkich analizowanych w pracy lepiszczy nie przekraczają wartości ±0,7 mm/10. Dla lepszego zobrazowania można było zapisać , że dotyczy to wyłącznie asfaltów przed procesem starzenia.
2. Wartości penetracji i niepewności rozszerzonej asfaltów 20/30 i 35/50 po RTFOT i PAV przedstawione na rys. 6.1 nie są tożsame z przedstawionymi w załączniku A.3 (w załączniku wpisano wartości sprzed starzenia).
3. Na str. 61, wers 8-11d jest napisane, ze uzyskane wartości penetracji asfaltów modyfikowanych dodatkiem GIL i TE mieszczą się w granicach wartości niepewności rozszerzonej 2 mm/10. Wyjątek stanowi para asfaltów 35/50+3%GIL i 35/50+15%TE. Analizując uzyskane wyniki z przeprowadzonych oznaczeń warunek zbliżonej penetracji (±2 mm/10) przy uwzględnieniu niepewności nie został spełniony również dla pary asfaltów 50/70+7%GIL i 50/70+35%TE (26±0,7 i 25,8±0,6 –różnica przy uwzględnieniu niepewności rozszerzonej wynosi 2,1 mm/10).
4. Na str. 65, wers 5-9 jest napisane, że ze względu na duże zróżnicowanie w wartościach penetracji ..... uwzględnianie tylko procesu starzenia RTFOT może skutkować sformułowaniem błędnych wniosków. Odnosząc się do powyższego zapisu, mając jednocześnie świadomość, że dodatek asfaltu naturalnego stosuje się przede wszystkim do warstw nośnych (wiążąca i podbudowa), czy wpływ starzenia technologicznego nie powinien stanowić bardziej dogłębnej analizy.
5. Wartości temperatury mięknienia przedstawione na rys. 6.3 (str. 66) nie są tożsame z przedstawionymi w załącznikach (tab. A.5-A.6). Dla przykładu: niepewność rozszerzona po RTFOT dla asfaltów 20/30, 35/50+15%TE, 35/50+25%TE, temperatura mięknienia po RTFOT+PAV dla asfaltu 35/50+35%TE.
6. Analizując wyniki z oznaczeń penetracji i temperatury mięknienia po starzeniu RTFOT+PAV asfalty modyfikowane dodatkiem GIL w stosunku do TE z jednej strony charakteryzują się większymi spadkami penetracji, z drugiej mniejszymi przyrostami temperatury mięknienia. Co zdaniem autora może być przyczyną takiego zachowania?
7. Przedstawione na rys. 6.5 wartości indeksu penetracji wskazują, że dodatek asfaltu TE wpływa na zmianę typu reologicznego lepiszcza modyfikowanego (w kierunku zol), co w efekcie zwiększa jego wrażliwość temperaturową. Co zdaniem autora pracy może być przyczyną takiego zachowania?
8. Wartości indeksu penetracji przedstawione na rys. 6.5 (str. 69) dla asfaltów 35/50 i 50/70 modyfikowanych TE (nie poddanych starzeniu) nie są tożsame z przedstawionymi w załączniku (tab. A.7). Niezgodność taką stwierdzono również dla asfaltu 50/70+15%TE, 50/70+25%TE i 50/70+35%TE po RTFOT.
9. Na str. 70, wers 10-21 napisano, że dla lepiszcza 35/50 modyfikowanego dodatkiem TE zaobserwowano mniejsze przyrosty PI w przypadku starzenia RTFOT, a większe po

starzeniu RTFOT+PAV. W przypadku asfaltu 50/70 nie odnotowano widocznych tendencji w zakresie zmian PI w wyniku procesów starzenia w zależności od rodzaju modyfikatora. Zdaniem recenzenta charakter zmian PI lepiszczy 35/50 i 50/70 na skutek ich modyfikacji dodatkiem GIL i TE oraz zachodzących procesów starzenia jest podobny. W przypadku asfaltu 50/70 modyfikowanego TE wpływ starzenia PAV na zmianę PI jest jeszcze bardziej widoczny niż w przypadku asfaltu 35/50.

10. Na rys. 6.7-6.9 (str. 73-75) przedstawiono wartości zespolonego modułu ścinania $|G^*|$ lepiszczy modyfikowanych dodatkiem Gil i TE odpowiednio przed procesem starzenia i po RTFOT oraz RTFOT+PAV. Na str. 72-76 uzyskane wyniki Autor analizuje m.in. pod kątem wpływu starzenia. Zdaniem recenzenta dla lepszego zobrazowania zachodzących zmian można było umieścić dodatkowy wykres (-y) wpływu procesów starzenia na zmianę wartości modułu dla wybranych lepiszczy.
11. Na str. 76, wers 4-8d jest napisane: „W wyniku procesu starzenia funkcje zależności średniej wartości kąta δ od temperatury z przebiegu S-kształtnego ..... przechodzą w liniowy, przy jednoczesnym zwiększeniu kąta nachylenia fragmentu krzywych w postaci prostych" – zwiększony kąt nachylenia dotyczy wyłącznie zakresu wyższych temperatur, tj. od 40-50ºC do 80ºC. W niższych temperaturach kąt przesunięcia fazowego po starzeniu jest mniejszy.
12. Na str. 83, wers 1-5d jest napisane, że im mniejsza wartość kąta δ tym lepiszcze asfaltowe jest bardziej sprężyste (elastyczne), co wiąże się ze zwiększeniem jego odporności na spękania zmęczeniowe. Zdaniem recenzenta odporność na zmęczenie wzrasta wraz ze zmniejszeniem się sztywności lepiszcza, co jest jednoznaczne ze wzrostem podatności do deformacji i zwiększeniem się cech lepkich (tym samym i kąta przesunięcia fazowego). Odporność na zmęczenie opisaną umownym wzorem $|G^*|\cdot\sin(\delta)$ należy traktować w tym przypadku łącznie, nie jako składową dwóch czynników niezależnych. Potwierdzają to m.in. wnioski wyciągnięte z badania relaksacji z zastosowaniem duktylometru.
13. Na str. 88-89, wers 1-4 jest napisane: „Duża zawartość składników mineralnych (około 50% w stosunku wagowym), którą charakteryzuje się asfalt naturalny TE może natomiast wpływać na mniejsze usztywnienie tak modyfikowanego lepiszcza w wyniku starzenia długookresowego, w porównaniu do modyfikowanego asfaltem naturalnym Gilsonite" – to stwierdzenie wymaga doprecyzowania, szczególnie w zakresie wpływu części mineralnych na proces starzenia asfaltu.

Rozdział 7 – Modelowanie zjawisk reologicznych zachodzących w badanych lepiszczach asfaltowych

Rozdział składa się z trzech podrozdziałów głównych. W pierwszym wytypowano modele do matematycznego opisu zjawiska pełzania i nawrotu (na podstawie wyników badań w BBR) oraz relaksacji naprężeń przy stałym odkształceniu w niskiej temperaturze (wyniki badań z duktylometru). W przypadku badań BBR wykorzystano model Burgersa oraz model stanowiący szeregowe połączonie modelu Burgersa i Kelvina, natomiast do opisu relaksacji

uogólniony model Maxwella cztero- i sześcio- parametrowy. Przedstawiono również wzory pozwalające wyznaczyć wartości naprężeń i odkształceń.
Drugi podrozdział poświęcono modelowaniu zjawiska pełzania i nawrotu (badanych w BBR w temperaturze -8ºC, -16ºC, -24ºC, -32ºC). Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej, pozwalającej oszacować zgodność modeli z wynikami badań (współczynnik determinacji r^2) oraz dokładność estymacji wartości rzeczywistych za pomocą funkcji matematycznych (pierwiastek ze średniej kwadratów odchyleń RMSD, suma kwadratów odchyleń SSD). Lepszą zgodność wartości pomierzonych z obliczonymi uzyskano dla modelu Burgersa-Kelvina.
Trzecia część dotyczy modelowania zjawiska relaksacji naprężeń badanych w duktylometrze w temperaturze -16ºC. Uzyskane wyniki, podobnie jak w poprzednim przypadku, poddano analizie statystycznej. Lepszą zgodność wartości pomierzonych z obliczonymi uzyskano dla 6-parametrowego uogólnionego modelu Maxwella.

Uwagi, pytania:

1. Na str. 116 i 117 (w obu przypadkach w wersie 9d) jest napisane, że do opisu matematycznego zarówno zjawiska pełzania i nawrotu jak i relaksacji naprężeń wykorzystano informacje zawarte w pkt. 3.5.2. Brak takiego rozdziału w pracy – prawidłowo pkt. 2.4.2.
2. Na str. 118, wers 14-17g jest napisane: „Można zauważyć, że wartości odkształcenia obliczone w przypadku modelu Burgersa charakteryzują się znacznymi odchyleniami od wartości oznaczonych doświadczalnie w zakresie pierwszych kilkudziesięciu sekund po wywołaniu stanu naprężenia w próbce lepiszcza asfaltowego oraz po jej odciążeniu." Co Autor rozumie przez znaczne odchylenia od wartości doświadczalnych, szczególnie w odniesieniu do pierwszych kilkudziesięciu sekund po przyłożeniu naprężeń. Przyglądając się wynikom przedstawionym na rys. 7.3 oraz w załącznikach (C.1 – C.135) odchylenia pomiędzy wartością pomierzoną a obliczoną w oparciu o model Burgersa zdaniem recenzenta dotyczą przede wszystkim okresu po odciążeniu. Jakiego rzędu różnice w wartościach odkształceń dla pierwszych kilkudziesięciu sekund obciążenia są pomiędzy przyjętymi modelami Burgersa i Burgesa-Kelvina.

Rozdział 8 – Dyskusja
Rozdział stanowi podsumowanie rozważań dotyczących wyników uzyskanych z badań podstawowych i reologicznych lepiszczy modyfikowanych dodatkiem asfaltu naturalnego z uwzględnieniem procesu starzenia. Wyciągnięte wnioski potwierdzają słuszność pierwszej z tez postawionych w rozdziale 3, że „procesy starzenia technologicznego i eksploatacyjnego wywołują mniejsze zmiany we właściwościach reologicznych lepiszczy modyfikowanych asfaltami naturalnymi niż w przypadku referencyjnych asfaltów drogowych".
Rozszerzenie zakresu badawczego o DSR i BBR dało możliwość sklasyfikowania asfaltów z uwzględnieniem wymagań Superpave. Opiera się ona na parametrach funkcjonalnych, co pozwala określić przydatność lepiszczy do mieszanek mineralno-asfaltowych, w zależności od strefy klimatycznej oraz usytuowania w konstrukcji.

Ważnym rezultatem osiągniętym w ramach pracy jest określenie rodzaju asfaltu modyfikowanego (na bazie bardziej miękkiego asfaltu bazowego z udziałem asfaltu naturalnego) o parametrach zbliżonych do twardszego asfaltu drogowego, nie pogarszając jego właściwości lepko-sprężystych. Tym samym potwierdzono słuszność tezy nr 2, mówiącej o możliwości zastąpienia twardych asfaltów drogowych lepiszczami o mniejszej twardości, modyfikowanymi dodatkiem asfaltu naturalnego.
Ważne ze względów technicznych zjawiska pełzania, nawrotu czy też relaksacji naprężeń zostały przez Autora zamodelowane matematycznie. Osiągnięte wyniki dla lepiszczy modyfikowanych dodatkiem TE lub GIL świadczą o możliwości wykorzystania przyjętych modeli do opisu zjawisk fizycznych, kształtujących zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych z ich udziałem.

Uwagi, pytania:

1. Brak.

Rozdział 9 – Wnioski

W rozdziale podsumowano wyniki prac badawczych oraz analiz teoretycznych. Sformułowane wnioski dotyczą stosowania modyfikatora w postaci asfaltu naturalnego i jego wpływu na zmianę parametrów lepiszczy drogowych. Do najważniejszych można zaliczyć:

- dodatek asfaltu naturalnego powoduje wzrost sztywności modyfikowanych lepiszczy w szerokim zakresie temperatur (od -40ºC do +80ºC) przed i po procesie starzenia;
- zróżnicowana intensywność procesów starzeniowych lepiszczy asfaltowych jest zależna od rodzaju dodatku modyfikującego (GIL, TE) i jego stabilności koloidalnej,
- ilość i rodzaj dodatku powinna być zależna od strefy klimatycznej oraz usytuowania warstwy z udziałem lepiszcza modyfikowanego asfaltem naturalnym,
- istnieje możliwość zastąpienia twardych asfaltów drogowych ich odpowiednikami o mniejszej twardości modyfikowanych dodatkiem asfaltu naturalnego o poprawionych właściwościach użytkowych,
- możliwość opisu matematycznego zjawisk pełzania i nawrotu sprężystego oraz relaksacji naprężeń w oparciu o modele mechaniczne ośrodków lepkosprężystych.

Uwagi, pytania:

1. W pracy nie przedstawiono kierunków dalszych działań. Ta część powinna być uzupełniona i przedstawiona przez Autora podczas obrony pracy.

Bibliografia

Bibliografia wykorzystana w pracy jest obszerna i obejmuje 118 pozycji, wśród których można wyróżnić książki, monografie, publikacje w czasopismach naukowych, referaty konferencyjne, raporty z badań (103 pozycje) oraz normy polskie (11 pozycji) i amerykańskie (4 pozycje).

Uwagi, pytania:

1. Brak.

Układ rozprawy, język i redakcja pracy

Praca jest kompletna, jej układ jest czytelny, logiczny i prawidłowy.

Przy całościowej ocenie dysertacji mgr inż. Marcina Bilskiego należy mieć na uwadze, że jako inżynier budownictwa eksperymentował, wartościował oraz opisywał problematykę badawczą z pogłębionymi zagadnieniami fizyko-mechanicznymi. Na uwagę zasługuje bardzo rozbudowany program, zwłaszcza w zakresie teorii ciał lepko-plastyczno-sprężystych w odniesieniu do materiałów organicznych (w jednym przypadku również mieszanin z udziałem składników mineralnych). Pomimo tych utrudnień praca napisana została poprawnym językiem, chociaż pojawiają pojedyncze niedociągnięcia pod względem językowym bądź stylistycznym. Poniżej przedstawiam kilka przykładów:

1. Na str. 33, wers 17g Autor użył sformułowania: „polskie warunki klimatyczne" – bardziej poprawnym byłoby np. „warunki klimatyczne charakterystyczne dla obszaru Polski".
2. W pracy występują powtórzenia skrótów, np. PG (str. 53, 106, 113, 139), RTFOT (str. 21, 38), PAV (str. 21, 39) czy DDT (str. 23, 55).
3. Na str. 48 przy opisie rys. 5.11 użyto sformułowania: „kształt belki asfaltowej, która *doznała* ugięcia w efekcie obciążenia" – *doznania* odnoszą się raczej do odczuć, nie zachowań fizycznych.
4. Na str. 134 (tab. 7.13) użyto sformułowania „4-parometrowy" i „5-parometrowy".

Podsumowanie

Temat rozprawy i narzędzia zastosowane do realizacji jej celów są poprawne, opracowane na poziomie wiedzy współczesnej.

Wybór tematyki rozprawy został dokonany trafnie. W rozprawie podjęto ważny z punktu widzenia praktycznego problem dotyczący możliwości wykorzystania w technologii drogowej lepiszczy modyfikowanych asfaltami naturalnymi, stanowiących zamiennik twardych asfaltów. Stosowanie twardych lepiszczy do mieszanek mineralno-asfaltowych pozwala zapobiec powstawaniu w nawierzchni deformacji lepko-plastycznych. Z drugiej strony, ze względu na strefę klimatyczną w której jest Polska, w wielu przypadkach skutkuje to powstawaniem spękań niskotemperaturowych (a nawet zmęczeniowych), co jest wynikiem składu grupowego lepiszczy (typu reologicznego) oraz procesów starzeniowych przy produkcji MMA. Zastąpienie twardych asfaltów odpowiednio dobranymi lepiszczami o mniejszej twardości z dodatkiem asfaltu naturalnego pozwala wyeliminować negatywne skutki oddziaływań zewnętrznych w zakresie niskich temperatur (spękania) przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednich parametrów wytrzymałościowych w wysokich temperaturach latem.

Przyjęty w pracy program badawczy jest spójny, nacelowany na rozwiązanie problemu z zakresu doboru odpowiedniej ilości i rodzaju asfaltu naturalnego jako modyfikatora lepiszczy drogowych, co pozwala klasyfikować tego rodzaju wyroby ze względu na ich cechy użytkowe. Autor obok podstawowych oznaczeń normowych określił zmiany parametrów reologicznych w lepiszczach z udziałem asfaltu naturalnego i na ich podstawie dokonał klasyfikacji

funkcjonalnej asfaltów PG. Pozwala to dobrać odpowiedni rodzaj asfaltu do strefy klimatycznej obszaru Polski oraz usytuowania warstwy w nawierzchni.
Ważnym dokonaniem naukowym Autora jest opis matematyczny zjawisk pełzania i nawrotu oraz relaksacji naprężeń lepiszczy modyfikowanych dodatkiem asfaltu naturalnego w oparciu o modele mechaniczne Burgersa, Burgersa-Kelvina oraz uogólniony Maxwella. Może to stanowić podwalinę pod dalsze badania, tym razem już na mieszankach mineralno-asfaltowych z udziałem tego rodzaju lepiszczy. Znalezienie zależności pomiędzy parametrami reologicznymi lepiszcza i jego konglomeratu z udziałem kruszywa mineralnego stanowiłoby znaczący postęp w dziedzinie projektowania MMA i pozwoliłoby dobierać lepiszcze do poszczególnych warstw konstrukcji w zależności od wielkości oddziaływań zewnętrznych.
Niewielkie uchybienia pojawiające się w pracy w żaden sposób nie umniejszają osiągnięć Autora, szczególnie w części dotyczącej badań, ich analizy oraz wyciągniętych wniosków. Na szczególną pochwałę zasługuje szeroki i spójny program badawczy, analiza statystyczna wyników oraz przeprowadzony proces modelowania zjawisk reologicznych w oparciu o modele mechaniczne.

Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Bilskiego pt. „Właściwości reologiczne asfaltów drogowych modyfikowanych dodatkiem asfaltów naturalnych z uwzględnieniem wpływu starzenia" stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z dyscypliny budownictwo. Uwzględniając uwagi krytyczne należy stwierdzić, że Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej zaplanował i przeprowadził badania z zakresu lepiszczy asfaltowych (poszerzone o oznaczenia opracowane w ramach programu Superpave), które wsparł odpowiednim przygotowaniem merytorycznym. Ich zakres, poparty szczegółową analizą statystyczną oraz przeprowadzonym procesem modelowania zjawisk reologicznych lepiszczy, potwierdza przygotowanie autora do prowadzenia prac naukowo-badawczych i jego szeroką wiedzę z tego zakresu.
Autor udowodnił tezy postawione w rozdziale 3 pracy.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Marcina Bilskiego do publicznej obrony.