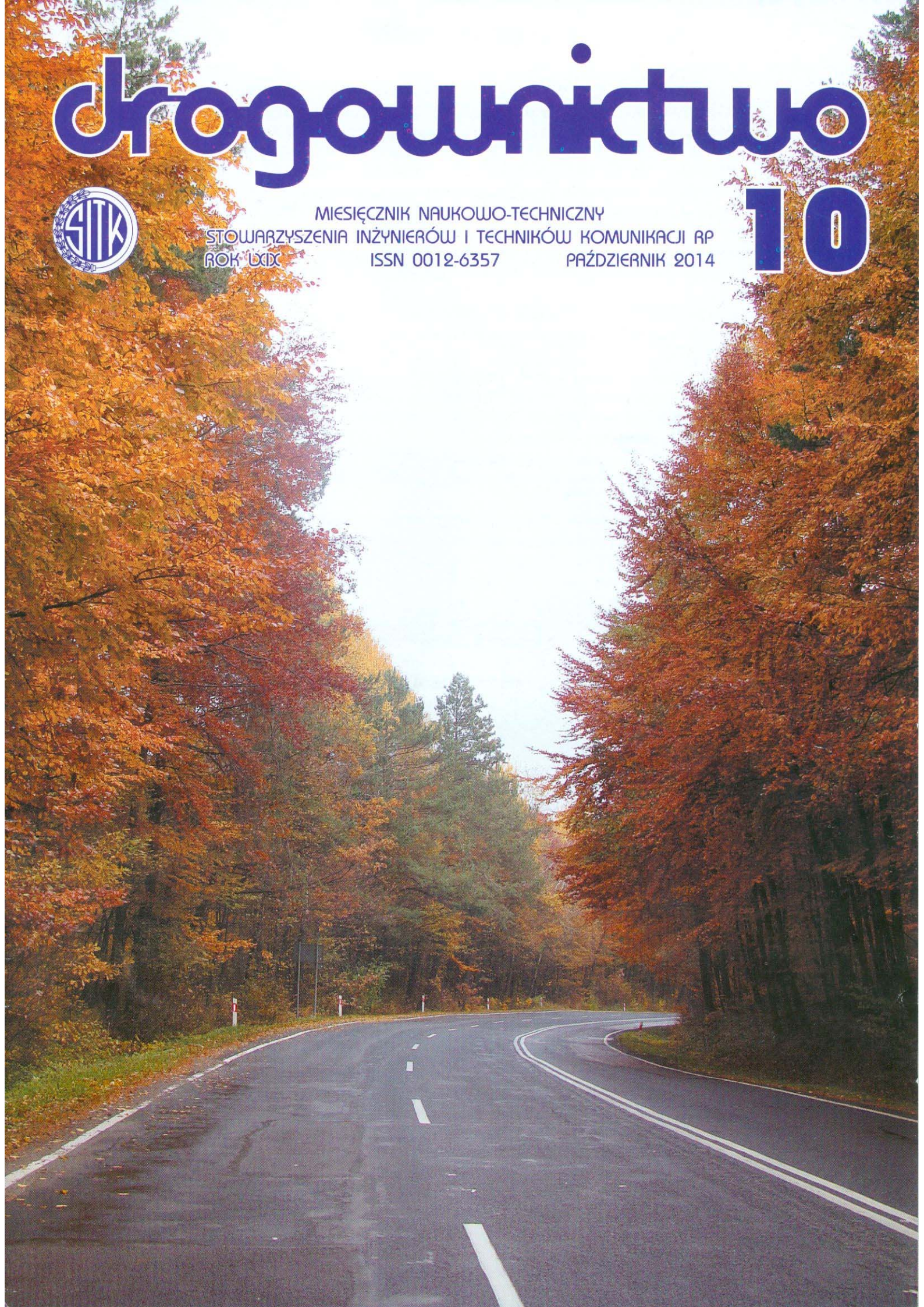


drogownictwo



MIĘSIĘCZNIK NAUKOWO-TECHNICZNY
STOWARZYSZENIA INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW KOMUNIKACJI RP
ROK LXXIX ISSN 0012-6357 PAŹDZIERNIK 2014

10



STRESZCZENIA

JÓZEF JUDYCKI: Badania niskotemperaturowego twardnienia fizycznego betonu asfaltowego i mieszanki SMA. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 10, 2014, s. 311–318

Artykuł przedstawia badania twardnienia fizycznego w czasie izotermicznego przechowywania betonu asfaltowego AC i mieszanki SMA w temperaturze -20°C . Stwierdzono wyraźny wzrost modułu sztywności i brak zmian wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w przypadku obu mieszanek. Proces twardnienia fizycznego różnił się dla AC i SMA.

Słowa kluczowe: twardnienie fizyczne, beton asfaltowy, mieszanka SMA, moduł sztywności, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, spękania niskotemperaturowe.

WŁADYSŁAW GARDZIEJCZYK, PAWEŁ GIERASIMIUK, MAREK MOTYLEWICZ: Hałasliwość nawierzchni betonowych – przykładowe wyniki badań. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 10, 2014, s. 319–326

W artykule zaprezentowano przykładowe wyniki badań hałasliwości nawierzchni betonowych i porównano je z wynikami badań na nawierzchniach asfaltowych. Badania przeprowadzono metodą SPB w ciągu dróg krajowych nr 8 i 50 w pięciu przekrojach z nawierzchnią z betonu cementowego oraz w trzech z nawierzchnią asfaltową. Analiza otrzymanych wyników wykazała, że nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem o grubej teksturze są porównywalne pod względem hałasliwości do nawierzchni asfaltowych typu SMA. Najwyższe wartości maksymalnych poziomów dźwięku spośród badanych nawierzchni otrzymano: w kategorii pojazdów osobowych – na nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze, natomiast w przypadku kategorii wielocznłonowych pojazdów ciężarowych – na nawierzchni betonowej teksturowanej tkaniną jutową. W czterech przekrojach badawczych dodatkowo wykonano pomiary równoważnego poziomu dźwięku. Otrzymane wyniki potwierdziły, że nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem o grubej teksturze jest porównywalna pod względem hałasliwości do nawierzchni asfaltowej typu SMA.

Słowa kluczowe: nawierzchnia betonowa, nawierzchnia asfaltowa, poziom dźwięku.

BOLESŁAW KŁOSIŃSKI, PRZEMYSŁAW KAMIŃSKI: O racjonalnych wymaganiach wobec betonów do fundamentów głębokich. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 10, 2014, s. 327–331

Mieszanka betonowa w palach lub ścianach szczelinowych jest układana pod zawieszoną bentonitową i nie jest zagęszczana. Powinna spełniać specjalne wymagania, wynikające z technologii, odmienne niż w innych konstrukcjach. Nie mogą być stosowane wymagania dotyczące tzw. betonów mostowych. Nowa wersja normy EN 206:2013 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” zawiera Załącznik D (normatywny) „Wymagania dodatkowe dotyczące specyfikacji i zgodności betonu do specjalnych robót geotechnicznych” regulujący właściwości betonów do robót fundamentowych. Są one w sprzeczności z Rozporządzeniem z 2000 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi i obiekty inżynierskie, które podaje nieracjonalne wymagania. Jest ono przestarzałe i wymaga aktualizacji.

Słowa kluczowe: mieszanka betonowa, betony „fundamentowe”, wymagania, norma EN 206:2013.

RADOSŁAW OLESZEK: Wpływ ukształtowania konstrukcji ukośnego wiaduktu zintegrowanego na fundamenty. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 10, 2014, s. 332–338

Specyfika zintegrowanych obiektów mostowych polega na zastosowaniu podatnych podpór, które odształcają się wraz z gruntem. Przedstawiono zagadnienia związane z analizą przykładowego wiaduktu zintegrowanego. Scharakteryzowano metodologię obliczeń ustrojów współpracujących z osrodkami gruntowymi i schematy obciążeń. Szczególną uwagę zwrócono na obciążenie parciem gruntu oraz zastosowane modele numeryczne konstrukcji i podłoża. Oceniono wpływ przyjętego przekroju poprzecznego wiaduktu drogowego usytuowanego w skosie na rozkład sił wewnętrznych w fundamentach. Przeanalizowano skutki oddziaływań termicznych, obciążeń stałych oraz ruchomych.

Słowa kluczowe: mosty zintegrowane, fundamenty mostowe, mosty w skosie.

PIOTR OLASZEK, LUCJAN JANAS, MAREK SALAMAK, ANDRZEJ MATYSEK: Badania porównawcze przyspieszeń i przemieszczeń konstrukcji mostowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 10, 2014, s. 339–343

Zbadano możliwość porównywania wyników pomiarów wykonywanych różnym sprzętem przez cztery laboratoria. Zaprezentowano metody pomiaru przemieszczeń zapewniające dużą zgodność wyników. Zwrócono uwagę na znaczenie filtracji przy pomiarach przyspieszeń. Wartości przyspieszeń bez informacji o zastosowanej filtracji lub o rejestrowanym widmie częstotliwości mają małą wartość porównawczą. Dotyczy to nie tylko porównywania wyników pomiarów, ale i porównywania ich z wynikami obliczeń.

Słowa kluczowe: konstrukcje mostowe, badania dynamiczne, pomiar przyspieszeń, pomiar przemieszczeń.

DAMIAN BĘBEN, WOJCIECH ANIGACZ: Most Lupu w Szanghaju – przykład nowoczesnego budownictwa mostowego. „Drogownictwo”, rok LXIX, nr 10, 2014, s. 344–3 s. okł.

Przedstawiono opis konstrukcji stalowego mostu łukowego w Szanghaju nad rzeką Huangpu. Jest to drugi pod względem rozpiętości przeszła stalowy most łukowy na świecie. Opisano sposób budowy oraz montaż łuku mostu i dźwigarów pomostu. Podano także sposób rozwiązywania posadowienia z uwagi na trudne warunki gruntowe.

Słowa kluczowe: Most Lupu, stalowy most łukowy, konstrukcja wsporcza, budowa.

ABSTRACTS

JÓZEF JUDYCKI: Investigations of low temperature physical hardening of asphalt concrete and stone mastic asphalt. „Drogownictwo”, vol. LXIX, No. 10, 2014, pp. 311–318

The paper presents investigations of physical hardening of asphalt concrete AC and stone mastic asphalt SMA during isothermal storage at temperature -20°C . The evident increase of stiffness modulus and lack of changes of indirect tensile strength were found for both mixes. The physical hardening process differed for AC and SMA.

Key words: physical hardening; asphalt concrete; stone mastic asphalt; stiffness modulus; indirect tensile strength; low-temperature cracking.

WŁADYSŁAW GARDZIEJCZYK, PAWEŁ GIERASIMIUK, MAREK MOTYLEWICZ: Noisiness of the cement concrete pavements – results of studies. „Drogownictwo”, vol. LXIX, No. 10, 2014, pp. 319–326

The article presents the results of studies on noisiness of the cement concrete pavements and them comparison with results from asphalt pavements. The research was carry out by SPB method on national roads No. 8 and 50 in the five section with the cement concrete pavement and in the three section with the asphalt pavement. The analysis of results show that in terms of noisiness the cement concrete pavements with the exposed aggregate surface and thick texture are comparable with the SMA asphalt pavements. In the category of passenger cars the highest values of the maximum sound level was obtained on cement concrete pavement with the exposed aggregate surface and very thick texture; in the category of heavy trucks – on cement concrete pavement texturing by burlap drag. In the four section equivalent noise level measures was done additionally. The received results confirmed that in terms of noisiness the cement concrete pavements with the exposed aggregate surface and thick texture are comparable with the SMA asphalt pavements.

Key words: cement concrete pavement, asphalt pavement, noise level.

BOLESŁAW KŁOSIŃSKI, PRZEMYSŁAW KAMIŃSKI: On rational requirements for concrete used in foundations. „Drogownictwo”, vol. LXIX, No. 10, 2014, pp. 327–331

Concrete mixes used for piles and diaphragm walls are cast in a bentonite slurry and are not compacted. It should fulfill special requirements, different then in other structures. The new standard EN 206:2013 includes an Annex D “Additional requirements for specification and conformity of concrete for special geotechnical works” It is in contradiction with the decree of Ministry of Transport of 2000, which needs to be updated.

Key words: concrete mix, „foundation” concrete, requirements, Standard EN 206:2013.

RADOSŁAW OLESZEK: The effect of shape structure of the skew integral flyover on the foundations. „Drogownictwo”, vol. LXIX, No. 10, 2014, pp. 332–338

The specificity of integral bridges consists of using flexible supports which deform together with soil. Selected issues related to the analysis of a sample integral viaduct were presented. Methodology of structure cooperating with the surrounding ground calculation and load schemes were characterized. Special attention was paid to the soil pressure and to the applied numerical models and substrate design. Influence of adopted cross-section of skew road viaduct on distribution of internal forces in foundations was discussed. Effects of thermal actions, permanent and live loads were analyzed.

Key words: integral bridges, bridge foundations, skew bridges.

PIOTR OLASZEK, LUCJAN JANAS, MAREK SALAMAK, ANDRZEJ MATYSEK: Comparative tests of bridge structures accelerations and deflections under proof dynamic load. „Drogownictwo”, vol. LXIX, No. 10, 2014, pp. 339–343

Comparison of measurement results possibility using different devices by four laboratories was tested. Measurement of displacement methods providing high results compatibility was presented. One paid attention on importance of filtering during acceleration measurements. Values of acceleration without information of used filtering or of frequency spectrum registered have small comparative value. It concerns not only measurement results comparison but also their comparison with theoretical results.

Key words: bridge structures, dynamic tests, acceleration measurement, displacement measurement.

DAMIAN BĘBEN, WOJCIECH ANIGACZ: Lupu Bridge in Shanghai – an example of modern bridge engineering. „Drogownictwo”, vol. LXIX, No. 10, 2014, pp. 344–3 p. cvr.

The paper presents a description of steel structure of arch bridge. over the Huangpu River in Shanghai. This bridge is the second longest span steel arch bridge in the world. Construction and assembly technology of arch and deck girders were described. Foundation concept considering difficult geotechnical conditions was also given.

Key words: Lupu bridge, steel arch bridge, supporting structure, construction.



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska
josef.judycki@willis.pg.
gda.pl

Badania niskotemperaturowego twardnienia fizycznego betonu asfaltowego i mieszanki SMA

Niskotemperaturowe twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych jest zjawiskiem polegającym na wzroście sztywności materiałów w czasie ich przechowywania w jednakowej temperaturze ujemnej, czyli w warunkach izotermicznych. Twardnienie fizyczne lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) jest procesem całkowicie odwracalnym; po podgrzaniu lepiszcza asfaltowego lub mieszanki mineralno-asfaltowej ich sztywność wraca do poprzedniego stanu, a po ponownym oziębieniu następuje kolejny wzrost sztywności i proces twardnienia fizycznego następuje z podobną prędkością jak poprzednio. Wzrost sztywności lepiszcza asfaltowego mierzony w reometrze *BBR* (*Bending Beam Rheometer*) po wielogodzinnym przechowywaniu w niskiej, ujemnej temperaturze, np.: -20°C , może być różny. Niektóre lepiszcza asfaltowe prawie nie wykazują wzrostu sztywności, a inne wykazują znaczny wzrost dochodzący do 80% a nawet 100% w stosunku do sztywności, którą mają te lepiszcza po 1 godzinie przechowywania w temperaturze -20°C . Opis twardnienia fizycznego asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych podał J. Judycki w artykule [7].

Z przeglądu literatury wynika, że występują różne czynniki, które mogą wpływać na intensywność twardnienia fizycznego asfaltów. I tak:

- wszyscy badacze zgadzają się co do tego, że skład chemiczny asfaltu ma wpływ na proces twardnienia fizycznego, ale dotychczas nie stwierdzono wyraźnych zależności;
- zawartość parafiny według wielu badaczy zwiększa proces twardnienia fizycznego, ale nie ma pełnej zgodności poglądów na ten temat a publikowane wyniki badań są rozbieżne;
- uznaje się, że źródło ropy naftowej, z jakiej wyprodukowano lepiszcze asfaltowe ma wpływ na ten proces;
- sposób produkcji lepiszcza asfaltowego w rafinerii ma bardzo duży wpływ na twardnienie fizyczne;
- niektórzy badacze podają, że bardziej podatne na starzenie fizyczne są lepiszcza asfaltowe poddawane w czasie produkcji w rafinerii bardzo ostrej oksydacji, a także asfalty drogowe modyfikowane niektórymi woskami parafinowymi;
- asfalty drogowe, do których w czasie produkcji w rafinerii dodawane są zużyte oleje silnikowe wykazują bardzo duże twardnienie fizyczne, a po wyprodukowaniu z nich mma i wbudowaniu w nawierzchnie bardzo zwiększają podatność nawierzchni na spękania niskotemperaturowe;
- asfalty drogowe po modyfikacji polimerami wykazują takie samo twardnienie fizyczne jak asfalty bazowe. Stwierdzono

jednak, że przy modyfikacji plastomerami podatność na twardnienie fizyczne jest nieznacznie większa niż przy modyfikacji elastomerami.

Kontrowersje wobec twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych

Twardnienie fizyczne lepiszczy asfaltowych jest uznanym, niekwestionowanym faktem. Wydaje się, że znaczny wzrost sztywności lepiszcza asfaltowego, rzędu 80%, spowodowany twardnieniem fizycznym w niskiej, ujemnej temperaturze, musi mieć wpływ na usztywnienie mieszanki mineralno-asfaltowej, wykonanej przy użyciu takiego lepiszcza. Zdania specjalistów na ten temat były jednak podzielone i występowanie twardnienia fizycznego w mieszankach mineralno-asfaltowych było kwestionowane przez niektórych badaczy. Dengre [2] stwierdził występowanie intensywnej relaksacji naprężeń w próbkach uformowanych z lepiszczy asfaltowych w warunkach prostego rozciągania w niskiej temperaturze. Wnioskował na tej podstawie, że efekt twardnienia fizycznego lepiszcza asfaltowego, jako składnika mma, może być całkowicie wyeliminowany poprzez relaksację naprężeń, która wystąpi w matrycy asfaltowej skrzepowanej przez otaczające ją ziarna kruszywa. Po tym założeniu doszedł do przekonania, że zjawisko twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych nie występuje i jest nieistotne praktycznie. Jego opinię podtrzymał Shenoy [11] na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych rozwoju naprężeń termicznych i ich relaksacji.

Inne są wyniki badań zespołu prof. Simona A.M. Hespera z Kanady, który wykazał, że proces twardnienia fizycznego lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresach niskiej, ujemnej temperatury ma istotny wpływ na wzrost spękań niskotemperaturowych nawierzchni asfaltowych. Zarówno Hesp i wsp. [4,5], jak i Zhao i Hesp [13] stwierdzili na odcinkach doświadczalnych w Kanadzie, że nawierzchnie drogowe z lepiszczem asfaltowym wykazującym wysoki poziom twardnienia fizycznego są bardziej podatne na spękania niskotemperaturowe. Badali oni zarówno spękania niskotemperaturowe 20 nawierzchni w Ontario w Kanadzie, eksploatowanych od 4 do 14 lat, jak i lepiszcza asfaltowe użyte do budowy tych nawierzchni. Stwierdzili, że metoda *SUPERPAVE*, podana w AASHTO M320, oparta na ocenie sztywności lepiszcza asfaltowego w reometrze *BBR* po 1 godzinie przechowywania próbek w temperaturze badania nie korelowała z liczbą spękań niskotemperaturowych

na drogach. Bardzo dobrą korelację uzyskano natomiast wtedy, gdy przed badaniem asfaltów w reometrze *BBR* poddano je twardnieniu fizycznemu przez okres 24 i 72 godzin w temperaturze badania równej $T_{\min} + 10^{\circ}\text{C}$ oraz w temperaturze: $T_{\min} + 20^{\circ}\text{C}$, w których: T_{\min} jest minimalną zimową temperaturą projektową w danym regionie, według *SUPERPAVE*. Opis tych korelacji i uzyskane zależności doświadczalne podał także J. Judycki w [7]. Na podstawie tych badań w prowincji Ontario w 2007 r. wprowadzono w Kanadzie normę LS-308 [9] na badania niskotemperaturowe lepiszczy asfaltowych. Według tej normy przed badaniem w reometrze *BBR* asfalty poddaje się twardnieniu fizycznemu i przechowuje się je przez 1, 24 i 72 godziny w temperaturze badania: $T_{\min} + 10^{\circ}\text{C}$ oraz $T_{\min} + 20^{\circ}\text{C}$. Następnie wykonuje się badanie w reometrze *BBR*, według amerykańskiej normy AASHTO M320. Miara podatności na twardnienie fizyczne jest wzrost modułu sztywności *S* i spadek współczynnika lepkości *m*, charakteryzującego potencjał relaksacyjny asfaltu, po 24 i 72 godzinach przechowywania w temperaturze badania w stosunku do modułu po 1 godzinie przechowywania.

Dotychczasowe badania laboratoryjne twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych

O ile liczba publikacji przedstawiających wyniki badań twardnienia fizycznego lepiszczy asfaltowych jest bardzo duża, to badania tego zjawiska w mieszankach mineralno-asfaltowych (mma) są dotychczas w całym świecie bardzo rzadkie. Pierwsze wyniki badań twardnienia fizycznego betonu asfaltowego opublikowali w 1999 r. Romero i wsp. [10]. Przeprowadzili oni badania w aparacie *TSRST* (*Thermal Stress Restrained Specimen Test*). Stwierdzili występowanie twardnienia fizycznego w przypadku jednej mieszanki i brak tego efektu w przypadku drugiej. Ich wyniki charakteryzowały się bardzo dużymi rozrzutami zarówno co do temperatury pęknięcia, jak i co do wielkości naprężeń niszczących. Lu i Isacson [8] w podobnych badaniach *TSRST* także nie stwierdzili wyraźnego efektu twardnienia fizycznego. Bahia i wsp. [1] przeprowadzili badania w nowo skonstruowanym aparacie *ATCA* (*Asphalt Thermal Cracking Analyzer*), który jest modyfikacją typowego aparatu *TSRST*. Ich badania potwierdziły występowanie twardnienia fizycznego betonu asfaltowego.

Badania zjawiska twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych prowadzono także na próbkach nieskrępowanych przy ściskaniu – rozciąganiu i zginaniu. Z bibliografii światowej znane są autorowi dwa takie badania. Soenen i wsp. [12] wykazali, że istnieje bardzo istotny wpływ twardnienia fizycznego na wzrost modułów sztywności betonu asfaltowego w badaniach próbek metodą jednoosiowego „ściskania-rozciągania”. Falchetto i Marasteanu [3] przeprowadzili zginanie małych próbek wyciętych z betonu asfaltowego (6,25 × 12,5 × 102,0 mm), tj. takich jak próbki lepiszczy asfaltowych używane w reometrze *BBR* wg AASHTO T313, i otrzymali duże rozrzuty; część próbek wykazywała wzrost sztywności przy izotermicznym przechowywaniu w niskiej temperaturze, a część nie.

Cel badań własnych

Można stwierdzić, że dotychczasowe badania twardnienia fizycznego mieszanek mineralno-asfaltowych na świecie są bardzo nieliczne. Niejednoznaczne wyniki tych badań przyczyniają się do istnienia kontrowersji wśród badaczy co do praktycznego znaczenia twardnienia fizycznego w mieszankach mineralno-asfaltowych i w nawierzchniach asfaltowych. Skłoniło to autora do przeprowadzenia badań własnych¹. Celem tych badań było określenie wpływu izotermicznego przechowywania mieszanek mineralno-asfaltowych w niskiej temperaturze na moduł sztywności i wytrzymałość na pośrednie rozciąganie dwóch typów mieszanek: betonu asfaltowego i mieszanek SMA. Sztywność i wytrzymałość na rozciąganie były mierzone po przechowywaniu próbek w temperaturze -20°C w różnych przedziałach czasu od 1 godziny do 16 dni. Temperatura -20°C została wybrana jako dość typowa niska temperatura zimowa w Polsce. Drugim celem badań było rozpoznanie wpływu typu mieszanki (beton asfaltowy i SMA) oraz wpływu zastosowanego lepiszcza asfaltowego (asfalt drogowy niemodyfikowany i asfalt drogowy modyfikowany elastomerem) na twardnienie fizyczne. Badania wpływu izotermicznego przechowywania na wytrzymałość mieszanek na rozciąganie nie były dotychczas przeprowadzane i niniejsze badania są nowością w tym względzie.

Badane materiały

Zbadano 6 mieszanek mineralno-asfaltowych, w tym 3 betony asfaltowe (AC) i 3 mieszanki SMA, różniące się zarówno uziarnieniem, jak i rodzajem zastosowanych asfaltów drogowych. Badane mieszanki były przeznaczone do warstw ścieralnych nawierzchni obciążonych ruchem ciężkim.

Aby uzyskać bardziej realistyczne wyniki badań, mieszanek nie produkowano w warunkach laboratoryjnych, ale pobrano je z 3 różnych wytwórni mma, w których wytwarzane były one przez 3 różnych producentów. Trzy mieszanki zawierały asfalty drogowe modyfikowane, a 3 asfalty drogowe niemodyfikowane. Dwa asfalty modyfikowane elastomerem styrenowo-butadienowo-styrenowym (SBS) pochodziły z rafinerii, a 1 był modyfikowany elastomerem styrenowo-butadienowym (SB) w otaczarce. Właściwości badanych asfaltów podano w tabeli 1, a mieszanek mineralno-asfaltowych w tabeli 2. Do mieszanek stosowano grysy i piaski łamane o różnym składzie petrograficznym oraz wypełniacz wapienny. Do mieszanek w otaczarkach dodawano środek adhezyjny w postaci amin tłuszczowych w ilości 0,4% w stosunku do masy lepiszcza asfaltowego. Do SMA dodawano środek stabilizujący w postaci włókien celulozowych w ilości 0,4% w stosunku do masy mma.

¹ Niniejszy artykuł opracowano w ramach badań własnych przeprowadzonych w Katedrze Inżynierii Drogowej Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Badania laboratoryjne wykonane zostały w ramach magisterskich prac dyplomowych przez mgr inż. Marka Mąkosa i mgr inż. Michała Rozwadowskiego.

Tabela 1. Właściwości lepiszczy asfaltowych zastosowanych w badanych mma

Właściwości lepiszcza asfaltowego	Oznaczenie lepiszczy asfaltowych oraz wyniki badań zastosowanych lepiszczy			
	35/50 niemodyfikowany	50/70 niemodyfikowany	50B modyfikowany SBS	80C wysokomodyfikowany SBS
Wyniki badań lepiszczy przed RTFOT				
	45	64	58	60
Temperatura mięknięcia, °C	54	48	58	75
Temperatura łamliwości wg Fraassa, °C	-13	-15	-14	-22
Zawartość parafiny, %	1,3	1,3	- ¹⁾	- ¹⁾
Lepkość w 60°C, Pa.s	671	294	- ¹⁾	- ¹⁾
Nawrót sprężysty, %	- ¹⁾	- ¹⁾	87	99
Wyniki badań lepiszczy po RTFOT				
Spadek penetracji, %	32	33	25	10
Wzrost temperatury mięknięcia, °C	6	6	3	1
Nawrót sprężysty, %	- ¹⁾	- ¹⁾	81	95

¹⁾ „-” Nie badano

Tabela 2. Właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Cechy	Oznaczenia betonu asfaltowego			Oznaczenie SMA			
	AC1	AC2	AC3	SMA1	SMA2	SMA3	
Dane ogólne:							
Oznaczenie otaczarki (WMA)	A	B	C	C	A	C	
Uziarnienie mieszanki mineralnej, mm	0/12,8	0/16	0/12,8	0/11	0/11	0/11	
Rodzaj lepiszcza asfaltowego	50/70 niemodyfikowany	35/50 niemodyfikowany	50/70 modyfikowany w wytwórni SB	80C modyfikowany w rafinerii SBS	35/50 niemodyfikowany	50B modyfikowany w rafinerii SBS	
Typ petrograficzny kruszywa grubego (≥ 2 mm)	granit	mieszanka bazaltu i granitu	granit	granit	granit	granit	
Typ petrograficzny kruszywa drobnego (0,075/2 mm)	mieszanka granitu i żwiru	granit	żwir	granit	granit	granit	
Skład mma:							
Zawartość lepiszcza asfaltowego, % m/m	5,5	5,2	5,7	6,5	6,1	6,3	
Zawartość kruszywa grubego > 2 mm, % m/m	61,0	68,4	61,6	77,5	78,1	77,5	
Zawartość kruszywa drobnego 0,074/2 mm, % m/m	31,0	24,0	31,0	11,6	11,3	11,6	
Zawartość wypełniacza < 0,074 mm, % m/m	8,0	7,6	7,4	10,9	10,6	10,9	
Zawartość mastyksu asfaltowego (asfalt + wypełniacz), % m/m	13,5	12,8	13,1	17,4	16,7	17,2	
Właściwości próbek przeznaczonych do badania twardnienia fizycznego							
Liczba badanych próbek, n	24	28	31	23	35	25	
Gęstość, g/cm ³	2.456	2.614	2.446	2.412	2.438	2.441	
Zawartość wolnych przestrzeni,	średnio %v/v	1,7	2,2	2,3	2,4	4,0	3,6
	odchyl. st. %v/v	0.20	0.19	0.18	0.23	0.23	0.22
	wsp. zm. %	11.9	9.0	7.8	9.6	5.9	6.1
Moduł sztywności w +20°C, t=0.12 s,	średnio. MPa	5914	7712	4291	2939	4065	3301
	odchyl stand. MPa	482	564	477	267	402	417
	wsp. zm. %	8.2	7.3	11.1	9.1	9.9	12.6

odchyl. stand. – odchylenie standardowe; wsp. zm. – współczynnik zmienności

Przygotowanie próbek

Z luźnej i rozgrzanej mieszanki dowiezianej z otaczarki (WMA) formowano próbki o średnicy 100 mm i wysokości 63 mm. Próbkę zagęszczano w zagęszczarce żyratorowej, ponieważ daje ona bardziej jednorodne zagęszczenie i bardziej realistyczne ułożenie ziaren niż metoda Marshalla. Przewidywano, że wolne przestrzenie mogą mieć wpływ na proces twardnienia fizycznego i odrzucano próbki różniące się od wartości średniej w danej grupie o więcej niż 0,5% v/v. Oczekiwano również, że początkowa sztywność próbek może mieć wpływ na badany proces twardnienia fizycznego i może on przebiegać inaczej w sztywniejszych i mniej sztywnych próbkach. Przed właściwym badaniem twardnienia fizycznego określono więc sztywność wszystkich próbek w aparacie NAT w temperaturze +20°C, w czasie obciążenia 0,12 s przy cyklu 3 s i przy ciśnieniu pionowym 220 kPa. Aby wyeliminować możliwy wpływ sztywności próbki, pogrupowano je w taki sposób, aby w każdej badanej serii

jednorodnej były równomiernie rozłożone próbki o większych i mniejszych wartościach sztywności początkowej. Opis szczegółowy podziału próbek podano w [6].

Procedura badania twardnienia fizycznego

Próbki wkładano do komory chłodniczej o ustalonej temperaturze równej -20°C . Zainstalowano trzy sensory temperatury:

1. w otworze wywierconym w próbce kontrolnej,
2. przymocowany do powierzchni próbki kontrolnej,
3. ułożony swobodnie w komorze.

Moment, w którym temperatura we wnętrzu próbki kontrolnej osiągała -20°C traktowano jako początek izotermicznego przechowywania próbek. Próbki badano po 1, 3, 24, 72 i 384 godzinach (16 dniach) przechowywania w temperaturze -20°C . Temperatura we wnętrzu próbki utrzymywana była z dokładnością do około $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ze sporadycznymi odchyleniami do $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Po danym okresie przechowywania próbkę wyjmowano z komory chłodniczej i przenoszono do aparatu *Nottingham Asphalt Tester (NAT)*, w którym oznaczano moduł sztywności przy czasie obciążenia 0,12 s i cyklu 3 s oraz stałym ciśnieniu pionowym równym 460 kPa – przy próbkach z betonu asfaltowego (AC) i równym 440 kPa – przy próbkach z mieszanek SMA. Moduł każdej próbki był oznaczany w dwóch prostopadłych płaszczyznach, a wynik uśredniany. Współczynnik Poissona przyjęto jako $\nu = 0,15$. Temperatura w komorze termicznej aparatu NAT była ustalona i równa -20°C . Test prowadzono szybko i sprawnie, aby nie dopuścić do podwyższenia temperatury próbek przechowywanych w komorze chłodniczej oraz badanych w aparacie NAT. Proces ten kontrolowano przy użyciu sensorów temperatury. Trzeba zaznaczyć, że test jest bardzo trudny, nieznormalizowany i trzeba dużej wprawy, aby go sprawnie przeprowadzić. Mały błąd w procedurze i wzrost temperatury może zniweczyć objawy twardnienia fizycznego.

Po badaniu modułu sztywności próbkę przenoszono do drugiej komory chłodniczej o ustalonej temperaturze równej -20°C i następnie poddawano badaniu na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Test prowadzono z prędkością przesuwania się tłoka prasy 20 mm/min.

Rozrzuty wyników pomiarów

W serii jednorodnej, dla każdej mieszanki i w każdym czasie izotermicznego przechowywania, badano po 4 próbki jednorodne z wyjątkiem mieszanki SMA 3, dla której badano po 5 próbek w serii jednorodnej. Jako miarę rozrzutów wyników pomiarów ze względu na relatywnie małą liczbę próbek, przyjęto względny rozstęp wyników, który w niniejszym artykule zdefiniowano wzorem:

$$RW = \max\left(\frac{|X_{sred} - X_{max}|}{X_{sred}}, \frac{|X_{sred} - X_{min}|}{X_{sred}}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

w którym:

RW – względny rozstęp wyników w %,

X_{sred} – wartość średnia,

X_{max}, X_{min} – wartość największa i najmniejsza w serii jednorodnej.

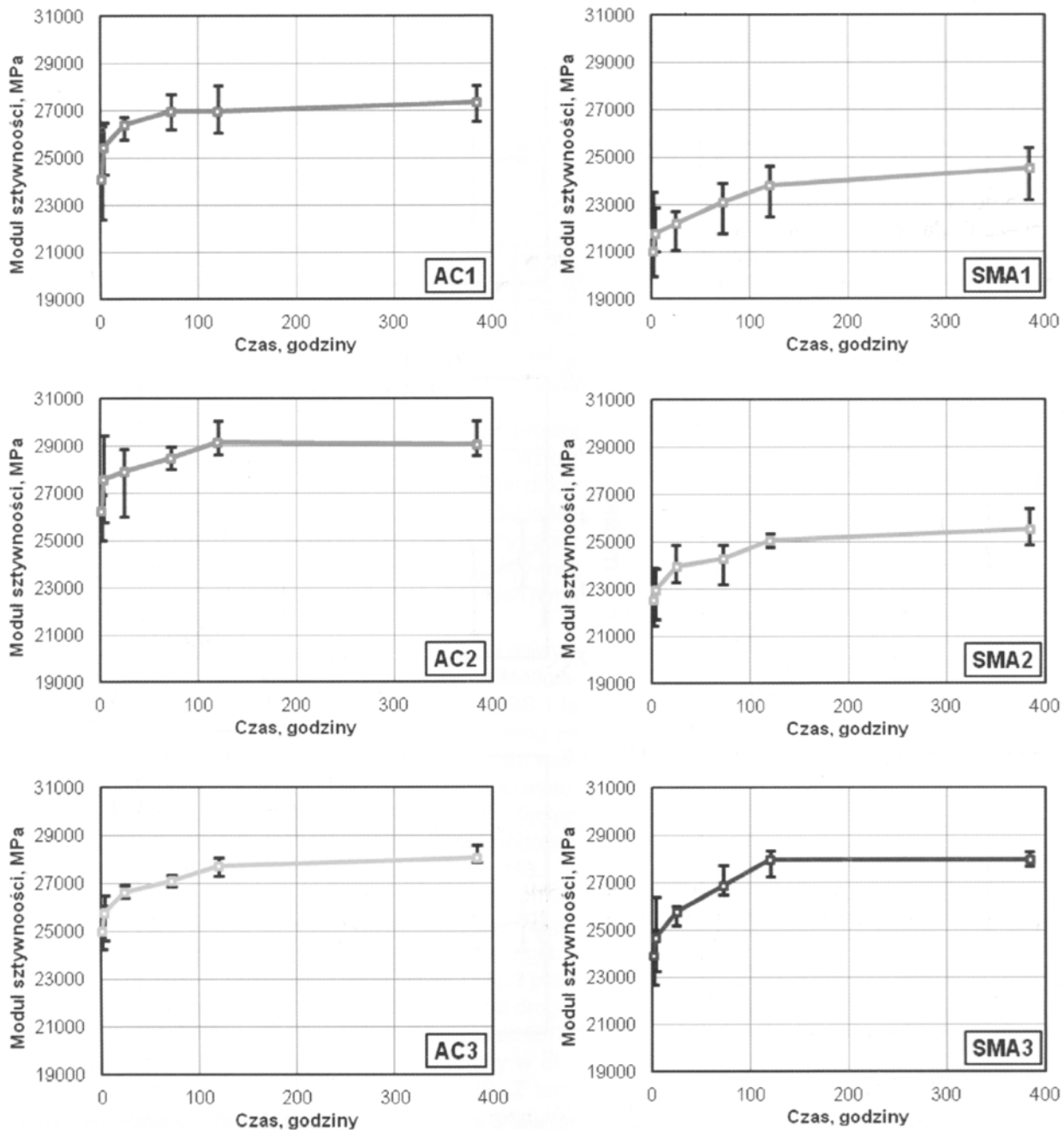
W przypadku badania modułów sztywności rozrzuty wyników pomiarów były bardzo małe. Średnia wartość względnego rozstępu wyników wynosiła 4,2%, a 90% wartość rozstępu wyników wynosiła 6,6%. W przypadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie rozrzuty wyników były większe, co jest sprawą normalnie występującą w tego typu badaniach; średnia wartość względnego rozstępu wyników wynosiła 14,0%, a 90% wartość rozstępu wyników wynosiła 21,1%.

Wpływ izotermicznego przechowywania próbek w temperaturze -20°C na moduł sztywności

Rysunek 1 przedstawia wyniki badań modułów sztywności przeprowadzone w temperaturze $T = -20^{\circ}\text{C}$ po przechowywaniu próbek w warunkach izotermicznych ($T = -20^{\circ}\text{C}$). Jak widać z rysunku 1, w przypadku wszystkich badanych mieszanek, zarówno AC jak i SMA, moduł sztywności wzrastał wraz ze wzrostem czasu przechowywania w izotermicznych warunkach w temperaturze -20°C . Wzrost ten był bardzo wyraźny. Potwierdza to wystąpienie efektu niskotemperaturowego twardnienia fizycznego. W przypadku wszystkich badanych mieszanek wzrost sztywności był bardzo intensywny w czasie pierwszych godzin przechowywania w warunkach izotermicznych od 1 do 24 godzin, a następnie proces twardnienia fizycznego wyraźnie spowalniał. Od 120 do 384 godzin (od 5 do 16 dni) proces twardnienia fizycznego był dużo mniejszy lub nawet całkowicie zanikał, np. w próbkach z AC2 i SMA3. Na podstawie otrzymanych wyników można uznać, że badania potwierdziły w pełni występowanie zjawiska twardnienia fizycznego zarówno mieszanek typu AC, jak i SMA. Stwierdzono wzrost sztywności po 384 godzinach izotermicznego przechowywania o 11% do 17%, w zależności od mieszanki, w stosunku do sztywności po godzinnym przechowywaniu w temperaturze -20°C . Z rysunku 1 wynika, że moduł mieszanek AC w $T = -20^{\circ}\text{C}$ jest zawsze większy niż SMA.

Wpływ przechowywania w temperaturze -20°C na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie

Rysunek 2 przedstawia wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przeprowadzone w temperaturze $T = -20^{\circ}\text{C}$ po przechowywaniu próbek w warunkach izotermicznych (w $T = -20^{\circ}\text{C}$). Jak widać z rysunku 2 w przypadku wszystkich badanych mieszanek, zarówno AC, jak i SMA, nie stwierdzono jednoznacznych zależności wytrzymałości od czasu przechowywania w izotermicznych warunkach w temperaturze -20°C . Można zauważyć, że rozrzuty wyników badań są większe niż zmiany wartości wytrzymałości wynikające z czasu przechowywania próbek. Z tego wynika, że w przeprowadzonych badaniach nie stwierdzono wpływu procesu twardnienia fizycznego na wytrzymałość na rozciąganie pośrednie. Z rysunku 2 wynika również, że wytrzymałość mieszanek SMA jest wyraźnie mniejsza od AC.



Rys. 1. Wyniki badań modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych w temperaturze -20°C w zależności od czasu izotermicznego przechowywania (w $T=-20^{\circ}\text{C}$); słupki na rysunkach pokazują rozstęp wyników badań

Wskaźniki twardnienia fizycznego

Autor tego artykułu w publikacji [6] zaproponował dwa wskaźniki twardnienia fizycznego, które zostaną poniżej kolejno omówione.

Wskaźnik wzrostu sztywności SGR

Pierwszym wskaźnikiem zaproponowanym przez autora w publikacji [6] jest wskaźnik wzrostu sztywności, oznaczony symbolem SGR (*Stiffness Growth Ratio*). Związek modułu sztywności z czasem przechowywania izotermicznego w skali półlogarytmicznej, pokazany na rysunku 3, jest w przybli-

żeniu liniowy w układzie współrzędnych $S(\log t)$ i może być wyrażony zależnością:

$$S(t) = S(1) + SGR \cdot \log t \quad (2)$$

w której:

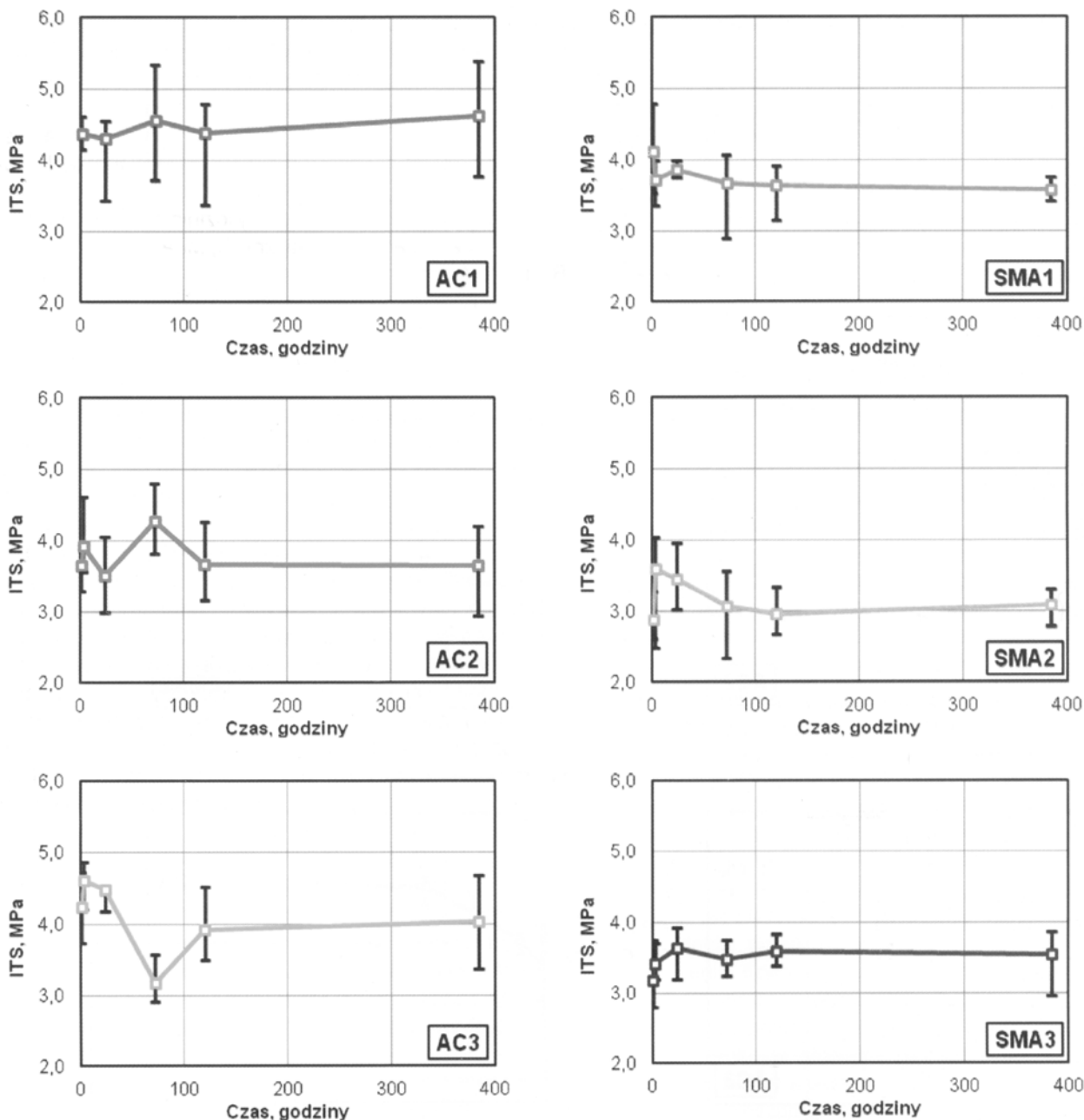
$S(t)$ – moduł sztywności przy czasie izotermicznego przechowywania t ,

t – czas przechowywania w godzinach,

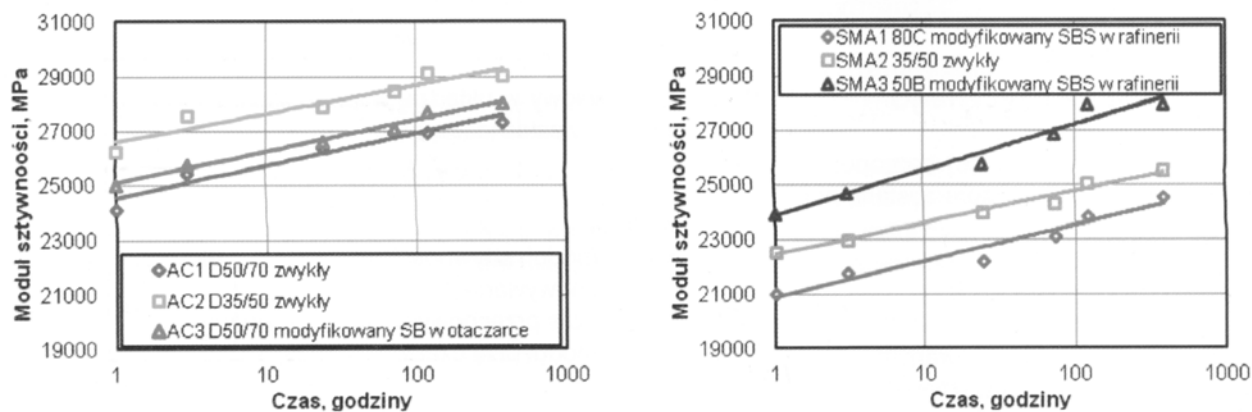
$S(1)$ – moduł przy czasie przechowywania $t = 1$ godz.,

$$SGR = \frac{d(S)}{d(\log t)}$$

SGR – wskaźnik wzrostu sztywności.



Rys. 2. Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanek mineralno-asfaltowych w temperaturze -20°C w zależności od czasu izotermicznego przechowywania (w $T = -20^{\circ}\text{C}$); słupki na rysunkach pokazują rozstęp wyników badań



Rys. 3. Zależność modułu sztywności S zmierzonego w temperaturze -20°C w funkcji czasu przechowywania próbek w temperaturze $T = -20^{\circ}\text{C}$ (w skali logarytmicznej)

Tabela 3. Wskaźnik wzrostu sztywności SGR w temperaturze $T = -20^{\circ}\text{C}$

Mieszanka	Rodzaj asfaltu drogowego	$S(1)$ (MPa)	$SGR = \frac{d(S)}{d(\log t)}$	R^2
AC1	50/70 niemodyfikowany	24527	1193	0,94
AC2	35/50 niemodyfikowany	26601	1044	0,90
AC3	50/70 modyfikowany SB w otaczarce (WMA)	25079	1172	0,99
SMA1	80C modyfikowany SBS w rafinerii	20915	1301	0,95
SMA2	35/50 niemodyfikowany	22443	1159	0,98
SMA3	50B modyfikowany SBS w rafinerii	23839	1685	0,97

Wskaźnik wzrostu sztywności jest nachyleniem prostej w układzie współrzędnych $S(\log t)$ i reprezentuje wzrost sztywności S w MPa, który występuje w każdej kolejnej dekadzie czasu izotermicznego przechowywania. W każdej kolejnej dekadzie czasu 1-10 h, 10-100 h, 100-1000 h sztywność S wzrasta o wartość SGR , która jest więc miarą intensywności twardnienia fizycznego. Jego wartości dla badanych mma przedstawia tabela 3.

Jak wynika z tabeli 3, wskaźnik wzrostu sztywności najwyższą wartość $SGR = 1685$ przyjmuje dla mieszanki SMA3 zawierającej asfalt 50B modyfikowany elastomerem SBS i ta mieszanka uległa największemu twardnieniu fizycznemu ze wszystkich badanych. Drugą mieszanką pod względem wielkości twardnienia fizycznego jest SMA1 z asfaltem 80C wysokomodyfikowanym SBS w rafinerii ($SGR = 1301$). Tempo twardnienia fizycznego pozostałych mieszanek było podobne i wskaźnik SGR mieścił się w przedziale od 1044 do 1193.

Warto zwrócić uwagę na mieszanki AC1 i AC3, które mają prawie identyczne tempo procesu twardnienia fizycznego ($SGR = 1193$ i $SGR = 1172$) i prawie identyczne moduły sztywności S . Na rys. 3 zależności $S(\log t)$ dla AC1 i AC3 praktycznie się pokrywają. Beton asfaltowy AC1 zawierał drogowy asfalt niemodyfikowany 50/70, a AC2 taki sam asfalt 50/70 pochodzący z tej samej rafinerii, ale modyfikowany w otaczarce elastomerem styrenowo-butadienowym SB. Z tego wynika, że modyfikacja nie zmieniła istotnie ani modułów sztywności S , ani tempa twardnienia fizycznego betonu asfaltowego. Z tabeli 2 wynika, że betony asfaltowe AC1 i AC3 były produkowane w dwóch różnych wytwórniach, przez dwóch wykonawców, ale nie różniły się istotnie pod względem uziarnienia i zawartości asfaltu. Najważniejszą różnicą pomiędzy AC1 i AC3 była modyfikacja asfaltu elastomerem SB w wytwórni, w przypadku AC3. Można z tego wnioskować, że tempo twardnienia fizycznego zależy głównie od asfaltu bazowego użytego do modyfikacji.

Wskaźnik twardnienia fizycznego PHR

Drugim wskaźnikiem zaproponowanym przez autora tego artykułu w publikacji [6] jest wskaźnik twardnienia fizycznego, oznaczony symbolem PHR (*Physical Hardening Ratio*), który zdefiniowany został w następujący sposób:

$$PHR(t) = \frac{S(t)}{S(1)} \quad (3)$$

w którym:

$PHR(t)$ – wskaźnik twardnienia fizycznego w funkcji czasu przechowywania izotermicznego,

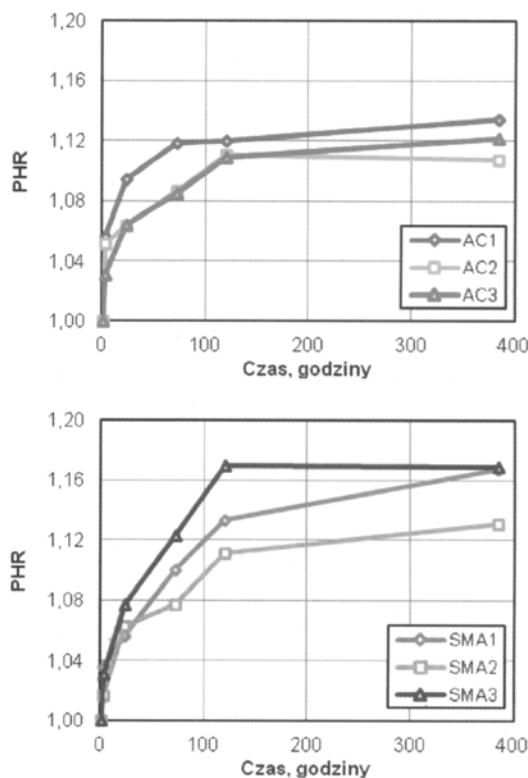
t – czas izotermicznego przechowywania w godzinach,
 $S(t)$ – moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej po t godzinach przechowywania w warunkach izotermicznych, MPa,

$S(1)$ – moduł sztywności po 1 godzinie przechowywania w warunkach izotermicznych, MPa.

Rysunek 4 przedstawia wskaźnik PHR wszystkich badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Największy ze wszystkich badanych wskaźnik twardnienia fizycznego $PHR = 1,17$ osiągnęły po 16 dniach izotermicznego chłodzenia w -20°C dwie mieszanki SMA1 i SMA3 zawierające odpowiednio asfalty 80C i 50B modyfikowane elastomerem SBS w rafinerii. Najmniejszy wskaźnik $PHR = 1,108$ osiągnął beton asfaltowy AC2 zawierający drogowy asfalt niemodyfikowany 35/50. Pozostałe 3 mieszanki AC1 (z asfaltem 50/70), AC3 (50/70 modyfikowany SB w otaczarce) i SMA2 (35/50) miały podobny wskaźnik PHR po 16 dniach przechowywania w $T = -20^{\circ}\text{C}$ w przedziale od $PHR = 1,122$ do $PHR = 1,134$. Wiadomo z innych badań [8,12], że proces twardnienia fizycznego zależy od asfaltu bazowego, a nie od dodatku elastomeru. Uzyskany wynik sugeruje więc, że asfalty bazowe użyte w rafinerii do modyfikacji elastomerem SBS miały większą podatność na twardnienie fizyczne od drogowych asfaltów niemodyfikowanych 35/50 i 50/70.

W pracy J. Judyckiego [6] wykazano, że zależność PHR od czasu izotermicznego przechowywania może być dobrze opisana następującą zależnością:

$$PHR = 1 + a_1 \cdot \log t + a_2 \cdot (\log[(t)])^2 \quad (4)$$



Rys. 4. Wskaźniki twardnienia fizycznego PHR w funkcji czasu izotermicznego przechowywania w temperaturze $T = -20^{\circ}\text{C}$

w której:

a_1, a_2 – współczynniki doświadczalne, przy czym $a_1 \geq 0$,
 t – czas przechowywania izotermicznego w godzinach, $t \geq 1$ h.

Współczynniki doświadczalne a_1 i a_2 oraz współczynniki regresji R^2 dla wszystkich badanych mieszanek podano w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry zależności $PHR(t)$

Parametry	AC1	AC2	AC3	SMA1	SMA2	SMA3
a_1	0,0981	0,0721	0,0522	0,0336	0,0352	0,0649
a_2	-0,0185	-0,0117	-0,0018	0,0123	0,0064	0,0022
R^2	0,980	0,911	0,985	0,970	0,983	0,957

Różnice w przebiegu twardnienia fizycznego AC i SMA

Różnice w przebiegu twardnienia fizycznego AC i SMA widoczne są wyraźnie na rysunkach 1, 3 i 4. Proces twardnienia fizycznego mieszanek AC i SMA przebiega inaczej. Jak widać z rys. 4, w przypadku AC w pierwszych godzinach izotermicznego przechowywania w $T = -20^\circ\text{C}$ następuje gwałtowny wzrost sztywności, a potem proces przebiega wolniej. W przypadku SMA wzrost sztywności w pierwszych godzinach izotermicznego przechowywania jest wolniejszy niż w przypadku betonu asfaltowego AC, a potem proces twardnienia SMA przebiega szybciej niż AC. W przypadku AC 60% wartości całkowitego twardnienia wystąpiło po 10–40 godzinach w zależności od mieszanki, a w przypadku SMA po 40–70 godzinach.

Wnioski

1. Badania laboratoryjne jednoznacznie wykazały proces twardnienia fizycznego w temperaturze -20°C przejawiający się wzrostem sztywności zarówno badanych betonów asfaltowych AC, jak i mieszanek SMA w czasie izotermicznego przechowywania. Największy zarejestrowany wzrost sztywności badanych próbek mma po 120 godzinach izotermicznego przechowywania w temperaturze -20°C wyniósł, w różnych mieszankach, od 11% do 17%.
2. Zastosowano dwie miary twardnienia fizycznego: wskaźnik wzrostu sztywności SGR i wskaźnik twardnienia fizycznego PHR , w celu określenia wrażliwości różnych mieszanek na twardnienie fizyczne.
3. Nie stwierdzono zmian wytrzymałości mieszanek na pośrednie rozciąganie po izotermicznym przechowywaniu mieszanek AC i SMA w temperaturze -20°C aż do 16 dni.
4. Stwierdzono, że proces fizycznego twardnienia betonu asfaltowego AC i mieszanek SMA przebiega inaczej. W pierwszych godzinach izotermicznego przechowywania w temperaturze $T = -20^\circ\text{C}$ beton asfaltowy szybciej zwiększa swoją sztywność niż SMA. Jednakże przy wydłużonym czasie przechowywania szybkość wzrostu sztywności jest większe w SMA.
5. Zarówno sztywność, jak i wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w $T = -20^\circ\text{C}$ są większe w przypadku mieszanek AC w porównaniu z SMA.

6. Odnotowano różnice w twardnieniu fizycznym różnych mieszanek AC i SMA w zależności od ich składu, a zwłaszcza od typu mieszanki i od rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego. Zakres badań był za mały, aby wyciągać konkretne wnioski w tym względzie. Zagadnienie to wymaga dalszych badań.
7. Dodatek elastomeru styrenowo-butadienowego SB do mieszalnika otaczarki nie zmienił twardnienia fizycznego mieszanki AC w porównaniu z podobną mieszanką AC, ale zawierającą niemodyfikowany asfalt drogowy. Mieszanka AC z asfaltem modyfikowanym zachowywała się tak samo jak mieszanka AC z asfaltem bazowym niemodyfikowanym.
8. Mieszanki z drogowymi asfaltami modyfikowanymi w rafinerii elastomerem SBS miały większe twardnienie fizyczne od mieszanek z drogowymi asfaltami niemodyfikowanymi. Świadczyć to może o większej podatności na twardnienie asfaltów bazowych użytych w rafinerii do modyfikacji.

Bibliografia

- [1] H.U. Bahia, H. Tabatabaee, R. Valasquez, *Importance of Bitumen Physical Hardening for Thermal Stresses Buildup and Relaxation in Asphalt*, 5th Euroasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul, 13-15 June, 2012
- [2] R. Dengre, *Effect of Physical Hardening on Stress Relaxation Behaviour of Asphalt Pavements*, Proceedings of Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000, str. 220 – 227
- [3] A.C. Falchetto, M.O. Marasteanu, *Physical Hardening: from Binders to Mixtures*, International Journal of Roads and Airports, vol. 1, No.1, 2011, str. 18-34
- [4] S.A.M Hesp, A. Soleimani, S. Subramani, T. Philips, D. Smith, P. Marks, *Asphalt pavement cracking: analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario*, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10, No. 3, June 2009, str. 209–227
- [5] S.A.M. Hesp, S.N. Genin, D. Scafe, H.F. Shurvell, S. Subramani, *Five Years Performance Review of a Northern Ontario Pavement Trial: Validation of Ontario's Double-Edge-Notched Tension (DENT) and Extended Bending Beam Rheometer (BBR) Test Methods*, Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 54. 2009, str. 99-126
- [6] J. Judycki, *Influence of Low-Temperature Physical hardening on Stiffness and Tensile Strength of Asphalt Concrete and Stone Mastic Asphalt*, Construction and Building Materials, 61(2014), str. 191-199
- [7] J. Judycki, *Twardnienie fizyczne asfaltów I mieszanek mineralno-asfaltowych oraz jego wpływ na spękania niskotemperaturowe*, Drogownictwo Nr 12/2013, str. 1 – 6
- [8] X. Lu, U. Isacson, *Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens*, Construction and Building Materials No. 14, 2000, str. 79-88
- [9] Ministry of Transportation. Ontario, *Test method LS-308; Method of test for determination of performance grade of physically aged asphalt cement using extended bending beam rheometer (BBR) method*, Revision No. 26, 1st May 2011
- [10] P. Romero, J. Youtcheff, K. Stuart, *Low-temperature Physical Hardening of Hot-Mix Asphalt*, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board No. 1661, 1999, str. 22–26
- [11] A. Shenoy, *Stress Relaxation can Perturb and Prevent Physical Hardening in a Constrained Binder at Low Temperatures*, Road Materials and Pavement Design Vol. 3, No. 1/2002, str. 87-94
- [12] H. Soenen, J. Ekblad, X. Lu, P. Redelius, *Isothermal Hardening in Bitumen and in Asphalt Mixes*, Proceedings of the 3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Vienna, May, 2004, vol. 2, str. 1364-1375
- [13] M.O. Zhao, S.A.M. Hesp, *Performance Grading of the Lamont Alberta C-SHRP Pavement Trial Binders*, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 7. No. 3, September 2006, str. 199–211