



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska  
jozef.judycki@wilis.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.:  $-20^{\circ}\text{C}$ , 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  $-20^{\circ}\text{C}$ . 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 skrępowanej 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 lepiszczycy 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 lepiszczycy 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 Isacsson [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 ( $6,25 \times 12,5 \times 102,0$  mm), tj. takich jak próbki lepiszczycy 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 własnych<sup>1</sup>. 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  $-20^{\circ}\text{C}$  w różnych przedziałach czasu od 1 godziny do 16 dni. Temperatura  $-20^{\circ}\text{C}$  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 ściernych 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.

<sup>1</sup> 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
<b>Wyniki badań lepiszczy przed RTFOT</b>				
	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	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Lepkość w 60°C, Pa.s	671	294	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Nawrót sprężysty, %	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	87	99
<b>Wyniki badań lepiszczy po RTFOT</b>				
Spadek penetracji, %	32	33	25	10
Wzrost temperatury mięknięcia, °C	6	6	3	1
Nawrót sprężysty, %	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	81	95

<sup>1)</sup> „-” Nie badano

Tabela 2. Właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Cechy	Oznaczenia betonu asfaltowego			Oznaczenie SMA			
	AC1	AC2	AC3	SMA1	SMA2	SMA3	
<b>Dane ogólne:</b>							
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	
<b>Skład mma:</b>							
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	
<b>Właściwości próbek przeznaczonych do badania twardnienia fizycznego</b>							
Liczba badanych próbek, n	24	28	31	23	35	25	
Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	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. Próbki 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  $-20^{\circ}\text{C}$ . 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  $-20^{\circ}\text{C}$  traktowano jako początek izotermicznego przechowywania próbek. Próbki badano po 1, 3, 24, 72 i 384 godzinach (16 dniach) przechowywania w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . 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  $-20^{\circ}\text{C}$ . 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  $-20^{\circ}\text{C}$  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.

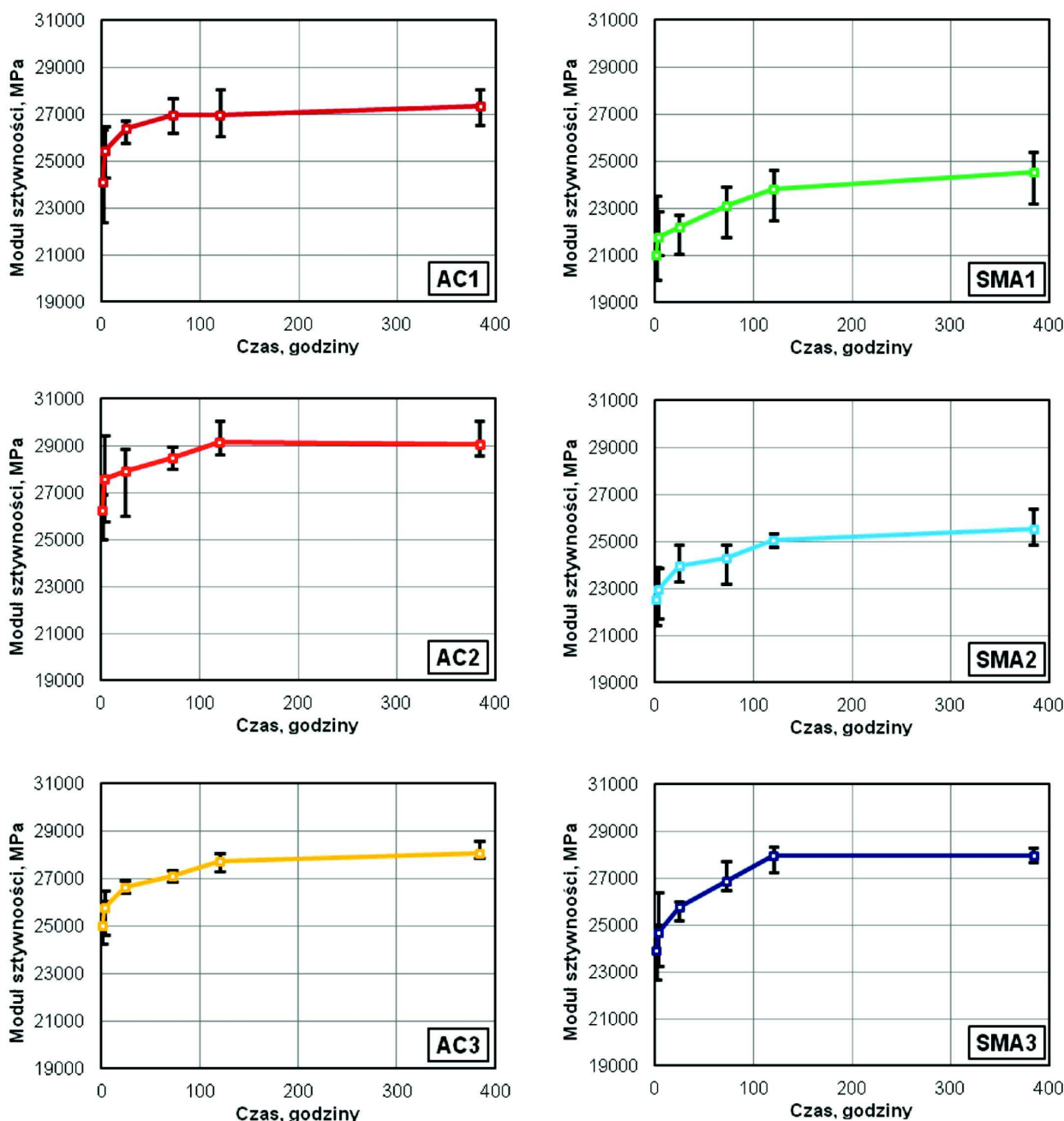
W przypadku badania modułów sztywności rozrzuty wyników pomiarów były bardzo małe. Średnia wartość względnego rozstępu wyników wynosiła 4,2%, a 90% wartość rozstępu wyników wynosiła 6,6%. W przypadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie rozrzuty wyników były większe, co jest sprawą normalnie występującą 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 $-20^{\circ}\text{C}$ 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  $-20^{\circ}\text{C}$ . 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 godzinowym przechowywaniu w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . Z rysunku 1 wynika, że moduł mieszanek AC w  $T = -20^{\circ}\text{C}$  jest zawsze większy niż SMA.

## Wpływ przechowywania w temperaturze $-20^{\circ}\text{C}$ 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 ( $T = -20^{\circ}\text{C}$ ). 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  $-20^{\circ}\text{C}$ . 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  $-20^{\circ}\text{C}$  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:

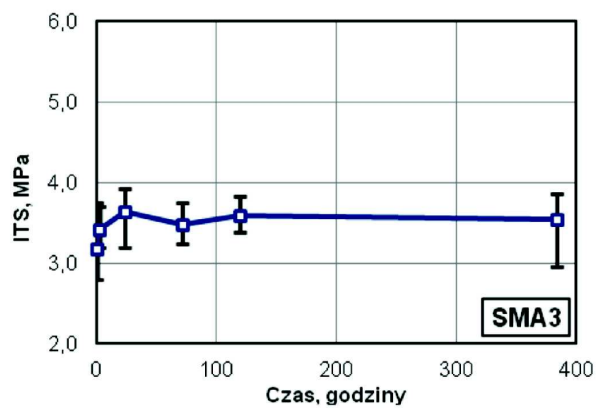
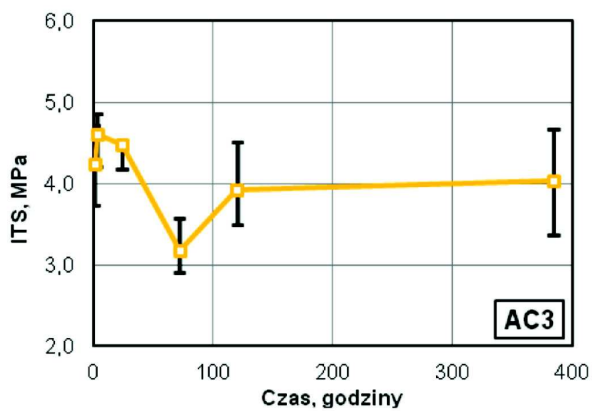
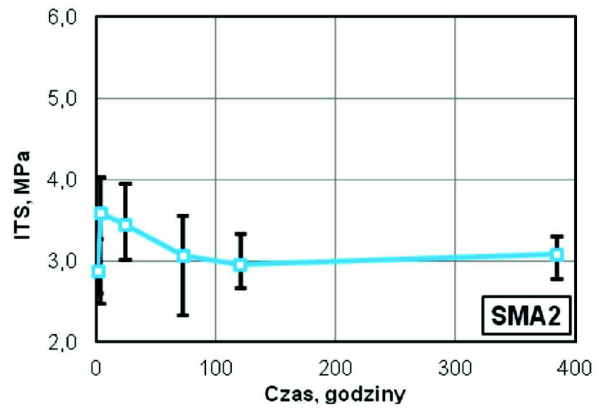
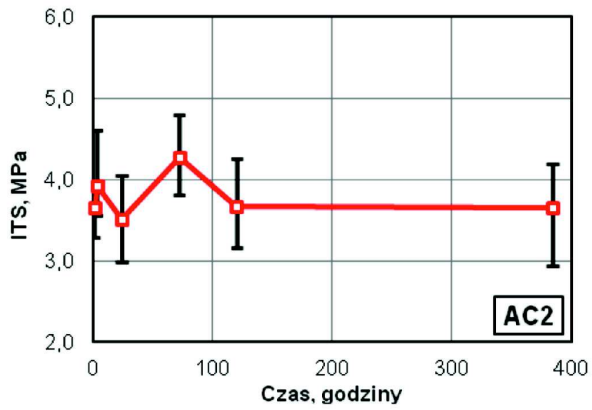
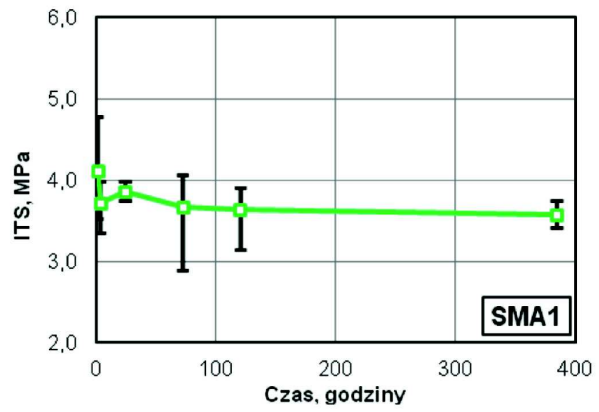
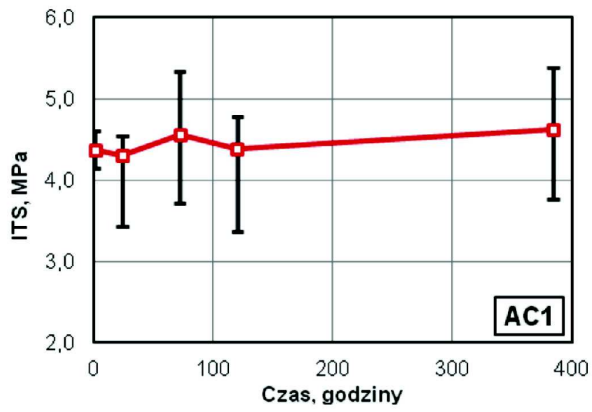
$S(t)$  – moduł sztywności przy czasie izotermicznego przechowywania  $t$ ,

$t$  – czas przechowywania w godzinach,

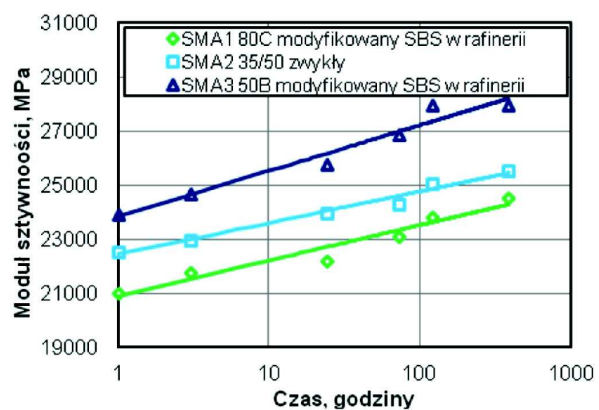
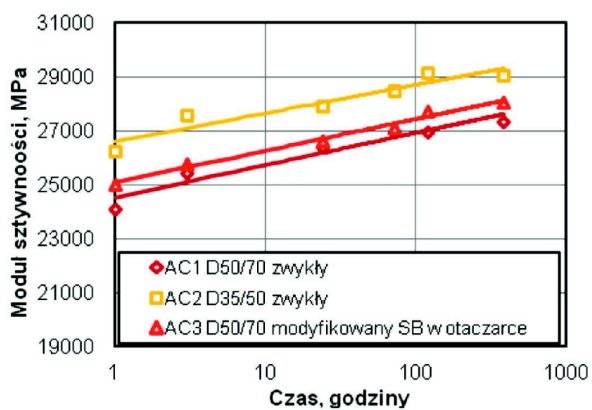
$S(1)$  – moduł przy czasie przechowywania  $t = 1$  godz.,

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

SGR – wskaźnik wzrostu sztywności.



Rys. 2. Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanek mineralno-asfaltowych w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  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  $-20^{\circ}\text{C}$  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 <sup>2</sup>
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:

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

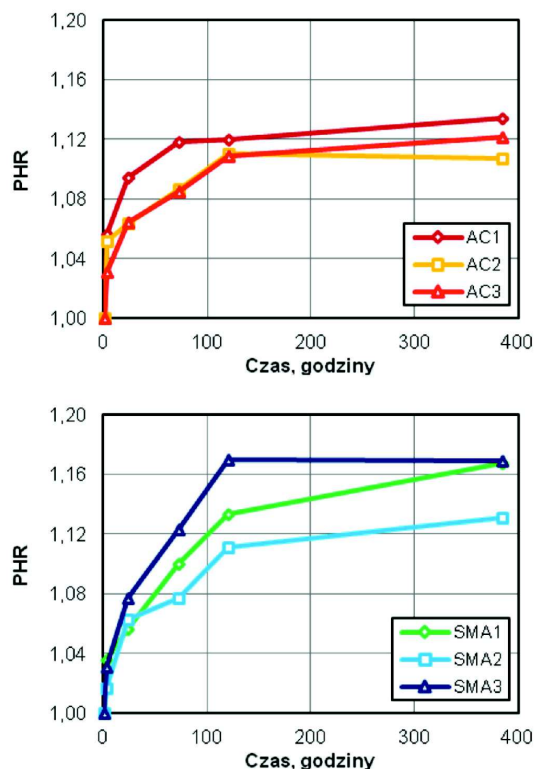
w którym:

- $PHR(t)$  – 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  $-20^{\circ}\text{C}$  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  $-20^\circ\text{C}$  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  $-20^\circ\text{C}$  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  $-20^\circ\text{C}$  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*, 5<sup>th</sup> 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. Isacsson, *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 3<sup>rd</sup> 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