



PIOTR JASKUŁA

Politechnika Gdańska
piotr.jaskula@wilis.pg.
gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska
jozef.judycki@wilis.pg.
gda.pl

Wpływ niszczącego oddziaływania wody i mrozu na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego

Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych jest jednym z podstawowych kryteriów nowoczesnego projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych. Uwzględnienie wpływu niszczącego oddziaływania wody i mrozu na trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych może ulepszyć metody projektowe nawierzchni. Znajomość tego wpływu może być również przydatna przy doborze składu mieszanek.

Przeprowadzono badania zmęczeniowe betonów asfaltowych niepoddanych i poddanych oddziaływaniu wody i mrozu, które symulo-

wano w laboratorium trzema metodami o różnej agresywności oddziaływania. Badania zmęczeniowe przeprowadzono metodą cyklicznego pośredniego rozciągania próbek walcowych (ang. *Indirect Tensile Fatigue Test – ITFT*) w aparacie NAT (ang. *Nottingham Asphalt Tester*), które wcześniej przebadano metodą nieniszczącą także w aparacie NAT, określając moduł sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu (ang. *Indirect Tensile Stiffness Modulus – ITSM*). Laboratoriwną symulację oddziaływania wody i mrozu oparto na zaadoptowanej do polskich warunków amerykańskiej metodzie AASHTO T283 i jej modyfikacji. Modyfikacja polegała na wprowadzeniu zamiast 1 cyklu zamrażania, 50 i 150 cykli zamrażania i odmrażania próbek.

Celem badań było określenie wpływu niszczącego oddziaływania wody i mrozu na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego, co wcześniej opisywali Poczapskij i Goncharenko [14], Lottman [11], Gilmore i wsp. [2], Kim i wsp. [10], Lottman i wsp. [12], Moutier i wsp. [13], jak również wykorzystane w innych analizach przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni przez Jaskułę [4].

Materiały do badań

Badano beton asfaltowy do warstwy podbudowy, oznaczony jako AC25P, wyprodukowany z dodatkiem i bez dodatku środka adhezyjnego – aminy tłuszczowej. Beton asfaltowy 0/25 mm wytworzono z grysów granitowych 5/8 i 8/11, kruszonego żwiru 2/8 i 12/25, piasku naturalnego (kwarcytowego) 0/2, piasku łamanego (granitowego) 0/2, wypełniacza wapien-

nego i asfaltu drogowego 35/50. Zawartość asfaltu wynosiła 4% wagowo, a zawartość środka adhezyjnego wynosiła 0,3% wagowo w stosunku do ilości asfaltu. Luźną mieszankę poddano starzeniu krótkoterminowemu w suszarce z nawiewem powietrza przez 4 godz. w temperaturze 135°C, zgodnie z procedurą SHRP opisaną przez Harrigana i wsp. [3].

Różne procedury laboratoryjnej symulacji oddziaływania wody i mrozu na zgęszczone próbki mma wykorzystano w badaniach, które przedstawiono w tabeli 1. W badaniach ze względów organizacyjnych zastosowano dwie metody zagęszczania próbek z mma: udarową (za pomocą ubijaka Marshalla) i wałowanie (patrz tabela 1). Średnia zawartość wolnych przestrzeni próbek zagęszczonych dwiema metodami była zbliżona i wynosiła 5,4% v/v.

Z płyt, o wymiarach 750 × 870 × 50 mm, zagęszczanych walcem, odwiercono 36 próbek walcowych o średnicy 102 mm i wysokości 50 mm. Równocześnie przygotowano 30 próbek walcowych o średnicy 102 mm i wysokości od 50 do 60 mm, zagęszczonych ubijakiem Marshalla.

Tabela 1. Przygotowanie i kondycjonowanie zagęszczonych próbek z mma oraz metody badań próbek

Lp.	Metody zagęszczania	Procedury kondycjonowania wg oryginalnej i zmodyfikowanej AASHTO T283			Metody badań zagęszczonych próbek z mma	
1.	Wałowanie (i odwiercenie)	Bez kondycjonowania		1 cykl zamrażania i odmrażania	ITSM, ITFT – 7 poziomów naprężenia	
2.	Udarowa (ubijakiem Marshalla)	Bez kondycjonowania	1 cykl zamrażania i odmrażania	50 cykli zamrażania i odmrażania	150 cykli zamrażania i odmrażania	ITSM, ITFT – 1 poziom naprężenia

Do wyznaczenia modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu ITSM przebadano co najmniej 3 próbki jednorodne w każdej z serii.

Do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej każdej mieszanki mineralno-asfaltowej zagęszczanej poprzez wałowanie przebadano 7-9 próbek, natomiast zagęszczanej ubijakiem Marshalla przebadano po 3 próbki.

Badania

W badaniach wykorzystano dwie metody symulujące oddziaływanie wody i mrozu w laboratorium:

a) wg AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania, próbki mma, przed poddane starzeniu krótkoterminowemu, opisane przez Jaskułę i Judyckiego [7],

b) zmodyfikowane AASHTO T283 z 50 i 150 cyklami zamrażania i odmrażania zamiast 1 cyklu. Jeden cykl zamrażania i odmrażania obejmował 4 godz. zamrażania w temperaturze -18°C i 2 godz. odmrażania w wodzie w temperaturze +20°C. Nie stosowano folii do owijania próbek. Następnie próbki poddawano przedłużonemu przechowywaniu w kąpielii wodnej w temperaturze 60°C przez 24 godziny. Po ką-

pieli wodnej próbki osuszano szmatką i przechowywano przez 4 godz. w temperaturze badania.

Moduł sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu

Moduły sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu *ITSM* oznaczano w temperaturze +20°C i +25°C w aparacie *NAT* na próbkach *mma* poddanych i niepoddanych kondycjonowaniu. Jako miarę odporności na działanie wody i mrozu stosowano wskaźnik modułu sztywności (ang. *Indirect Tensile Stiffness Modulus Ratio – ITSMR*), określony jako iloraz wartości modułu sztywności próbek kondycjonowanych i wartości modułu sztywności próbek niekondycjonowanych.

Trwałość zmęczeniowa betonów asfaltowych

Badania zmęczeniowe mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzono w aparacie *NAT* w schemacie pośredniego rozciągania (ang. *Indirect Tensile Fatigue Test – ITFT*), w teście kontrolowanego naprężenia. Badanie *ITFT* opisali wcześniej: Said [16], Judycki [8], Read i wsp. [15] oraz Judycki i wsp. [9]. Siła ściskająca działa na próbkę wzdłuż jej pionowej średnicy i jest przyłożona do pobocznic przez przekładki: o szerokości 12 mm i o promieniu krzywizny 50,5 mm. W rezultacie w walcowej próbce zagęszczonej *mma* powstają poziome naprężenie rozciągające o kierunku prostopadłym do jej pionowej średnicy. Powtarzalne działanie siły pionowej powoduje pęknięcie próbki wzdłuż jej średnicy pionowej, doprowadzając do zniszczenia próbki, czasem do całkowitego rozdzielania próbki na dwie części.

W badaniach zmęczeniowych przy pośrednim rozciąganiu za moment utraty trwałości zmęczeniowej uznaje się: umowne, krytyczne przemieszczenie pionowe albo całkowite zniszczenie próbki [1]. W pracy opisywanej w niniejszym artykule badania przeprowadzono do całkowitego zniszczenia próbki.

Wykorzystanie do badań zmęczeniowych schematu pośredniego rozciągania jest dość proste i praktyczne, ale należy pamiętać, że na przedwczesne zniszczenie próbki w badaniu *ITFT* może mieć wpływ nie tylko naprężenie rozciągające, ale także akumulacja deformacji trwałych. Ma to szczególne znaczenie przy wysokich wartościach temperatury, w których nieliniowe i lepkosprężyste właściwości mieszanek odgrywają istotną rolę. Jest to główna wada badania zmęczeniowego w schemacie pośredniego rozciągania [6].

Podczas badania zmęczeniowego monitorowane jest przemieszczenie pionowe Δp próbki za pomocą czujników *LVDT* oraz pionowa siła obciążająca, z której obliczano naprężenie poziome w próbce. W badaniu naprężenie jest stałe $\sigma_{xx} = \text{const}$ aż do osiągnięcia umownego, krytycznego przemieszczenia pionowego lub do całkowitego zniszczenia.

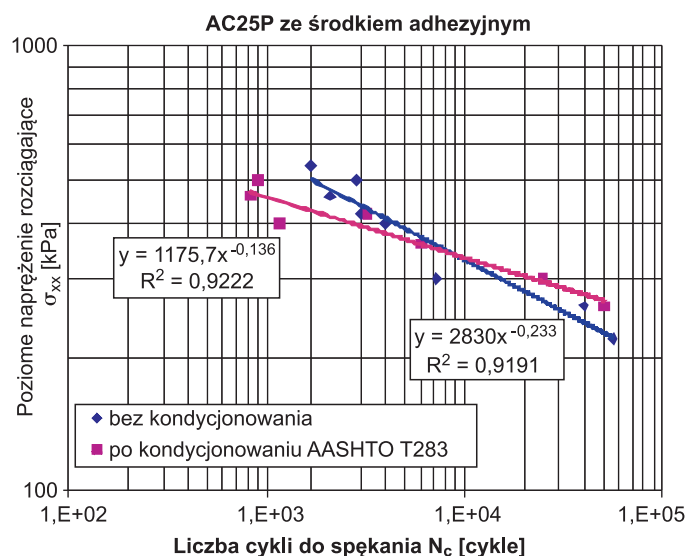
Na podstawie przeglądu prac: Saida [16], Judyckiego [8], [1] oraz Judyckiego i wsp. [9] dotyczących czynników wpływających na przebieg badań zmęczeniowych, przyjęto następujące warunki badania. Badania *ITFT* wykonywano w temperaturze +25°C, czas przyrostu obciążenia wynosił 0,124 s, czas jednego cyklu (obciążenia i odpoczynku) wynosił 1,5 s; wywoływano poziome naprężenie rozciągające mieszczące się w przedziale od 220 do 520 kPa, co 60 kPa. Badano próbki walcowe o średnicy 102 mm, przycinane do wysokości 40-50 mm.

Do każdej badanej próbki wyznaczano krzywą zmęczenia $\sigma = f(N_f)$ z badania *ITFT* i liczbę obciążeń do inicjacji spełnienia N_c , jako maksimum funkcji $f(N_f) = N_f/\Delta p$, bazując na koncepcji energii rozproszonej opisanej przez Reada i wsp. [15], która zakłada, że sztywność jest odwrotnie proporcjonalna do chwilowego przemieszczenia pionowego. Zastosowana metodyka badań zmęczeniowych została dokładnie opisana w pracy doktorskiej Jaskuły [4].

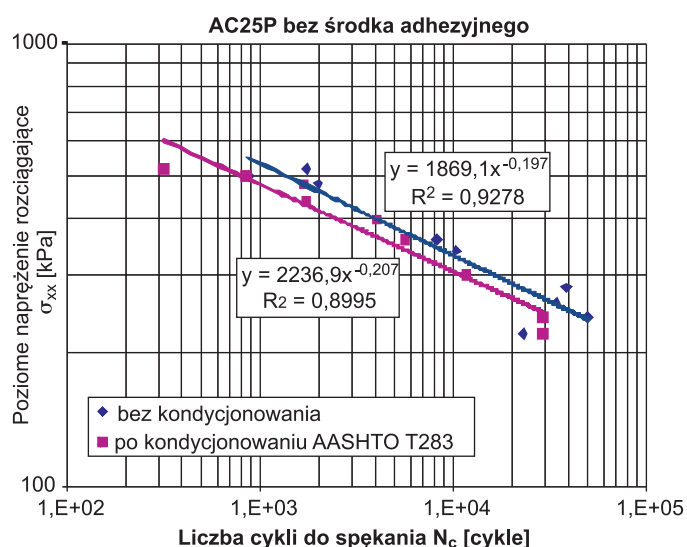
Wyniki badań

Wyniki badań betonów asfaltowych zagęszczonych poprzez wałowanie

Tabela 2 przedstawia uzyskane wartości wskaźników modułów sztywności sprężystej *ITSMR*, a wyniki z badań zmęczeniowych *ITFT* przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Krzywe zmęczeniowe betonu asfaltowego z dodatkiem środka adhezyjnego, bez i po kondycjonowaniu wg AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania, próbki wałowane



Rys. 2. Krzywe zmęczeniowe betonu asfaltowego bez dodatku środka adhezyjnego, bez i po kondycjonowaniu wg AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania, próbki wałowane

Tabela 2. Wskaźniki modułów sztywności sprężystej *ITSMR* próbek zagęszczonych przez wałowanie betonu asfaltowego AC25P, kondycjonowanego wg AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania

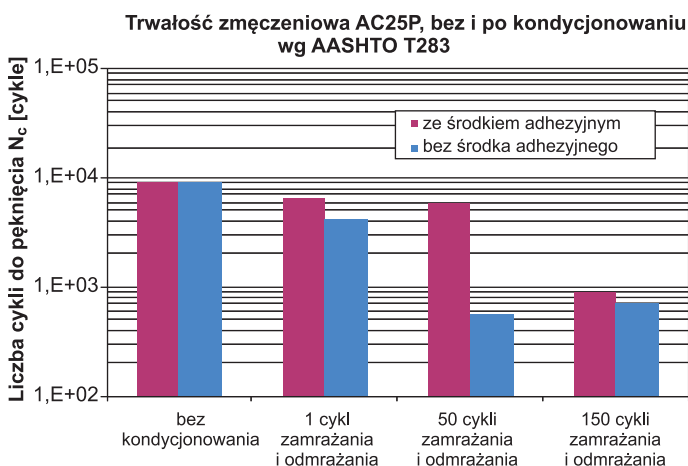
<i>ITSMR</i> (%)			
AC25P ze środkiem adhezyjnym		AC25P bez środka adhezyjnego	
20°C	25°C	20°C	25°C
83,7	81,9	86,8	92,6

Wyniki badań próbek betonów asfaltowych zagęszczonych ubijakiem Marshalla

W tabeli 3 przedstawiono średnie wartości wskaźników modułów sztywności *ITSMR* betonów asfaltowych w zależności od liczby cykli zamrażania i odmrażania. Próbkę zagęszczano ubijakiem Marshalla.

Tabela 3. Wskaźniki modułów sztywności sprężystej *ITSMR* próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla (wartość średnia z 3 próbek)

Liczba cykli zamrażania i odmrażania	<i>ITSMR</i> (%)			
	AC25P ze środkiem adhezyjnym		AC25P bez środka adhezyjnego	
	20°C	25°C	20°C	25°C
1	90,7	78,7	94,6	77,9
50	54,9	35,5	32,4	17,4
150	34,4	32,9	16,0	18,0



Rys. 3. Zestawienie średnich trwałości zmęczeniowych próbek betonów asfaltowych AC25P, zagęszczanych ubijakiem Marshalla

Rysunek 3 przedstawia zestawienie wyników badań zmęczeniowych *ITFT* próbek betonu asfaltowego AC25P bez dodatku i z dodatkiem środka adhezyjnego, poddanych kondycjonowaniu z różną liczbą cykli zamrażania i odmrażania oraz niekondycjonowanych. Wyniki przedstawione na rysunku reprezentują wartości średnie z trzech próbek badanych przy jednym poziomie naprężeń rozciągających w badaniu *ITFT*.

Analiza wyników badań

Definicja wskaźnika trwałości zmęczeniowej po oddziaływaniu wody i mrozu

Trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego poddanego oddziaływaniu wody i mrozu wyznaczano poprzez porównanie wyników trwałości zmęczeniowych *ITFT* próbek podda-

nych oddziaływaniu wody i mrozu symulowanego w sposób przyspieszony w laboratorium i próbek niepoddanych temu oddziaływaniu (tzw. niekondycjonowanych). Do wyznaczenia wielkości zmian trwałości zmęczeniowej mieszanek poddanych i niepoddanych oddziaływaniu wody i mrozu wprowadzono pojęcie wskaźnika trwałości zmęczeniowej po oddziaływaniu wody i mrozu (ang. *Fatigue Life Ratio* – *FLR*), który po raz pierwszy opisał Lottman [11], Lottman i wsp. [12]. Wskaźnik ten obliczano ze wzoru (1):

$$FLR_{w,f} = \frac{N_{f,c}}{N_{f,nc}} \times 100\% \quad (1)$$

w którym:

$FLR_{w,f}$ – wskaźnik trwałości zmęczeniowej po oddziaływaniu wody i mrozu w procentach,

$N_{f,nc}$ – średnia trwałość zmęczeniowa (liczba obciążeń do inicjacji spękania) próbek niepoddanych kondycjonowaniu,

$N_{f,c}$ – średnia trwałość zmęczeniowa (liczba obciążeń do inicjacji spękania) próbek poddanych kondycjonowaniu.

W przypadku próbek betonu asfaltowego zagęszczanych walcem, które poddano pełnym badaniom zmęczeniowym (tj. przy 7 różnych poziomach naprężeń rozciągających), krzywe zmęczeniowe posłużyły do porównania trwałości zmęczeniowej próbek poddanych i niepoddanych kondycjonowaniu. Odczytywano z wykresu $\sigma_{xx} = f(N_f)$ trwałość zmęczeniową, tj. liczbę cykli N_f do wystąpienia spękania, przy trzech poziomach (10%, 25% i 90% zakresu) naprężenia σ_{xx} . Następnie wyznaczono wskaźniki wytrzymałości zmęczeniowej $FLR_{w,f}$ i uśredniano wyniki.

W przypadku próbek betonów asfaltowych zagęszczanych ubijakiem Marshalla, wykonano skrócone badania zmęczeniowe, tzn. wykonano testy zmęczeniowe tylko przy jednym, ustalonym poziomie naprężeń: σ_{xx} . Ocena zmian trwałości zmęczeniowych bez i po oddziaływaniu wody i mrozu polegała wprost na wyznaczeniu wskaźników trwałości zmęczeniowej z zależności (1).

Jeżeli wartość wskaźnika trwałości zmęczeniowej oddziaływania wody i mrozu jest mniejsza od 1 to oznacza, że występuje wpływ niszczącego oddziaływania wody i mrozu na trwałość zmęczeniową badanego betonu asfaltowego.

Wpływ laboratoryjnej symulacji oddziaływania wody i mrozu wg AASHTO T283 na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego

Z rysunku 1 wynika, że występuje ograniczony wpływ oddziaływania wody i mrozu symulowanego zgodnie z AASHTO T283 (1 cykl zamrażania i odmrażania) na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego z dodatkiem środka adhezyjnego. Krzywe zmęczeniowe przecinają się, co można przypisać niezbyt dużej sile niszczącego oddziaływania wody i mrozu (symulowanej w laboratorium wg AASHTO T283) na beton asfaltowy z dodatkiem środka adhezyjnego. W analizie statystycznej przy poziomie $P = 90, 95$ i 98% stwierdzono, że krzywe zmęczeniowe nie są istotnie różne, i możliwe jest ich zastąpienie jedną krzywą zmęczeniową przy poziomie determinacji $R^2 = 0,85$.

Natomiast niszczące oddziaływanie wody i mrozu, symulowane wg procedur AASHTO T283 (1 cykl zamrażania i odmrażania) jest już wyraźnie widoczne w przypadku betonu asfaltowego bez dodatku środka adhezyjnego do AC25P, co przedstawiono na rys. 2. Linie zmęczeniowe są równoległe do siebie, a linia, odpowiadająca mieszance AC25P po kondycjonowaniu AASHTO T283 jest położona wyraźnie poniżej linii AC25P bez kondycjonowania. Z rysunku 2 jednoznacznie wynika, że wskaźnik trwałości zmęczeniowej odporności na działanie wody i mrozu $FLR_{w,f}$ wynosi 62,1%. Oznacza to, że oddziaływanie wody i mrozu na beton asfaltowy bez dodatku środka adhezyjnego zmniejszy o 37,9% jego trwałość zmęczeniową, co jest niezwykle istotnym parametrem, którego należy być świadomym w ocenie stanu nawierzchni asfaltowych w czasie eksploatacji [14]. Parametr ten należy uwzględnić podczas projektowania konstrukcji nawierzchni. Nie było możliwe wyznaczenie $FLR_{w,f}$ w przypadku betonu asfaltowego z dodatkiem środka adhezyjnego, gdyż krzywe zmęczeniowe przecinały się (patrz rys. 1).

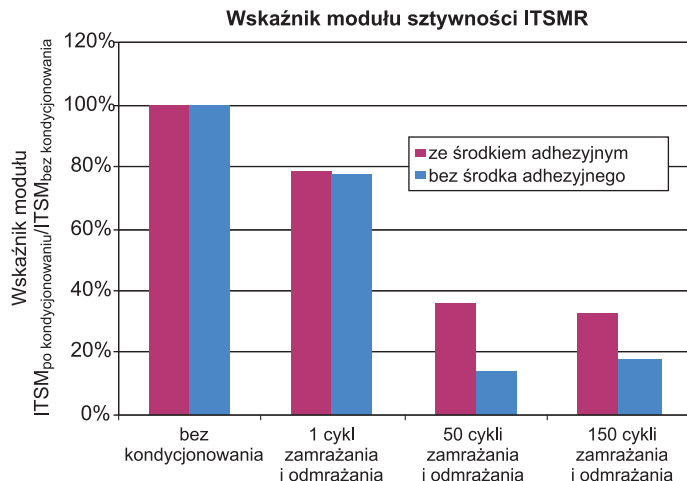
Wyniki uzyskanych wskaźników modułów sztywności sprężystej $ITSMR$ przedstawione w tabeli 2 są sprzeczne z wynikami badań zmęczeniowych i oczekiwaniami. Wartości wskaźników $ITSMR$ w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ i $+25^{\circ}\text{C}$ w przypadku mieszanek bez dodatku środka adhezyjnego są większe od wskaźników uzyskanych w przypadku mieszanek z dodatkiem środka adhezyjnego. Ta kwestia zostanie wyjaśniona w dalszej części artykułu.

Wpływ liczby (1, 50 i 150) cykli zamrażania i odmrażania na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego

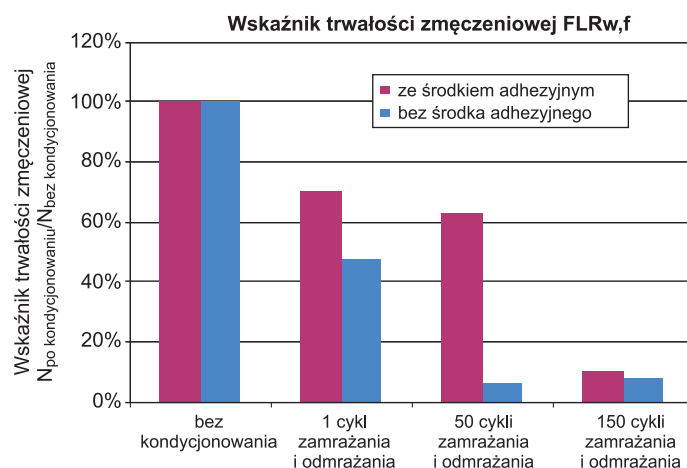
Wskaźniki trwałości zmęczeniowej $FRL_{w,f}$ wyznaczone na próbkach betonów asfaltowych z i bez dodatku środka adhezyjnego, jak pokazano na rys. 4 i w tabeli 4, wskazują na silny wpływ metody laboratoryjnej symulacji wody i mrozu. Wskaźniki $FLR_{w,f}$ uzyskane w przypadku betonu asfaltowego z dodatkiem środka adhezyjnego zawierają się w przedziale od 70,3% dla próbek kondycjonowanych zgodnie z AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania, przez 63,2% po 50 cyklach, do 10,1% po 150 cyklach zamrażania i odmrażania. Należy zwrócić uwagę, że po przejściu 150 cykli zamrażania i odmrażania próbki były częściowo spękanе już przed badaniami zmęczeniowymi wskutek działania zamrażania i odmrażania. To wskazuje, że 150 cykli zamrażania i odmrażania stwarza zbyt surowe warunki kondycjonowania (niskotemperaturowego) w przypadku badanych próbek o zawartości wolnych przestrzeni 5,4% v/v.

Tabela 4. Zestawienie wskaźników $FLR_{w,f}$ próbek betonów asfaltowych AC25P zagęszczanych ubijakiem Marshalla, (wartości średnie z trzech wyników)

Liczba cykli zamrażania i odmrażania	$FLR_{w,f}$ (%) przy temperaturze badania $+25^{\circ}\text{C}$	
	AC25P ze środkiem adhezyjnym	AC25P bez środka adhezyjnego
1	70,3	47,7
50	63,2	6,4
150	10,1	8,1



Rys. 4. Zestawienie wskaźników sztywności sprężystej $ITSMR$ próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla poddanych zmiennej symulacji oddziaływania wody i mrozu



Rys. 5. Zestawienie wskaźników $FLR_{w,f}$ próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla poddanych zmiennej symulacji oddziaływania wody i mrozu, próbki

Wskaźniki trwałości zmęczeniowej $FLR_{w,f}$ betonu asfaltowego bez dodatku środka adhezyjnego zawierają się w przedziale od 47,7% w przypadku badań próbek kondycjonowanych zgodnie z AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania, przez 6,4% po 50 i 8,1% po 150 cyklach zamrażania i odmrażania. Po 150 cyklach zamrażania i odmrażania próbki wykazywały częściowe spękanie.

Wyniki badań przedstawione w tabeli 3 i 4 oraz na rys. 4 i 5 wyraźnie wskazują, że wskaźnik trwałości zmęczeniowej $FLR_{w,f}$ jest lepszym wyznacznikiem oddziaływania wody i mrozu na mieszanki mineralno-asfaltowe, niż wskaźnik modułów $ITSMR$.

Dodatek środka adhezyjnego do betonu asfaltowego zauważalnie, pozytywnie wpływa na trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego poddanego oddziaływaniu wody i mrozu. Uzyskano znacząco różne wartości wskaźników trwałości zmęczeniowej $FLR_{w,f}$ w temperaturze $+25^{\circ}\text{C}$ w przypadku betonów asfaltowych AC25P z i bez dodatku środka adhezyjnego po 1 cyklu zamrażania i odmrażania w badaniach powtarzalnego obciążenia, odpowiednio 70,3% i 47,7%. Z drugiej jednak strony, wartości wskaźnika modułów sztywności sprę-

żystej *ITSMR* w przypadku próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla w temperaturze +25°C po jednym cyklu zamrażania i odmrażania wynosiły 78,7% i 77,9%. W temperaturze +20°C wskaźniki te osiągnęły wartości 90,7% i 94,6% (patrz tablica 3). Uzyskane wartości wskaźnika *ITSMR* są bardzo zbliżone w przypadku betonów asfaltowych z i bez dodatku środka adhezyjnego i wskazują na brak wpływu środka adhezyjnego. Odmienny obraz przedstawiają wyniki trwałości zmęczeniowej. W przypadku mieszanek zagęszczanych walcem wyniki *ITSMR* są jeszcze bardziej mylące (patrz tabela 2), mieszanki bez środka adhezyjnego osiągają wyższe wartości *ITSMR* niż mieszanki zawierające dodatek środka adhezyjnego. To budzi wątpliwości, co do praktycznego znaczenia wskaźnika modułu *ITSMR*.

Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że:

1. Badanie trwałości zmęczeniowej metodą cyklicznego pośredniego rozciągania próbek walcowych *ITFT*, po symulowanym w laboratorium oddziaływaniu wody i mrozu, w szczególności z cyklami zamrażania i odmrażania, zapewnia lepsze wskazanie różnic pomiędzy badanymi betonami asfaltowymi w porównaniu do badania modułu sztywności sprężystej *ITSM*. Zaobserwowano istotne obniżenie trwałości zmęczeniowej betonów asfaltowych po kondycjonowaniu wg AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania, podczas gdy obniżenie modułów sztywności sprężystej *ITSM* było znacznie mniejsze w tych samych warunkach kondycjonowania.

2. Zaobserwowano istotny spadek trwałości zmęczeniowej betonów asfaltowych po kondycjonowaniu wg AASHTO T283 z 50 cyklami zamrażania i odmrażania. Wskaźnik trwałości zmęczeniowej $FLR_{w,f}$ po 50 cyklach zamrażania i odmrażania wynosił 6% w przypadku betonu asfaltowego bez środka adhezyjnego i 63% w przypadku betonu asfaltowego z dodatkiem środka adhezyjnego. Bardzo wyraźnie był widoczny pozytywny wpływ środka adhezyjnego na odporność betonów asfaltowych na oddziaływanie wody i mrozu.

3. Zauważono, że próbki już przed badaniami zmęczeniowymi wykazują spękania po przejściu kondycjonowania z 150 cyklami zamrażania i odmrażania. Można wnioskować, że tak duża liczba cykli zamrażania i odmrażania w laboratorium jest nieodpowiednia w przypadku otwartych mieszanek mineralno-asfaltowych. W dalszych badaniach należy obniżyć liczbę cykli, na przykład do 50 cykli lub nawet 25 cykli. Jednak i ta liczba jest mało praktyczna ze względu na wymagany długi czas badań, przez co nowe metody laboratoryjnej symulacji oddziaływania wody i mrozu są niezbędne i wymagają opracowania.

4. Po symulowaniu oddziaływania wody i mrozu na próbki mma, według AASHTO T283 z 1 cyklem zamrażania i odmrażania w badaniu modułu sztywności sprężystej *ITSM*, wpływ środka adhezyjnego nie był wyraźnie zaobserwowany. Uzyskane wyniki wskaźników *ITSMR* budzą wątpliwości i wskazują, w niektórych przypadkach, na brak wpływu środka adhezyjnego lub nawet wyższą odporność mieszanek bez środków adhezyjnych na działanie wody i mrozu. Odmienny wpływ środków adhezyjnych wykazują badania

zmęczeniowe przeprowadzane na tych samych mieszankach po kondycjonowaniu z 1 cyklem, a w przypadku 50 cykli zamrażania i odmrażania wykazują spotęgowany pozytywny wpływ środka adhezyjnego na odporność mieszanek na działanie wody i mrozu. To budzi wątpliwości co do praktycznego znaczenia wskaźnika modułu sztywności sprężystej *ITSMR*.

5. Podbudowa z betonu asfaltowego ze względu na dużą zawartość wolnych przestrzeni i swobodny przepływ wody, pochodzącej z powierzchni, ze spodu lub też z poboczny, jest szczególnie narażona na niszczące oddziaływanie wody i mrozu. Obniżenie trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego w warstwie podbudowy powodowane niszczącym oddziaływaniem wody i mrozu może mieć decydujący, negatywny wpływ na trwałość całej konstrukcji nawierzchni.

6. Wykazany spadek trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego do podbudowy powinien być wykorzystywany w analizach obliczeniowych długoterminowej oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

Bibliografia

- [1] Cooper Research Technology Limited (CRTL), *Manual of Nottingham Asphalt Tester (NAT)*, Ripley, United Kingdom, 1994
- [2] D.W. Gilmore, R.P. Lottman, J.A. Scherocman, *Use of indirect tension measurement to examine the effect of additives on asphalt concrete durability*, AAPT 1984, Vol. 53, str. 495-519, 1984
- [3] T. Harrigan, R.B. Leahy, J.S. Youtcheff, *The SUPERPAVE Mix Design System, Manual of Specifications, SHRP A-379*, 1994
- [4] P. Jaskuła, *Analiza niszczonego oddziaływania wody i mrozu na mieszanki mineralno-asfaltowe*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk 2004
- [5] P. Jaskuła, J. Judycki, *Durability of Asphalt Concrete Subjected to Deteriorating Effects of Water and Frost*, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-550913.0000645 (zaakceptowany do druku), 2014
- [6] P. Jaskuła, J. Judycki, *The Effect of Water and Frost on Fatigue Life of Asphalt Concrete*, Geo-Hubei 2014, Sustainable Civil Infrastructure - Innovative Technologies and Materials, Advanced Characterization of Asphalt and Concrete Materials, 20-22 July 2014, Yichang, GSP ASCE 255, str. 76-83, doi: 10.1061/9780784478554.010, 2014
- [7] P. Jaskuła, J. Judycki, *Verification of the criteria for evaluation of water and frost resistance of asphalt concrete*, International Journal of Road Materials and Pavement Design, vol. X, no. 10, 2008
- [8] J. Judycki, *Fatigue of Asphalt Mixes*, Publications of Road and Transport Laboratory, Oulu, Finland 1991
- [9] J. Judycki, P. Jaskuła, P. Urbanski, A. Zofka, *Ocena przydatności asfaltów z Rafinerii Gdańskiej S.A. do budowy autostrad w Polsce*, Raport badawczy, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2002
- [10] O.K. Kim, C.A. Bell, R.G. Hicks, *Effect of mix conditioning on properties of asphaltic mixtures*, TRR, No. 968, str. 86-92., 1984
- [11] R.P. Lottman, *Predicting Moisture-Induced Damage To Asphaltic Concrete. Field Evaluation*, NCHRP Report 246, TRB, 1982
- [12] R.P. Lottman, L.J. White, D.J. Frith, *Methods of predicting and controlling moisture damage of asphalt concrete*, TRR, No. 1171, str.1-11, 1988
- [13] F. Moutier, T.H. Duan, J.J. Chauvin, *The effect of the formulation parameters on the mechanical behaviour of mixes*, AAPT, vol. 57, str. 213-242, 1988
- [14] N.F. Poczapskij, V.I. Goncharenko, *Vlijanije vlasnosti asfaltovogo betona na jevo ustalostnuju prochnost' pri izgibie*, Isviestija Vysshih Uchebnijih Zavjedienij, Stroitelstvo i Architektura, No. 5, Novosibirsk, str.138-140, 1973
- [15] J. Read, A. Collop, *Practical Fatigue Characterization of Bituminous Paving Mixtures*, AAPT, vol. 66, str.74-101, 1997
- [16] S.F. Said, *Tensile and Fatigue Properties of Bituminous Mixtures Using The Indirect Tensile Method*, Department of Highway Engineering Royal Institute of Technology, Trita VBG, Sweden, Stockholm 1989