



MARCIN GAJEWSKI

IBDiM
mgajewski@ibdim.edu.pl



KRZYSZTOF MIRSKI

IBDiM
kmirski@ibdim.edu.pl



WOJCIECH
BANKOWSKI

IBDiM
wbankowski@ibdim.edu.pl

Badania wpływu naprężeń normalnych na zachowanie połączenia międzywarstwowego przy ścinaniu próbek asfaltowych zbrojonych siatkami

W procesie projektowania i wykonania nawierzchni drogowych ostatnio coraz częściej używa się elementów zbrojących w postaci siatek z włókien węglowych, szklanych, siatek stalowych itp. [1], [2], [5]. Niemniej jednak, w bezpośrednich obliczeniach statycznych oraz w obliczeniach trwałości nawierzchni [7–9] nie uwzględnia się zbrojenia siatkami, a jedynie zakłada, że można zmniejszyć grubość warstwy po wprowadzeniu zbrojenia. Dzieje się tak, gdyż w laboratoriach drogowych nie przeprowadza się żadnych badań, w których uwzględniałoby się wpływ siatki zbrojącej na pracę konstrukcji warstwowej. W standardowych badaniach wpływ siatki zbrojącej jest często pomijalny albo pomijany z założenia. W artykule zaproponowano test laboratoryjny, w którym wpływ siatki zbrojącej na zachowanie połączenia międzywarstwowego może być uwzględniony.

W tym teście ścinaniu poddaje się strefę przejściową (interfejs), w której może znajdować się siatka. Ścinanie to jest realizowane w typowej maszynie wytrzymałościowej na próbkach o kształcie walca o średnicy 200 [mm] i długości do 500 [mm]. Próbkę tę mogą być pobrane z wykonanej nawierzchni przy pomocy wiertnicy albo wykonane w warunkach laboratoryjnych. Innowacyjność proponowanego aparatu do ścinania, w stosunku do typowego, polega na możliwości wygenerowania w nim ciśnienia normalnego, stałego w czasie trwania badania [11]. W rzeczywistych nawierzchniach drogowych, zawsze na połączeniu warstw występuje składowa normalna wektora naprężenia, której wpływ może zmieniać zachowanie interfejsu przy ścinaniu. Naprężenia te mogą pochodzić od obciążeń zlokalizowanych na powierzchni warstwy ścieralnej oraz od ciężaru własnego konstrukcji. Oczywiście lokalnie składowa normalna wektora naprężenia może zmieniać znak, ale jest to sytuacja wyjątkowa i zazwyczaj związana jest z powstaniem deformacji trwałych, spękań w nawierzchni lub znacznych deformacji trwałych w podbudowie konstrukcji drogowej.

Wpływ siatki zbrojącej nawierzchnie drogowej może być również analizowany przy zastosowaniu metody elementów skończonych [3], [4]. W symulacjach tego typu najtrudniej scharakteryzować zachowanie tzw. interfejsu, czyli obszaru połączenia warstw nawierzchni między sobą, który dodatkowo może być wzbogacony o siatkę zbrojącą [6]. Można stwierdzić, że modele konstytutywne materiałów drogowych są dość dobrze opracowane, zaś modele interfejsów wymagają dopracowania i weryfikacji doświadczalnej. Do przeprowadzenia pośrednio tej weryfikacji można także zastosować proponowane urządzenie.

W artykule zaprezentowane zostały wyniki badań ścinania dwuwarstwowych próbek walcowych z mieszanki mineralno-asfaltowej, przygotowanych w laboratorium Instytutu Badawczego Dróg i Mostów (IBDiM). Badania zostały wykonane przy użyciu prototypowego aparatu, pozwalającego na przyłożenie podczas ścinania ciśnienia normalnego (naprężeń normalnych względem płaszczyzny interfejsu), symulującego oddziaływanie nawierzchni drogowej. Wpływ ciśnienia normalnego na wartość siły ścinającej zbadano na próbkach bez siatki oraz z siatką ułożoną pomiędzy warstwami. Zaproponowany aparat ma możliwość wytworzenia ciśnienia normalnego o maksymalnej wartości wynoszącej 0,3 [MPa]. Wartość tego ciśnienia wydaje się niewystarczająco wysoka w porównaniu do ciśnień generowanych w rzeczywistej nawierzchni od standardowych obciążeń 0,6 [MPa], jednak jest limitowana względami technicznymi. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że ciśnienie przyłożone na brzegu bardzo szybko zmniejsza swoją wartość wraz ze zmianą głębokości i w rzeczywistej nawierzchni już na głębokości około 20 [cm] zmniejsza się o połowę, co potwierdzają obliczenia i doświadczenia. Badania przeprowadzono realizując 50% i 100% możliwego do wytworzenia ciśnienia normalnego. Porównawczą grupę stanowiły próbki, które zostały poddane ścinaniu bez obciążenia ciśnieniem normalnym. Badania wykonano przy trzech wartościach temperatury: 10 [°C], 20 [°C] oraz 30 [°C]. Łącznie, wykonano około 150 oznaczeń, które posłużyły do wykonania analizy.

Próbki do badań

Wszystkie próbki poddane badaniom zostały wykonane w laboratorium IBDiM, w praktyce jest możliwe ich pobranie bezpośrednio z wykonanej nawierzchni drogowej. Próbkę

miały kształt walców, o średnicy $\phi = 200$ [mm]; uzyskane zostały poprzez wykonanie odwiertów z uprzednio przygotowanych płyt. Prostopadłościenne płyty dwuwarstwowe miały nominalne wymiary: dł. 73 [cm] \times szer. 47 [cm] \times gr. 18 lub 16.5 [cm]. Grubość warstwy dolnej była we wszystkich płytach jednakowa i wyniosła 9 [cm], natomiast grubość warstwy górnej była zmienna i wynosiła 7.5 [cm] lub 9.0 [cm]. Płyty wykonano z mieszanki mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy. Jedna warstwa została wykonana z mieszanki do warstwy wiążącej o uziarnieniu 0/16 [mm], natomiast druga z mieszanki do warstwy ścieralnej o uziarnieniu 0/12.8 [mm]. Do mieszanek zastosowano odpowiednio asfalty drogowe 35/50 (4.2% m/m) i 50/70 (5.5% m/m). Skład mieszanki mineralnej oraz mineralno-asfaltowej o uziarnieniu 0/16 [mm] zamieszczono w tabeli 1. W tabeli 2 zaprezentowano identyczne dane w przypadku mieszanki do warstwy ścieralnej o uziarnieniu 0/12,8 [mm].

Tabela 1. Skład mieszanki mineralnej (mm) i mineralno-asfaltowej (mma) o uziarnieniu 0/16 [mm]

Składniki	Lp.	Oznaczenie	Udział składników w mieszance: [% (m/m)]	
			mineralnej	mma przy zawartości asfaltu: 4,2
mieszanka mineralna	1	mączka wapienna	6,00	5,75
	2	0/2 granitowy piasek łamany	22,00	21,08
	3	2/5 grys bazaltowy	13,00	12,45
	4	5/8 grys bazaltowy	13,00	12,45
	5	8/11 grys bazaltowy	20,00	19,16
	6	11/16 grys bazaltowy		
		Suma pośrednia:	95,80	95,80
asfalt	1	35/50		4,19
	1A	środek adhezyjny: Teramin 14 C		0,01
Suma całkowita:			100,00	

Tabela 2. Skład mieszanki mineralnej (mm) i mineralno-asfaltowej (mma) o uziarnieniu 0/12.8 [mm]

Składniki	Lp.	Oznaczenie	Udział składników w mieszance: [% (m/m)]	
			mineralnej	mma przy zawartości asfaltu: 5.5
mieszanka mineralna	1	mączka wapienna	10,00	9,45
	2	0/2 granitowy piasek łamany	42,00	39,69
	3	2/5 grys bazaltowy	13,00	12,29
	4	5/8 grys bazaltowy	15,00	14,18
	5	8/11 grys bazaltowy	20,00	18,90
			Suma pośrednia:	100,00
asfalt	1	50/70		5,48
	1A	środek adhezyjny: Teramin 14 C		0,02
Suma całkowita:			100,0	

Mieszanka potrzebna do wykonania płyt nie była poddana wygrzewaniu po wyprodukowaniu, lecz dozowana bezpośrednio do formy, w której została zagęszczona i uformowana w płytę przy zastosowaniu zagęszczarki walcowej. Następnie, w zależności od tego czy została zastosowana siatka, czy nie, etapy przygotowania były inne. Zastosowano siatkę szklano-węglową, charakteryzującą się wytrzymałością na rozciąganie: w kierunku poprzecznym 200 [kN/m²] (przy wydłużeniu 1.5%) oraz w kierunku podłużnym 120 [kN/m²] (przy wydłużeniu 3%).

W przypadku, gdy płyta miała zawierać siatkę, zastosowano tzw. metodę „gorące na zimne”. Warstwa górna układana była na warstwie dolnej pokrytej siatką oraz skropionej emulsją asfaltową. Po rozpadzie emulsji zawartość asfaltu (asfalt drogowy rodzaju 70/100 o temperaturze mięknięcia 46,4 [°C] i temperaturze tężliwości -18 [°C]) na skropionej powierzchni wynosiła 0,15 [kg/m²].

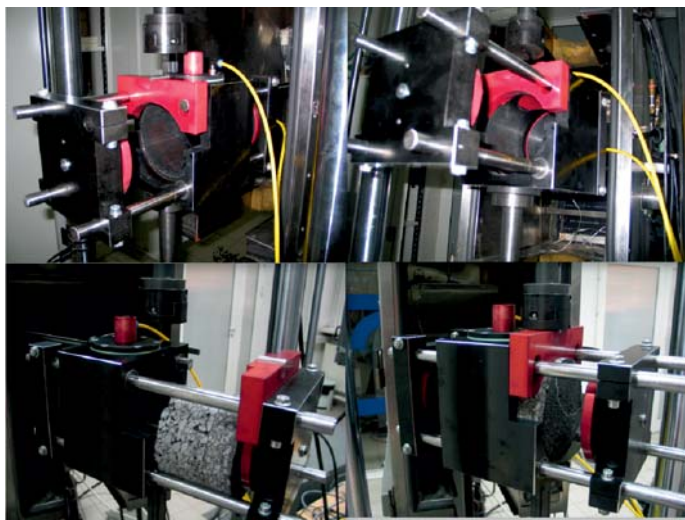
Jeżeli płyta dwuwarstwowa miała zostać wykonana bez siatki, to zastosowano tzw. metodę „gorące na ciepłe”, tj. bezzwłocznie po zagęszczeniu na ciepłej warstwie dolnej układano warstwę górną.

Po ostygnięciu, na wykonanej płycie oznaczono kierunek ułożenia zbrojenia, co pozwoliło przy późniejszych badaniach na ustalenie odpowiedniego kąta przyłożenia siły ścinającej w stosunku do włókien siatki w odwierconych walcach. Po wykonaniu odwiertów, w celu odparowania wody próbki były składowane około miesiąca w temperaturze pokojowej. Różnice w sposobie przygotowania próbek z siatką i bez siatki wynikają z obciążenia laboratorium innymi pracami oraz z możliwości technicznych. W okresie przygotowywania płyt z siatkami nie było możliwości wykonania dwóch warstw jednego dnia. W dalszym etapie badań czynnik ten zostanie wyeliminowany.

Wyniki badania ścinania w nowym aparacie

Jak zostało napisane powyżej, badania ścinania w prototypowym aparacie (fot. 1) przeprowadzono w trzech stanach naprężenia: z ciśnieniem normalnym wynoszącym: 0,15 [MPa], 0,3 [MPa] oraz bez ciśnienia normalnego. Aby uwzględnić wpływ temperatury, próbki zostały przebadane przy trzech wartościach temperatury: 10 [°C], 20 [°C] i 30 [°C].

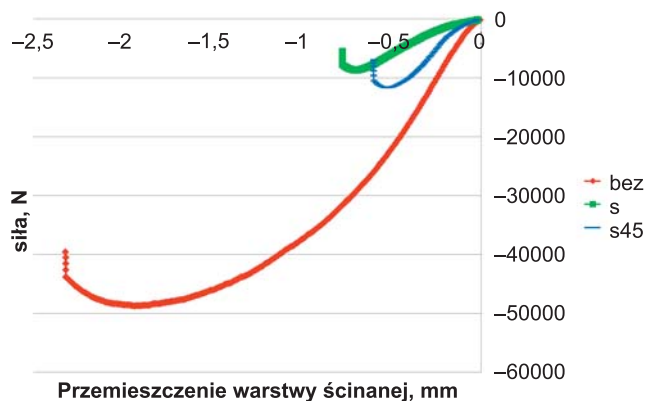
Szczegółowy opis samego aparatu znajduje się w sprawozdaniu [11]. Urządzenie składa się z kilku zasadniczych części, tj. korpusu, dwóch płyt skrajnych, trzpieni prowadzących, przekładki ścinającej oraz dwóch siłowników pneumatycznych; por. fotografia 1. W korpusie urządzenia umieszczony jest siłownik pneumatyczny, który pozwala zablokować badaną próbkę w obudowie. Końcówka siłownika ma kształt dopasowany do próbek walcowych i zapewnia równomierny rozkład obciążenia. Ciśnienie boczne jest realizowane przez siłownik zamocowany na jednej z płyt skrajnych. W celu zapewnienia równomiernego ściskania osiowego, płyty skrajne są połączone czterema trzpieniami, które mogą swobodnie przesuwac się w łożyskach ślizgowych zamocowanych w korpusie urządzenia. Należy podkreślić, że nasza propozycja rozwiązania technicznego aparatu do ścinania jest jednym z wielu rozwiązań proponowanych na świecie [10].



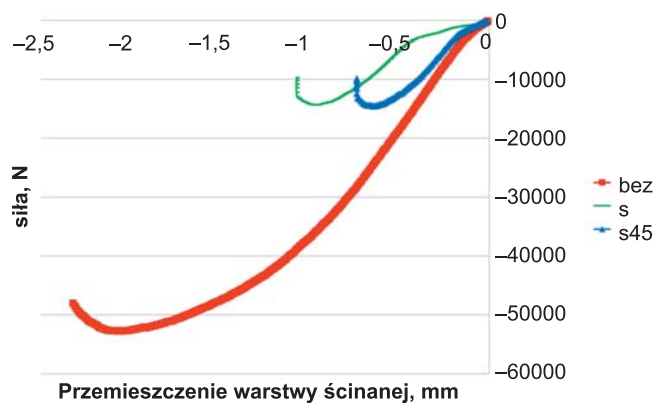
Fot. 1. Prototypowy aparat do badania ścinania próbek z możliwością generowania naprężeń normalnych w interfejsie (ciśnienia normalnego)

Wyniki badań w temperaturze 10°C

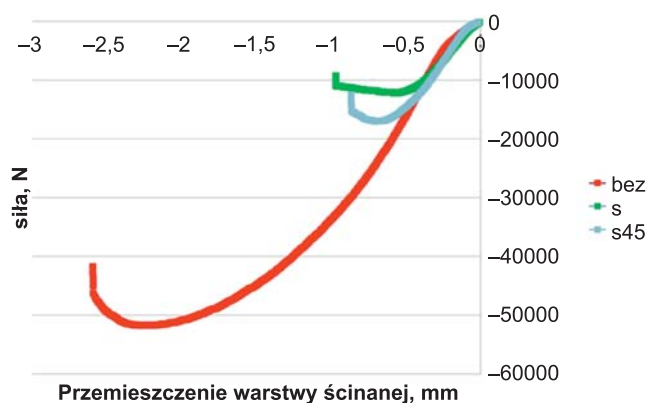
W temperaturze 10 [°C] wykonano 35 badań (w wyniku analizy statystycznej 4 wyniki zostały odrzucone, gdyż znacznie odbiegały od średniej). W tabeli 3 przedstawiono średnie wyniki minimalnej siły ścinającej w [N], oraz odpowiadające jej przemieszczenie w [mm] przy różnych wartościach ciśnienia normalnego. Wartości znajdujące się w tej tabeli należy



Rys. 1. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 10 [°C], bez uwzględnienia ciśnienia normalnego



Rys. 2. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 10 [°C], z ciśnieniem normalnym o wartości 0.15 [MPa]



Rys. 3. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 10 [°C], z ciśnieniem normalnym o wartości 0.3 [MPa]

interpretować jako wartości średnie, obliczone na podstawie przeprowadzonych badań. W kolejnej tabeli 4 zamieszczono odchylenie standardowe wyników przedstawionych w tabeli 3 (w jednostkach danej wielkości). Symbol „s” oraz „s45” oznacza na wykresie badanie próbki z siatką i odpowiednio z siatką obróconą pod kątem 45°, względem kierunku działania siły ścinającej.

Na rysunkach od 1 do 3 przedstawione zostały przykładowe wyniki badań ścinania w temperaturze 10 [°C] próbek bez siatki, z siatką oraz z siatką obróconą o 45°, przy trzech ustalonych poziomach ciśnienia normalnego.

Tabela 3. Wyniki badania ścinania próbek w temperaturze 10 [°C]

Próbka	Ciśnienie normalne	0		0,15 MPa		0,3 MPa	
		minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]
10°C bez siatki		-48394	-1,95	-50696	-2,00	-48931	-2,09
10°C z siatką		-19707	-0,81	-15034	-0,92	-12778	-0,69
10°C z siatką 45°		-12401	-0,62	-16298	-0,70	-15677	-0,75

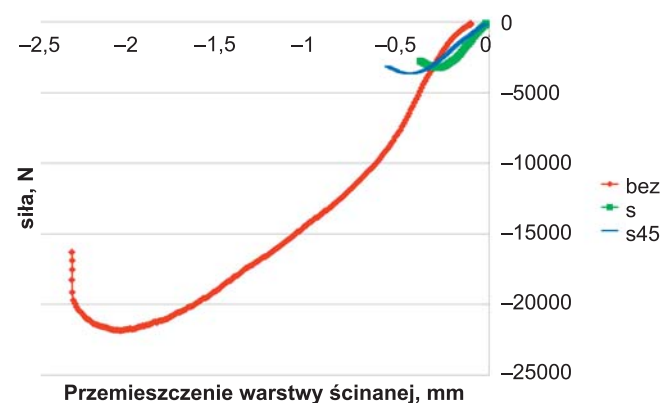
Tabela 4. Odchylenie standardowe wyników badania ścinania próbek w temperaturze 10 [°C]

Próbka	0		0,15 MPa		0,3 MPa	
	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]
10°C bez siatki	900	0,07	2769	0,08	4314	0,16
10°C z siatką	3620	0,07	645	0,16	1868	0,16
10°C z siatką 45°	130	0,02	2849	0,08	1191	0,06

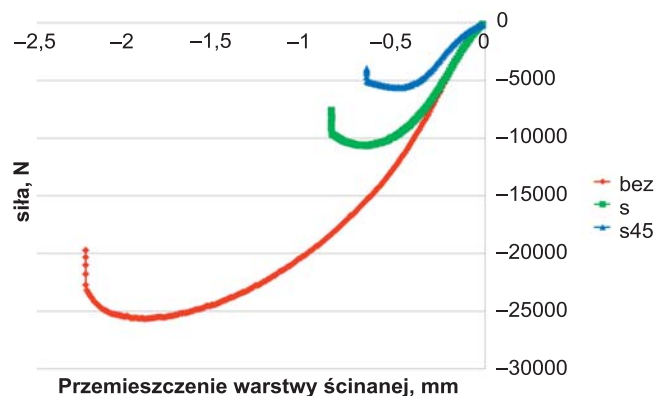
Wyniki badań w temperaturze 20°C

W temperaturze 20 [°C] wykonano 36 oznaczeń, spośród których 4 wyniki zostały odrzucone, gdyż znacznie odbiegały od wartości średnich. W tabeli 5 zamieszczono średnie wyniki minimalnej siły ścinającej w [N] oraz odpowiadające jej przemieszczenie w [mm]. W kolejnej tabeli 6 zamieszczone zostało odchylenie standardowe wyników przedstawionych w tabeli 5 (w jednostkach pomiaru).

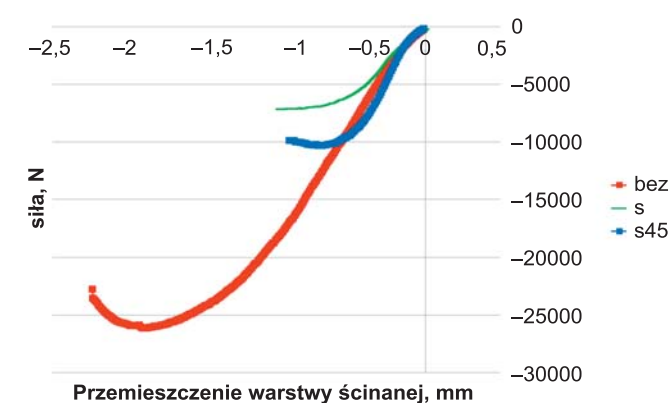
Na rysunkach od 4 do 6 przedstawione zostały wykresy siły ścinającej w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 20 [°C], w przypadku próbek: bez siatki, z siatką oraz z siatką obróconą o 45°, przy trzech ustalonych poziomach ciśnienia normalnego.



Rys. 4. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 20 [°C], bez uwzględnienia ciśnienia normalnego



Rys. 5. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 20 [°C], z ciśnieniem normalnym o wartości 0.15 [MPa]



Rys. 6. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 20 [°C], z ciśnieniem normalnym o wartości 0.3 [MPa]

Tabela 5. Wyniki badania ścinania próbek w temperaturze 20 [°C]

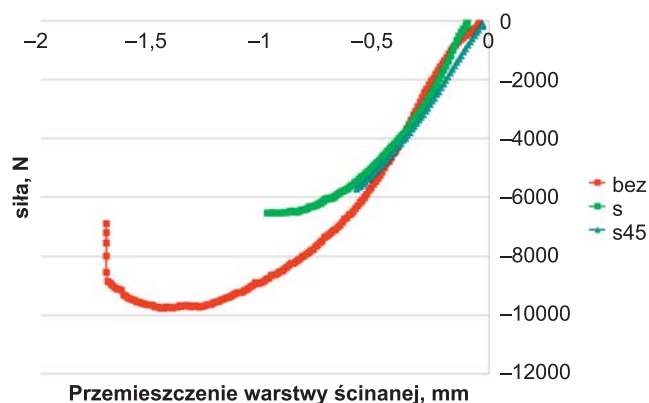
Próbka	0		0,15 MPa		0,3 MPa	
	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]
20°C bez siatki	-21683	-1,89	-24399	-1,73	-25143	-2,36
20°C z siatką	-3697	-0,36	-8846	-0,64	-8045	-0,73
20°C z siatką 45°	-3676	-0,40	-5659	-0,47	-12258	-0,92

Tabela 6. Odchylenie standardowe wyników badania ścinania próbek w temperaturze 20 [°C]

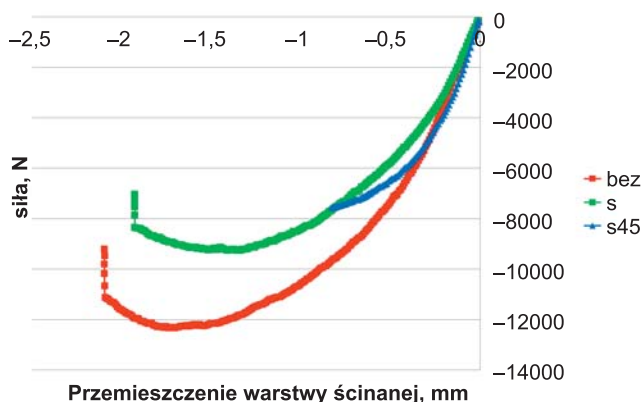
Próbka	0		0,15 MPa		0,3 MPa	
	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]
20°C bez siatki	1151	0,22	2493	0,20	4567	0,44
20°C z siatką	632	0,12	1708	0,09	1052	0,19
20°C z siatką 45°	419	0,09	109	0,01	2146	0,15

Wyniki badań w temperaturze 30°C

W temperaturze 30 [°C] wykonano 38 oznaczeń, 3 wyniki zostały odrzucone z uwagi na znaczne odchylenia od wartości średnich. W tabeli 7 zamieszczone zostały średnie wartości minimalnej siły ścinającej w [N], oraz odpowiadające jej



Rys. 7. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 30 [°C], bez uwzględnienia ciśnienia normalnego



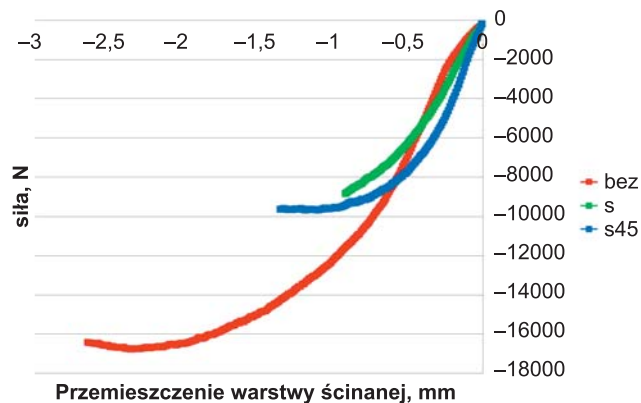
Rys. 8. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 30 [°C], z ciśnieniem normalnym o wartości 0.15 [MPa]

Tabela 7. Wyniki badania ścinania próbek w temperaturze 30 [°C]

Próbka	Ciśnienie normalne		0		0,15 MPa		0,3 MPa	
	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]
30°C bez siatki	-9302	-1,48	-11139	-1,70	-16725	-2,49		
30°C z siatką	-6757	-0,94	-8809	-1,24	-11653	-2,12		
30°C z siatką 45°	-7897	-0,97	-7768	-1,14	-10095	-1,55		

Tabela 8. Odchylenie standardowe wyników badania ścinania próbek w temperaturze 30 [°C]

Próbka	Odchylenie standardowe		0		0,15 MPa		0,3 MPa	
	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]	minimalna siła [N]	przemieszczenie [mm]
30°C bez siatki	640	0,05	1175	0,17	1196	0,38		
30°C z siatką	654	0,11	595	0,34	641	0,17		
30°C z siatką 45°	649	0,08	1105	0,17	1571	0,45		



Rys. 9. Siła ścinająca w funkcji wzajemnego przemieszczenia ścinanych warstw w temperaturze 30 [°C], z ciśnieniem normalnym o wartości 0.3 [MPa]

przemieszczenie w [mm]. Z kolei w tabeli 8 zamieszczone zostały odchylenia standardowe wyników przedstawionych w tabeli 7 (w jednostkach pomiaru).

Na rysunkach od 7 do 9 przedstawione zostały przykładowe wykresy siły ścinającej w funkcji wzajemnego przemieszczenia warstw ścinanych uzyskane w badaniach w temperaturze 30 [°C] próbek: bez siatki, z siatką oraz z siatką obróconą o 45°, przy trzech ustalonych poziomach ciśnienia normalnego.

Zestawienie i analiza wyników

Wyniki ponad 100 przeprowadzonych badań ścinania opracowane statystycznie zestawiono w tabeli 9. W kolejnej tabeli 10 zamieszczono odchylenia standardowe tych wyników w procentach.

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych pozwalają stwierdzić, że zaprojektowany i wykonany w IBDiM aparat badawczy spełnił założenia przyjęte na etapie jego projektowania. Można uznać, że przy jego zastosowaniu możliwe jest uwzględnienie w badaniu ścinania wpływu pozostałej konstrukcji nawierzchni, poprzez przyłożenie dodatkowych naprężeń normalnych. Pod tym względem jest urządzeniem innowacyjnym

Tabela 9. Wyniki badania ścinania próbek w nowym aparacie z możliwością przyłożenia ciśnienia normalnego

Próbka	Ciśnienie normalne	0		0,15 MPa		0,3 MPa	
		siła [N]	przemieszczenie [mm]	siła [N]	przemieszczenie [mm]	siła [N]	przemieszczenie [mm]
10°C bez siatki		-48394	-1,95	-50696	-2,00	-48931	-2,09
10°C z siatką		-19707	-0,81	-15034	-0,92	-12778	-0,69
10°C z siatką 45°		-12401	-0,62	-16298	-0,70	-15677	-0,75
20°C bez siatki		-21683	-1,89	-24399	-1,73	-25143	-2,36
20°C z siatką		-3697	-0,36	-8846	-0,64	-8045	-0,73
20°C z siatką 45°		-3676	-0,40	-5659	-0,47	-12258	-0,92
30°C bez siatki		-9302	-1,48	-11139	-1,70	-16725	-2,49
30°C z siatką		-6757	-0,94	-8809	-1,24	-11653	-2,12
30°C z siatką 45°		-7897	-0,97	-7768	-1,14	-10095	-1,55

Tabela 10. Odchylenia standardowe wyników badania ścinania w procentach

Próbka	Odchylenie standardowe	0		0,15 MPa		0,3 MPa	
		siła [%]	przemieszczenie [%]	siła [%]	przemieszczenie [%]	siła [%]	przemieszczenie [%]
10°C bez siatki		1,9	3,7	5,5	4,0	8,8	7,7
10°C z siatką		18,4	9,1	4,3	17,2	14,6	23,4
10°C z siatką 45°		1,0	2,5	17,5	12,1	7,6	8,5
20°C bez siatki		5,3	11,5	10,2	11,4	18,2	18,6
20°C z siatką		17,1	32,7	19,3	13,8	13,1	25,6
20°C z siatką 45°		11,4	22,0	1,9	1,6	17,5	15,9
30°C bez siatki		6,9	3,5	10,5	10,0	7,2	15,3
30°C z siatką		9,7	12,0	6,8	27,1	5,5	8,2
30°C z siatką 45°		8,2	8,0	14,2	14,9	15,6	28,7

i unikatowym, pozwalającym poszerzyć dostępny zakres badań. Niemniej jednak, dość duże wartości obliczonych odchylenia standardowych uzyskanych wyników wybranych badań wskazują na konieczność podjęcia próby ich zredukowania. Możliwe działania należy podjąć zarówno na etapie przygotowywania próbek (ich jednorodności, powtarzalności itp.), jak i ewentualnych poprawek w zaprojektowanym aparacie do ścinania. Należy podkreślić, że w artykule zestawiono w tabelach tylko wybrane wyniki przeprowadzonych badań ścinania takie jak: minimalna siła ścinająca i odpowiadające jej wzajemne przemieszczenie ścinanych warstw, jednak z punktu widzenia kalibracji modeli konstytutywnych interfejsów istotne są całe przebiegi funkcyjne, które przykładowo zamieszczono na rysunkach od 1 do 9. Te wyniki nie zostały wykorzystane na tym etapie, ale mogą stanowić dobrą bazę do dalszych badań dotyczących zachowania interfejsów w konstrukcjach nawierzchni drogowych. Z wykresów na tych rysunkach, a także z obserwacji próbek po badaniu wynika, że można wyróżnić dwa zasadniczo różne mechanizmy zniszczenia próbek, tj. w sposób ciągły (przy spadającej sile ścinającej) i kruchy (przy rosnącej sile ścinającej).

Na rysunku 10 przedstawiono wybrane wyniki wykonanych badań w postaci wykresów słupkowych, tj. średnie siły ścinające i odkształcenia przy ścięciu w temperaturze 10 [°C] (wartości odkształcenia podane są liczbowo). Na rysunkach 11 i 12 zaprezentowano wyniki uzyskane odpowiednio w temperaturze 20 [°C] i 30 [°C].

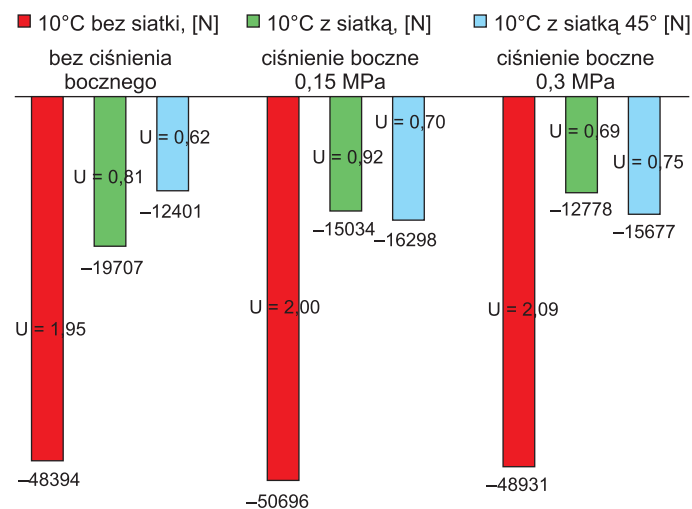
Otrzymane wartości pokazują, że wpływ ciśnienia normalnego na wartość minimalnej siły ścinającej rośnie wraz z temperaturą, co jest pochodną zmiany sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej wynikającej z lepko-sprężystych właściwości lepiszcza asfaltowego. W temperaturze 10 [°C], w której

standardowo przeprowadza się badania zmęczeniowe mma, moduł sztywności jest wysoki, a więc wpływ ciśnienia normalnego jest znikomy. Można stwierdzić, że w tej temperaturze bez ciśnienia normalnego oraz z ciśnieniem normalnym wynoszącym 0.15 [MPa] i 0.3 [MPa] wielkości siły ścinającej oraz przemieszczenia przyjmują zbliżone wartości. Oznacza to, że nie da się zaobserwować intuicyjnego trendu w wynikach, czyli zwiększania się siły ścinającej wraz z wzrostem ciśnienia normalnego. Jednocześnie odchylenia standardowe wyników badań w tej temperaturze są najniższe.

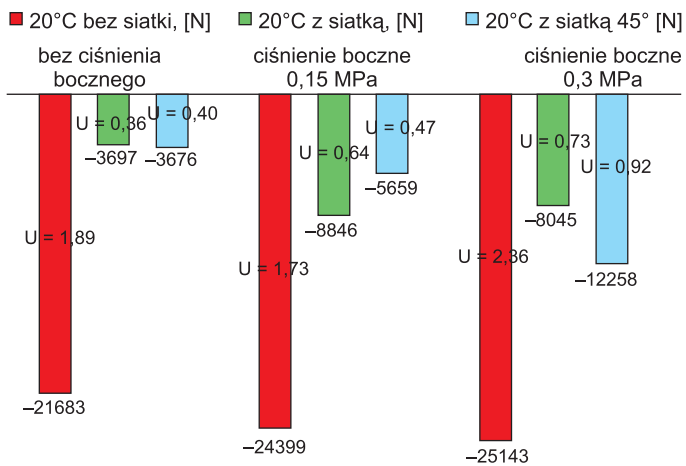
we wyników badań w tej temperaturze są najniższe.

Na podstawie wyników badań wykonanych w temperaturze 20 [°C] można zauważyć, że przyłożenie ciśnienia normalnego wywołuje wzrost siły ścinającej oraz przyrost przemieszczenia odpowiadającego minimalnej sile ścinania. W porównaniu do wyników z 10 [°C], wartości sił spadły o około 50% w odniesieniu do próbek bez siatki oraz o około 30% w odniesieniu do próbek z siatką.

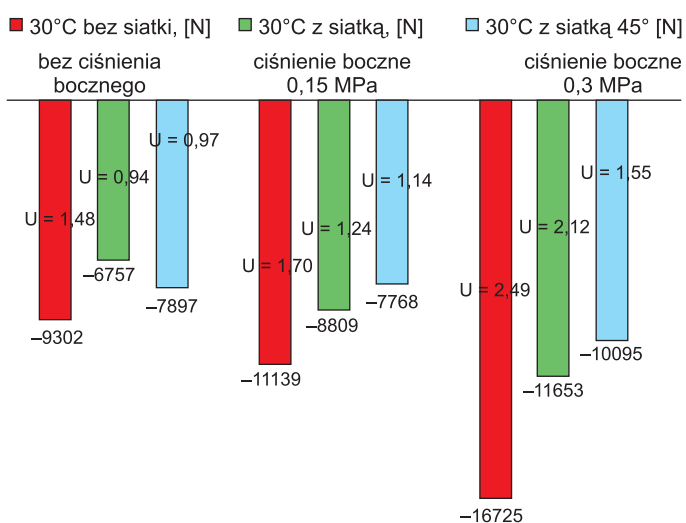
W najwyższej temperaturze badania wynoszącej 30 [°C] zaobserwowano obniżenie o około 50% minimalnej siły ścinającej (w stosunku do wyników uzyskanych w temperaturze 20 [°C]) przy badaniu próbek bez siatki. Wyniki próbek z siat-



Rys.10. Wybrane wyniki badania ścinania w temperaturze 10°C (siła ścinająca [N] oraz przemieszczenie [mm])



Rys.11. Wybrane wyniki badania ścinania w temperaturze 20°C (siła ścinająca [N] oraz przemieszczenie [mm])



Rys.12. Wybrane wyniki badania ścinania w temperaturze 30°C (siła ścinająca [N] oraz przemieszczenie [mm])

ką pokazują generalnie wzrost siły ścinającej lub utrzymanie się na zbliżonym poziomie do danych z 20 [°C]. Przemieszczenie zarejestrowane podczas badania próbek bez siatki zbliżone jest do wartości uzyskanych w 10 [°C], natomiast w odniesieniu do próbek z siatką wzrasta około dwukrotnie. W badaniach tych, bezspornie widać wpływ przyłożenia ciśnienia normalnego, wraz z jego wzrostem wzrastają siły ścinające oraz przemieszczenie w przypadku próbek z siatką (w obu analizowanych układach).

Prace badawcze będą w najbliższym czasie kontynuowane z zastosowaniem innych rodzajów siatek. Zostanie zaproponowana i poddana weryfikacji propozycja relacji konstytutywnej interfejsu z siatką i bez siatki, co będzie stanowiło uzupełnienie wcześniej prowadzonych badań; por. np. [6].

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

1. wpływ przyłożenia ciśnienia normalnego na minimalne siły ścinające jest widoczny w temperaturze 20 i 30 [°C], natomiast jest pomijalny w temperaturze badania 10 [°C],
2. najniższe siły ścinające i odpowiadające im przemieszczenia zaobserwowano w badaniach próbek bez siatki,
3. ułożenie siatki pomiędzy warstwami mieszanki mineralno-asfaltowej osłabia wytrzymałość na ścinanie połączenia międzywarstwowego w rozpatrywanym przypadku,
4. nie zaobserwowano wyraźnej różnicy pomiędzy wynikami uzyskiwanymi z badań ścinania próbek z siatką z siłą ścinającą przykładaną wzdłuż i prostopadle (siatka o oczkach kwadratowych) do włókien siatki oraz pod kątem 45°,
5. największe co do wartości bezwzględnej siły ścinające wystąpiły podczas badań w temperaturze 10 [°C], natomiast największe co do wartości bezwzględnej przemieszczenia w temperaturze 30 [°C],
6. w próbkach bez siatki, zmiana temperatury badania z 10 [°C] na 30 [°C] wywołuje zmniejszenie odporności na ścinanie nawet do 80%, podczas gdy spadek w wypadku badania próbek z siatką nie przekracza 60%,
7. zaobserwowano znaczne odchylenia standardowe wyników badań wynikające prawdopodobnie z niedoskonałości zagęszczania próbek z siatką w czasie przygotowywania ich w laboratorium,
8. w interfejsie widać wyraźną zależność wartości siły i przemieszczenia od kąta między kierunkiem ścinania a kierunkiem głównym siatki. Można więc stwierdzić, że interfejs wykazuje znaczny stopień anizotropii. Co ciekawe anizotropia zmienia się w funkcji temperatury.

Bibliografia

- [1] M. Bugajski, W. Grabowski: *Geosyntetyki w budownictwie drogowym*, WPP, Poznań 1999
- [2] J.A. DiMaggio, M.M. Cribbs: *The Role of Geosynthetics on USA Highways, Geotextiles and Geomembranes*, vol.14, s. 243-251, 1996
- [3] M. Gajewski, S. Jemiolo: *Ocena wpływu zbrojenia siatkami warstwowych nawierzchni drogowych*, 11th International Conference „Computer Systems Aided Science, Industry and Transport”, s. 215-220, TRANSCOMP 2007, Zakopane 2007
- [4] M. Gajewski, S. Jemiolo: *Ocena wpływu zbrojenia siatkami warstwowych nawierzchni drogowych*, Drogi-Lądowe-Powietrzne-Wodne, Media-Pro, s. 59-61, 1-2/2008
- [5] J. Zawadzki, P. Skierczyński: *Zalecenia stosowania geowrobów w warstwach asfaltowych nawierzchni drogowych*, Zeszyt 66 IBDiM, Informacje, Instrukcje, Warszawa 2004
- [6] S. Jemiolo, M. Gajewski, M. Maliszewski, R. Mularzu, D. Sybilski: *Theoretical models of road meshes and their use in standard pavement designing software*, 4th Euroasphalt&Eurobitume Congress, s. 468-475, 21-23 May 2008
- [7] T. Komatsu, H. Kikuta, Y. Tuji, E. Muramatsu: *Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete*, Geotextiles and Geomembranes, vol.16, s. 257-271, 1998
- [8] W. Bańkowski, M. Gajewski, D. Sybilski: *Looking for fatigue damage on test sections submitted to the accelerated loading test*, 11th International Conference on Asphalt Pavements: “Safe Global Environment” – Nagoya 2010
- [9] W. Bańkowski: *Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metodą energii rozproszonej*, Warszawa, IBDiM, Ser. „S” z. 60, 2008
- [10] Ch. Raab, M.N. Partl, Abd El Halim Omar Abd El Halim: *Evaluation of Interlayer Shear Bond Devices for Asphalt Pavements*, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(4): s. 186-195, 2009
- [11] D. Sybilski i Zespół: *Raport z grantu MNiSW pt. Modelowanie kompozytu mieszanki mineralno-asfaltowej z siatką syntetyczną*, nr. N N506 0974 33, 2011 ■