

Janusz POKORSKI ¹
Andrzej REŃSKI
Hubert SAR

BADANIE PRZYZEPNOŚCI OPONY DO NAWIERZCHNI W WARUNKACH LETNIEJ EKSPLOATACJI

W artykule zaprezentowano wyniki badań współczynnika przyczepności pomiędzy oponą a nawierzchnią w warunkach letniej eksploatacji. W badaniach wykorzystano nową generację zestawu pomiarowego SRT-4, wyposażonego w przyczepkę dynamometryczną. Układ ten jest również wykorzystywany podczas rutynowych badań współczynnika przyczepności nawierzchni na drogach krajowych i badań odbiorczych nowych dróg. Artykuł wskazuje jedną z możliwości szacowania współczynnika przyczepności pomiędzy oponą a nawierzchnią, przydatną przy odtwarzaniu sytuacji przedwypadkowych. Problematyka poruszona w tej pracy może być w szczególności interesująca dla rzeczoznawców samochodowych i biegłych sądowych z dziedziny bezpieczeństwa ruchu drogowego.

INVESTIGATION OF TYRE-TO-ROAD ADHESION IN SUMMER EXPLOITATION CONDITIONS

In the paper results of tyre-to-road adhesion coefficient research in summer conditions are presented. In the investigations the new SRT-4 measurement system equipped with dynamometer trailer was applied. This unit is also used in routine and acceptance investigation of road surface adhesion coefficient. The article indicates one of the possibilities to estimate adhesion coefficient between tyre and road surface, useful in the cases of road accidents reconstruction. The problem discussed in the article can be especially interesting for automotive and road safety judgement experts.

1. WSTĘP

Zagadnienie oceny współczynnika przyczepności (siły tarcia) zarówno z punktu widzenia nawierzchni drogowej jak i ogumienia koła samochodowego nabiera coraz większego znaczenia wobec rosnących wymagań dotyczących bezpieczeństwa ruchu drogowego. Wiarygodny pomiar wartości tego współczynnika staje się coraz bardziej

¹ Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów; 02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84
tel: + 48 22 234-85-45, Fax: + 48 22 849-03-03, e-mail: arenski@simr.pw.edu.pl

istotny przy budowie nowych autostrad, które muszą spełniać normy Unii Europejskiej. Jednocześnie zmienność współczynnika przyczepności np. w funkcji poślizgu hamowanego koła ma istotny wpływ na algorytmy sterowania układów antypoślizgowych ABS oraz układów stabilizacji toru jazdy ESP. Układy te stają się obecnie standardowym wyposażeniem pojazdów samochodowych i to właśnie one mają decydujący wpływ na zwiększenie bezpieczeństwa na drogach.

Celem naukowym, zrealizowanego m.in. przez autorów artykułu projektu badawczego MNiSzW, było stworzenie nowoczesnego aparatu matematycznego i pomiarowo-badawczego pozwalającego na badanie własności przeciwoślizgowych nawierzchni drogowych i opon samochodowych. Przez narzędzie to autorzy projektu uważają zarówno nowoczesny aparat matematyczny umożliwiający w miarę precyzyjny opis i badania modelowe zjawisk dynamicznych zachodzących w styku opony z jezdnią [9], [10], [11] jak i aparaturę badawczą pozwalającą na identyfikację zjawisk fizycznych tam zachodzących i ich ilościowy opis. Znajomość charakterystyk przyczepności ma również kapitalne znaczenie przy projektowaniu i doskonaleniu nowoczesnych typów ogumienia oraz opracowywaniu nowoczesnych materiałów i technologii wykonania nawierzchni drogowych [8].

Instytut Pojazdów Politechniki Warszawskiej wraz z Instytutem Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie ma spore osiągnięcia w zakresie konstrukcji i eksploatacji systemów pomiarowych służących do badania przyczepności nawierzchni drogowych [3], [4], [5]. Dziesięć zestawów pomiarowych o nazwie SRT-3 od wielu lat wykonuje masowe badania przyczepności nawierzchni dróg krajowych [2]. Eksperymentalny zestaw pomiarowy będący własnością IBDiM, merytorycznie wspomagany przez pracowników IPPW, bierze od kilku lat udział w europejskim programie doskonalenia metodyki pomiarów drogowych [1]. Rosnące wymagania norm europejskich dotyczące zakresu pomiarów szorstkości nawierzchni wymuszają na konstruktorach systemów badawczych poszukiwania nowych rozwiązań układów pomiarowych. Doświadczenia zdobyte przy eksploatacji układów SRT-3 pozwoliły wskazać kierunek modernizacji polskich zestawów pomiarowych. Dla poprawnego wdrożenia tych zmian niezbędne są dalsze badania modelowe dotyczące współpracy hamowanego koła z nawierzchnią drogi, uwzględniające specyfikę pomiarów trakcyjnych.

Jednym z celów projektu było m.in. opracowanie i wykonanie nowej generacji przyczepki dynamometrycznej o roboczej nazwie SRT-4 służącej do prowadzenia prac badawczych i rozwojowych związanych z pomiarami charakterystyk przyczepności wzdłużnej zarówno różnych opon samochodowych jak i różnych nawierzchni drogowych. Poniżej zaprezentowano nowy zestaw pomiarowy i przedstawiono wyniki badań będących wstępem do oceny warunków bezpieczeństwa ruchu na polskich drogach.

2. PREZENTACJA ZESTAWU POMIAROWEGO SRT-4

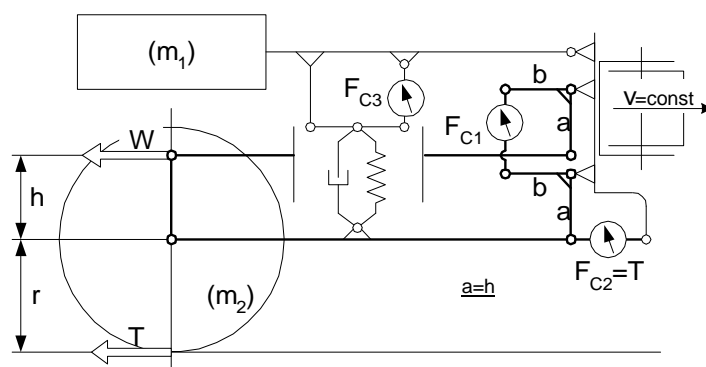
Na rys. 1 oraz 3 zaprezentowano nowy zestaw pomiarowy SRT-4 służący do badania zarówno przyczepności nawierzchni drogowych jak i właściwości antypoślizgowych różnych opon samochodowych. Cechami, odróżniającymi go od poprzedniego układu pomiarowego są:



Rys.1. Zestaw pomiarowy SRT-4

- pojazd ciągnący w postaci mercedesa sprintera,
- przyczepka dynamometryczna o zmiennym wymiarze ogumienia od 14 do 17 cali i zmiennym obciążeniu koła pomiarowego,
- rozszerzony układ pomiarowo-sterujący PCI-EPP,
- system GPS wspomagający lokalizację punktów pomiarowych,
- oprogramowanie pomiarowo-sterujące pozwalające m.in. na wyznaczenie pełnych charakterystyki przyczepności $\mu(s)$.

Niezmienionym pozostał oryginalny schemat kinematyczny przyczepki dynamometrycznej, opracowany w pierwszej połowie lat sześćdziesiątych przez dr inż. Stanisława Kowalskiego i prof. Edwarda Habicha (rys. 2). Charakterystyczną cechą tego układu jest dwuwahaczowe (dwudrażkowe) prowadzenie koła pomiarowego z dwudźwigniowym układem sprzęgająco-wyrównowazającym. Układ ten zapewnia możliwość pomiaru siły tarcia T między kołem pomiarowym a nawierzchnią w każdych warunkach ruchu, zarówno w fazie swobodnego toczenia, jak i przy przyhamowywaniu (zwalnianiu) koła pomiarowego lub przy całkowitej jego blokadzie.



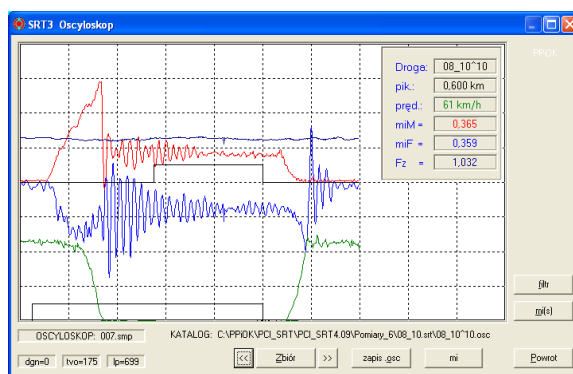
Rys. 2. Schemat kinematyczny przyczepki SRT-3 i SRT-4



Rys. 3. Przyczepka dynamometryczna zestawu pomiarowego SRT-4

Z układem dźwigniowym związane są dwa tory pomiarowe (czujniki pomiarowe). Pierwszy z nich F_{C1} - mierzy moment hamujący $W \cdot h$ na tarczy hamulcowej, drugi F_{C2} – siłę tarcia T w styku koła z jezdnią. W momencie całkowitego zablokowania koła pomiarowego oba czujniki mierzą (w odpowiedniej skali) tę samą siłę, co stwarza możliwość kontroli poprawności działania układu pomiarowego w warunkach trakcyjnych. Dodatkowy tor pomiarowy F_{C3} mierzący dynamiczne obciążenie koła F_z w czasie pomiarów, został wprowadzony przez dr inż. Bogumiła Szwabika i mgr inż. Janusza Pokorskiego do zestawów SRT-3 w pierwszej połowie lat dziewięćdziesiątych. Tor ten pozwala wprowadzić korektę obciążenia normalnego koła pomiarowego w czasie jazdy, co ma istotne znaczenie jedynie przy pomiarach na wyjątkowo nierównych drogach.

Na rys. 4 przedstawiono przebieg procesu pomiarowego podczas hamowania koła przyczepki dynamometrycznej przy ustalonej prędkości zestawu badawczego v_s wynoszącej 60 km/h.



Rys. 4. Przebieg procesu hamowania przyczepki dynamometrycznej

Poszczególne linie oznaczają:

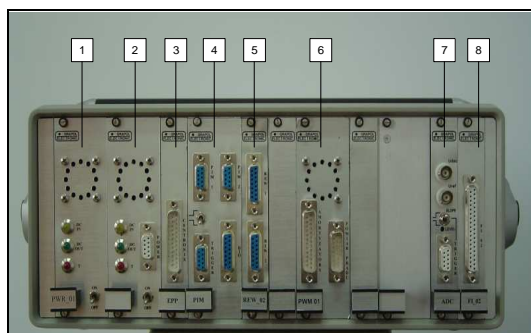
- zielona linia - prędkość obwodowa v_k hamowanego koła,
- czerwona linia - moment hamujący W (czujnik F_{C1}),
- niebieska linia - siła tarcia T (czujnik F_{C2}),
- szara - siła normalna F_z obciążająca koło pomiarowe,
- czarna (górna) - przedział czasu, w którym wyznaczone są uśrednione wartości współczynnika przyczepności μ_M oraz μ_T ,
- czarna (dolna) - przedział czasu, w którym lana jest woda pod koło pomiarowe.

Uśrednione wartości współczynników przyczepności koła do nawierzchni drogi wyznaczone są z zależności:

$$\mu_M = W/F_z, \quad \mu_T = T/F_z. \quad (1)$$

Przy całkowicie zablokowanym kole obydwie wartości powinny być sobie równe. Dopuszczalna odchyłka, decydująca o przydatności wykonanego pomiaru nie może przekraczać wartości $\Delta\mu=0.05$. Należy podkreślić, że zestawy SRT-3 oraz SRT-4 zostały wyposażone w system dynamicznego pomiaru siły wleczenia koła pomiarowego, co znacznie poprawia zgodność wyników pochodzących z obu kanałów pomiarowych.

Na rys. 5 zamieszczono zdjęcie ilustrujące nowy układ pomiarowo-sterujący zastosowany w zestawie SRT-4.

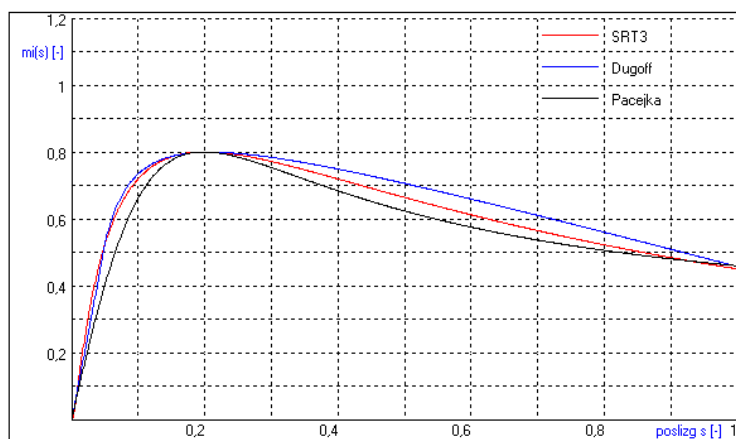


Rys. 5. Układ pomiarowo-sterujący PCI-EPP zestawu SRT-4

Układ PCI-EPP posiada budowę modułową. Ułatwia to rozbudowę i modyfikację zespołu pomiarowo-sterującego. Moduły 1 i 2 stanowią przetwornice zasilające moduły funkcyjne i komputer pomiarowy. Moduł 3 jest interfejs'em sprzęgającym z komputerem pomiarowym. Moduły 4 i 5 – służą do pomiaru drogi i prędkości zestawu pomiarowego v_s i koła pomiarowego v_k . Moduł 6 obsługuje pneumatyczne zawory elektro-magnetyczne sterujące układem hamulcowym i wypływem wody oraz zaworem proporcjonalnym

sterującym przebiegiem ciśnienia hamowania. Moduły 7 i 8 stanowią zespół wzmacniaczy czujników pomiarowych oraz przetwornika analogowo-cyfrowego.

Rys. 6 przedstawia pełną charakterystykę przyczepności $\mu(s)$ uzyskaną z pojedynczego hamowania koła pomiarowego przyczepki dynamometrycznej SRT-4 (linia koloru czerwonego). Jest to szczególna własność, której praktycznie nie posiadają żadne inne układy pomiarowe. Możliwość uzyskiwania takiej charakterystyki z jednego testu hamowania wynika z oryginalnego schematu kinematycznego tej przyczepki. Dla porównania linią czarną zaznaczono odpowiednią charakterystykę wyznaczoną przy zastosowaniu modelu Pacejki [7] oraz modelu Dugoffa (linia niebieska). Modele te wymagają dysponowania wartościami wielu, trudno dostępnych i skomplikowanych pomiarowo parametrów.

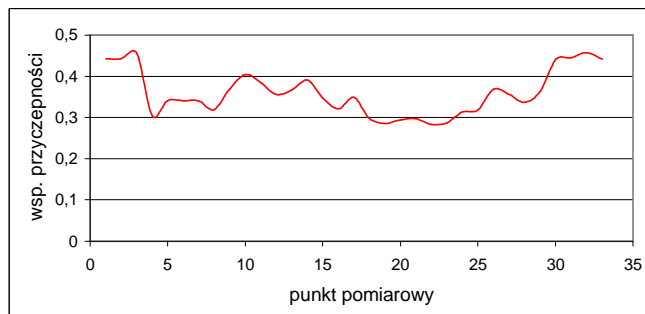


Rys. 6. Pełna charakterystyka przyczepności nawierzchni drogowej $\mu(s)$

Zestawy pomiarowe wykonujące masowe badania przyczepności nawierzchni na drogach krajowych wykorzystują system punktów referencyjnych do lokalizacji miejsca wykonanych pomiarów. System ten jednak dotyczy jedynie dróg pozamiejskich. Wychodząc naprzeciw potrzebom lokalizacji punktów pomiarowych na innych drogach, układ pomiarowy SRT został uzupełniony o system nawigacji satelitarnej GPS.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyłącznie wartości współczynnika przyczepności poślizgowej, tzn. przy wartości poślizgu wzdłużnego $s=1$.

Rys. 7 ilustruje zmienność współczynnika przyczepności na odcinku testowym w Warszawie, a rys. 8 wskazuje miejsca tych pomiarów.



Rys. 7. Zmienność współczynnika przyczepności na odcinku testowym (rys.8); $\mu_M=0.36$



Rys. 8. Lokalizacja punktów pomiarowych przy wykorzystaniu GPS

3. TECHNOLOGIA WARSTWY WIERZCHNIEJ A WSPÓŁCZYNNIK PRZYCZEPNOŚCI

Dla zilustrowania wybranych wyników pomiarów wykonanych przy użyciu zestawu pomiarowego SRT-4 w kolejnych rozdziałach omówiono zróżnicowanie wartości współczynnika przyczepności na różnych nawierzchniach i na różnych odcinkach pomiarowych. Pełne wyniki pomiarów są dostępne w Pracowni Pomiarów i Obliczeń Komputerowych (PPiOK) Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej. W Tabeli 1 zamieszczono wartości współczynników przyczepności dla kilku różnych rodzajów warstwy wierzchniej.

Tab. 1. Współczynniki przyczepności μ_M dla różnych nawierzchni drogowych

	Typ nawierzchni	Współczynnik przyczepności	Lokalizacja
1	boksyty spiekane	0.86	Poznań
2	pojedyncze pow. utrwalenie	0.71	Wola Młocka-Płociszewo
3	SMA – nowa nawierzchnia	0.54	Wyszków
4	podwójne pow. utrwalenie	0.53	Ciemińsko-Nasierowo
5	beton cementowy	0.50	Polichno
6	SMA	0.48	Radzymin
7	SMA – stara nawierzchnia	0.33	Warszawa

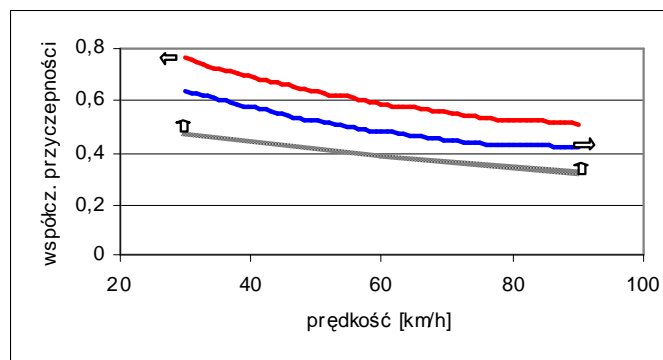
Należy wyraźnie podkreślić, że wszystkie prezentowane w artykule wyniki dotyczą pomiarów na mokro – za wyjątkiem Tabeli 4. Jeżeli wyraźnie nie zaznaczono, prędkość pomiarowa wynosiła $v_s=60$ km/h. Omawiane pomiary zostały wykonane we wrześniu 2009 r.

Największe przyczepności wykazują nawierzchnie z boksytów spiekanych. Wartości współczynnika przyczepności na mokro sięgają tu $\mu_M=0.86$ i są większe od odpowiednich wartości na sucho dla powszechnie stosowanych nawierzchni wykonanych w technologii SMA (por. Tab. 4). Technologia boksytów spiekanych jest dzisiaj jednak praktycznie nieobecna na drogach krajowych. Stosunkowo wysokie wartości przyczepności wykazują nawierzchnie z powierzchniowym utrwaleniem – w przedziale $\mu_M=0.53...0.71$. Nawierzchnie te stosowane są jedynie jako tymczasowe i to wyłącznie na drogach lokalnych. Powszechnie stosowana na drogach krajowych technologia SMA wykazuje duży rozrzut przyczepności – w przedziale $\mu_M=0.33...0.54$. Nawierzchnie z betonu cementowego wykazują stosunkowo dobrą przyczepność ($\mu_M=0.50$) pod warunkiem zastosowania technologii „ryflowania”. Należy wyraźnie zaznaczyć, że wartość współczynnika przyczepności zależy od wielu czynników, m.in. czasu eksploatacji nawierzchni, natężenia ruchu, pasa ruchu na danej drodze [6], pory roku i oczywiście prędkości ślizgania koła w czasie hamowania.

W Tabeli 2 zamieszczono bardziej szczegółowe wyniki pomiarów na nowej drodze wykonanej w technologii SMA. Rys. 9 przedstawia tzw. charakterystykę prędkościową dla omawianego odcinka.

Tab. 2. Współczynniki przyczepności μ_M dla SMA na odcinku 3 (patrz Tab.1)

prędkość [km/h]	lewy pas ->Warszawa	prawy pas -> Białystok
30	0.64	0.76
60	0.48	0.59
90	0.42	0.51



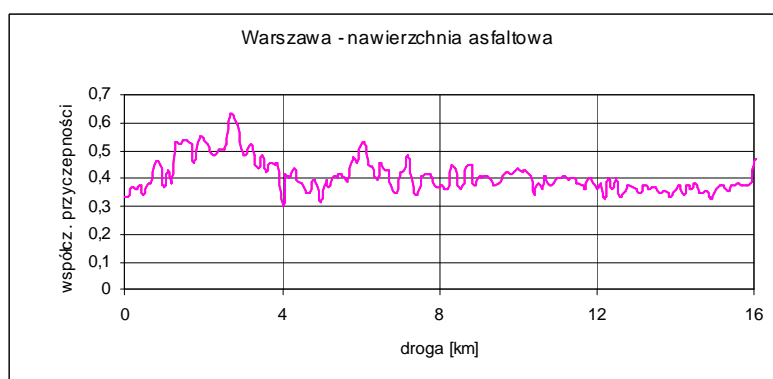
Rys. 9. Charakterystyka prędkościowa przyczepności dla odcinka 3 (patrz Tab.1); czerwona linia – lewy pas, niebieska linia – prawy pas, czarna linia – minimalne wartości dla dróg krajowych [12]

Zwraca uwagę zróżnicowanie wartości współczynnika przyczepności w zależności od kierunku ruchu. Najczęściej lewy pas ma większą przyczepność od pasa prawego. Ze wzrostem prędkości ślizgania znacznie maleje wartość współczynnika przyczepności.

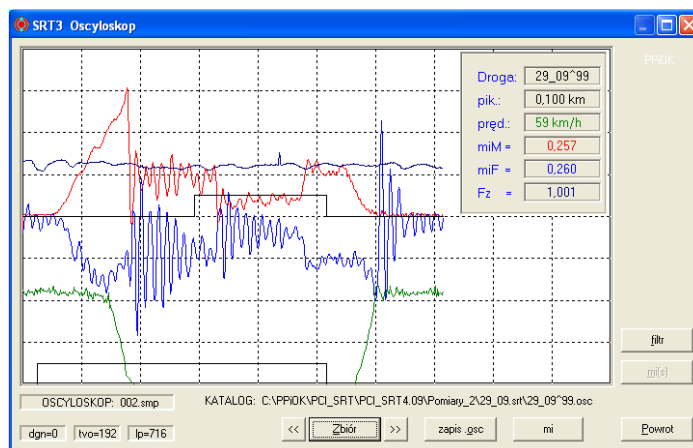
4. ZRÓŻNICOWANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZYCZEPNOŚCI W WARSZAWIE

4.1. Ulice warszawskie

Dla zilustrowania zróżnicowania przyczepności na wybranych głównych warszawskich arteriach komunikacyjnych zamieszczono rys. 10. Wartość średnia współczynnika przyczepności wynosi $\mu_M=0.41$. Maksymalne przyczepności mogą lokalnie przyjmować wartości na poziomie $\mu_M=0.6$, minimalne $\mu_M=0.3$. Rozpiętość między wartością minimalną



Rys. 10. Zmienność współczynnika przyczepności na testowanych ulicach Warszawy; $\mu_M=0.41$



Rys. 11. Przykład skokowej zmiany współczynnika przyczepności

a wartością maksymalną jest więc dwukrotna. Podobną zależność można zaobserwować na odcinku przestawionym na rys. 7. Na rys. 11 przedstawiono oscylogram pomiaru, podczas którego nastąpiła skokowa zmiana współczynnika przyczepności. Nastąpiło to w wyniku najechania w czasie pomiarów na linię rozdzielającą pasy ruchu.

4.2. Mosty warszawskie

Zróżnicowanie przyczepności na warszawskich mostach ilustruje Tabela 3. Rozpiętość między minimalną i maksymalną przyczepnością jest tu nieco mniejsza niż na głównych arteriach komunikacyjnych Warszawy. Zwraca jednak uwagę stosunkowo mała przyczepność na mokro na najnowszym z nich – na moście Siekierkowskim. Przyczepność na sucho na tym moście jest prawie dwukrotnie większa (Tab. 4).

Tab. 3. Współczynniki przyczepności nawierzchni μ_M mostów warszawskich

most	kier. Centrum	kier. Praga	wart. średnia
Świętokrzyski	0.47 LP	0.43 PP	0.45
Poniatowskiego	0.49 LP	0.39 PP	0.44
Łazienkowski	0.42 LP	0.40 PP	0.41
Śląsko-Dąbrowski	0.42 .	0.38 .	0.40
Siekierkowski	0.38 ŚP	0.36 PP	0.37
Grota-Roweckiego	0.34 ŚP	0.35 PP	0.35

LP-lewy pas, PP-prawy pas, ŚP-środkowy pas

Tab. 4. Most Siekierkowski

μ_M na mokro	μ_M na sucho
0.37 ŚP	0.72 ŚP

5. TRASY WYLOTOWE Z WARSZAWY

W Tabeli 5 zamieszczono wyniki pomiarów współczynnika przyczepności na kilku trasach wylotowych z Warszawy.

Tab. 5. Współczynniki przyczepności μ_M na wybranych odcinkach tras wylotowych z Warszawy

trasa	kierunek do Warszawy	kierunek od Warszawy	wartość średnia μ_M
Warszawa - Białystok	0.48 PP	0.59 LP	0.54
Warszawa - Gdańsk	0.44 LP	0.46 LP	0.45
Warszawa - Katowice	0.48 PP	0.41 LP	0.45
Warszawa - Kraków	0.38 LP	0.37 PP	0.38

Zwraca uwagę niska przyczepność na trasie Warszawa – Kraków. Jest ona na granicy wartości określonych w rozporządzeniu [12].

6. UWAGI KOŃCOWE

Zaprezentowane wyniki pomiarów współczynnika przyczepności wskazują na duże zróżnicowanie jego wartości w zależności od miejsca pomiaru, warunków ruchu, czasu eksploatacji nawierzchni i szeregu innych, bliżej nieokreślonych czynników. Dlatego przy szacowaniu jego wartości dla odtwarzania sytuacji przedwypadkowych dla celów np. ekspertyz sądowych należy zachować daleko idącą ostrożność. Najwłaściwszym rozwiązaniem wydaje się być wykonanie pomiarów współczynnika przyczepności przy pomocy zestawu pomiarowego SRT-4 wyposażonego w miarę możliwości w ogumienie pojazdu biorącego udział w kolizji drogowej. Przy symulacji nieustalonego ruchu pojazdów niezbędnym jest wykorzystanie pełnej charakterystyki przyczepności $\mu(s)$ możliwej do sporządzenia w konkretnym miejscu wypadku.

Przedstawione powyżej wyniki badań stanowią rezultaty realizacji projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N509 028 31/1417.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Antle Ch.E., Wambold J.C., Henry J.J.: *"International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid_resistance Measurement"*. PIARC Technical Committee on Surface Characteristics C1.1995.
- [2] Szwabik B., Pokorski J., Hanula J.: *"Zestawy pomiarowe SRT-3 – podstawowe urządzenia do badania przyczepności nawierzchni drogowych w Polsce"*. Seminarium Naukowo-Techniczne „Diagnostyka i ocen stanu dróg”. Materiały Konferencyjne s.339-348. Politechnika Szczecińska. Szczecin 3-4 kwietnia 1997.
- [3] Szwabik B., Mechowski T., Pokorski J.: *„Effective Method of Determining Dynamic Characteristics of Road Pavement Friction”*. Międzynarodowa Konferencja „2nd Euraspalt & Eurobitume Congress”, Barcelona 2000, Book I p.855-861.
- [4] Szwabik B., Pokorski J.: *„W poszukiwaniu rzeczywistej skali oceny własności przeciwpoślizgowych opon samochodowych i nawierzchni drogowych”*. Elastomery T4 (2000) nr 2-3, s.45-51. Wyd. Instytut Przemysłu Gumowego, 2000r.
- [5] Pokorski J., Szwabik B.: *”Doświadczalne i obliczeniowe charakterystyki przyczepności opon samochodowych i nawierzchni drogowych”*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 3(42)/2001, s.73-84. Politechnika Warszawska, 2001r.
- [6] Pokorski J., Szwabik B.: *„Zmienność współczynnika przyczepności w przekroju poprzecznym i podłużnym drogi”*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(40)/2001, s.157-169. Politechnika Warszawska, 2001r.
- [7] Pacejka H.B.: *Tyre and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann 2002. ISBN 0 7506 5141 5.
- [8] Luty W., Prochowski L.: *”Modelowanie charakterystyk przyczepności ogumienia samochodów ciężarowych”*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(44)/2002, s.37-47. Politechnika Warszawska, 2002r.
- [9] Grzesikiewicz W., Pokorski J., Szwabik B.: *„Modelowanie i badania eksperymentalne przyczepności hamowanego koła”*. Przegląd Mechaniczny, Rok Wyd. LXII, Zeszyt 10/2003, str.73-77.
- [10] Grzesikiewicz W., Pokorski J.: *„Modeling of Tangential Interaction between Braking Wheel and Road Pavement in Aspect of Friction Coefficient Measurement”*. Materiały z X Międzynarodowej Konferencji „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, s.585-592. Kielce 2004, IBDiM 2004r.
- [11] Grzesikiewicz W., Pokorski J.: *„Modelowanie i symulacja cyfrowa zestawu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk przyczepności opon samochodowych i nawierzchni drogowych”*. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa nt.: „Badania Symulacyjne w Technice Samochodowej”. Kazimierz Dolny 2005.
- [12] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999r w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dziennik Ustaw nr 43, Poz. 430.