



KATARZYNA
ŁADKIEWICZ-KROCHMAL
kladkiewicz@gddkia.gov.pl

Współczynnik tarcia nawierzchni – analiza zagadnień, urządzenia pomiarowe

Na świecie znanych jest wiele metod i urządzeń do oceny właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych. Urządzenia te wykazują różnice w budowie. Można tu wspomnieć o sposobie montażu koła pomiarowego, rodzaju i rozmiarze zastosowanej opony pomiarowej, wartości stopnia poślizgu koła względem nawierzchni czy ciśnieniu w oponie. Powoduje to, że wyniki z pomiarów różnymi urządzeniami nie są ze sobą w pełni porównywalne oraz nie można ich odnosić do tych samych wymagań. Nie bez znaczenia dla właściwości przeciwpoślizgowych pozostaje także wpływ czynników zewnętrznych, do których zalicza się obecność zanieczyszczeń czy panujące warunki atmosferyczne. Ich różnorodność powoduje, że nie ma uniwersalnego modelu w pełni opisującego zjawiska zachodzące na styku opony i nawierzchni. Z tego powodu, aby prawidłowo ocenić otrzymany wynik współczynnika tarcia, należy wiedzieć jakim urządzeniem badanie zostało wykonane oraz jakie dokładnie panowały warunki w trakcie realizacji pomiarów terenowych.

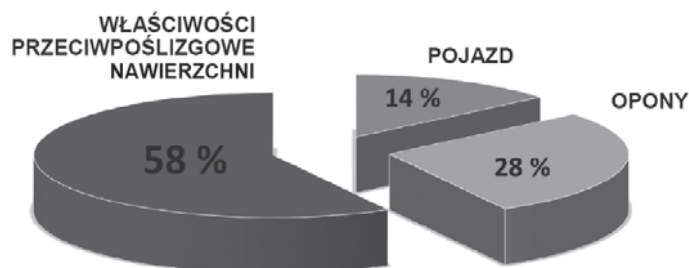
Współcześnie ogromny nacisk kładzie się na poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego. Jest to podyktowane wysokimi kosztami społecznymi i materialnymi, jakie niosą ze sobą zaistniałe zdarzenia. Patrząc na właściwości przeciwpoślizgowe z punktu widzenia bezpieczeństwa, ich ocena jest niezbędna do zapewnienia odpowiedniej charakterystyki nawierzchni drogowej. Na suchej i czystej nawierzchni siły tarcia są wystarczająco duże do zapewnienia bezpiecznej jazdy. W warunkach mokrej nawierzchni przyczepność pomiędzy nawierzchnią a oponą pojazdu ulega zmniejszeniu. Badania prowadzone w innych krajach wskazały na istnienie zależności pomiędzy obniżeniem współczynnika tarcia a wzrostem liczby wypadków na mokrych nawierzchniach. Powoduje to konieczność monitorowania zmian właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych w procesie ich eksploatacji.

W artykule szczegółowo zdefiniowano oraz omówiono pojęcia „właściwości przeciwpoślizgowych” i „współczynnika

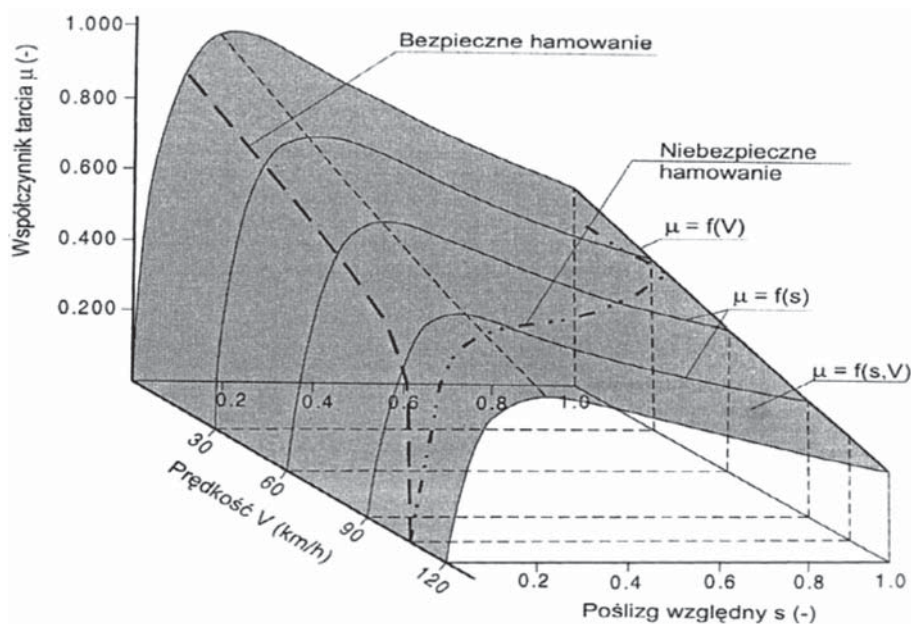
tarcia” wraz z wyjaśnieniem mechanizmu tarcia oraz podaniem czynników wpływających na wielkość tego zjawiska. Artykuł opracowano wykorzystując fragmenty pracy autorki [18].

Właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni drogowych

Nawierzchnia drogową, tak jak wszystkie inne obiekty, jest postrzegana poprzez pewne cechy. Jedną z podstawowych cech nawierzchni są właściwości przeciwpoślizgowe.



Rys. 1. Główne czynniki wpływające na długość drogi hamowania (źródło: [20])



Rys. 2. Funkcja przestrzenna współczynnika tarcia w zależności od prędkości i od wielkości (stopnia) poślizgu (źródło: [10] za: Sandecki, 2017)

Charakteryzują one przyczepność pomiędzy nawierzchnią a oponą pojazdu, odgrywając istotną rolę w procesie zapewnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego, wpływając na długość drogi hamowania (rys. 1).

Na świecie od wielu lat prowadzone są badania mające na celu określenie wpływu właściwości przeciwpoślizgowych na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Przegląd literatury i badań dokonany przez Cairney [1] dowodzi, że niskie właściwości przeciwpoślizgowe są bezpośrednio związane ze wzrostem liczby wypadków drogowych, głównie na mokrej nawierzchni. Co więcej, ocenia się, że liczba wypadków drogowych wzrasta po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości współczynnika tarcia [24].

Współczynnik tarcia jako miara właściwości przeciwpoślizgowych

Podstawowym parametrem charakteryzującym w sposób sformalizowany właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni jest bezwymiarowy współczynnik zwany współczynnikiem tarcia μ . Z definicji jest to stosunek wypadkowej sił stycznych F , rozwijanych między kołami poruszającego się pojazdu, a nawierzchnią drogi do wypadkowej reakcji normalnych Q . Jego pomiar opiera się na symulacji wystąpienia warunku poślizgu na mokrej nawierzchni, jako najbardziej niekorzystnego z punktu widzenia przyczepności kół pojazdu. Jest to o tyle istotne, że im większy współczynnik tarcia, tym skuteczniejsze hamowanie i krótszy dystans potrzebny do zatrzymania samochodu. Zależność współczynnika tarcia od prędkości i od wielkości (stopnia) poślizgu zilustrowano na rysunku 2.

Mechanizm tarcia

Siły tarcia postrzegane są jako suma zjawisk adhezji i histerezy zachodzących na styku powierzchni opony z nawierzchnią, której geometrię opisuje tekstura (rys. 3a i 3b). Adhezyjny składnik tarcia powstaje w wyniku oddziaływań molekularnych opony z nawierzchnią. Wyróżnia się tu znaczenie mikrotekstury, ponieważ siły adhezji są rozwijane na styku opony i powierzchni wystających grubych

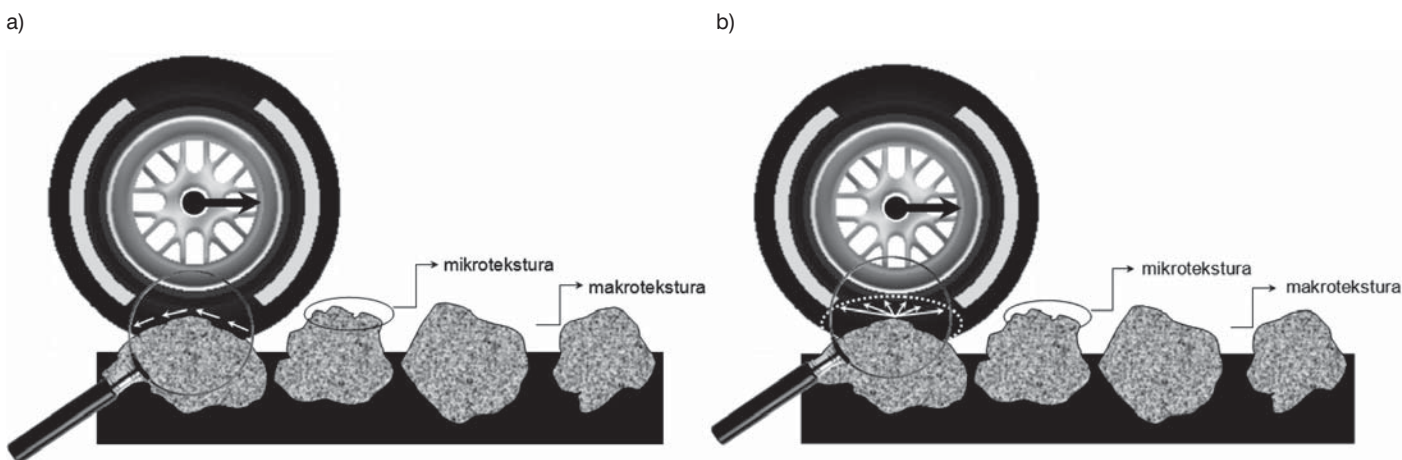
ziaren kruszywa nawierzchni. Na suchej jezdni około 90% sił przyczepności stanowi adhezja [16]. Oddziaływanie to zmniejsza się wraz z obecnością zanieczyszczeń lub wody, które działają jak warstwa poślizgowa zmniejszając kontakt opon pojazdu z powierzchnią nawierzchni. W przeciwieństwie do tego, siły histerezy związane są nierównościami spowodowanymi wystającymi ziarnami kruszywa opisywanymi za pomocą makrotekstury. Makrotekstura wpływa na deformację opony (kompresję i rozciąganie) wokół wypukłości i zagłębień, dzięki którym wyzwala się energia w postaci ciepła. Ta właściwość opon polegająca na rozpraszaniu pewnej części energii odkształcenia nazywana jest histerezą. Tarcie powstające w następstwie tego mechanizmu nazywamy tarcie odkształceniowym [14]. Przyjmuje się, że adhezja odpowiada za tarcie na suchych nawierzchniach, natomiast histereza jest dominującym składnikiem tarcia na nawierzchniach mokrych [5].

Czynniki wpływające na wartość współczynnika tarcia

Współczynnik tarcia nawierzchni jest wielkością charakteryzującą siły tarcia, które są wrażliwe na wiele czynników trudnych do kontrolowania. Główne czynniki, przedstawiono w tabeli 1 oraz omówiono w dalszej części artykułu. Ponieważ każdy czynnik z tej tabeli odgrywa rolę w definiowaniu tarcia nawierzchni, tarcie musi być postrzegane jako proces. Ostateczna wartość, którą przybiera tarcie jest sumą wielu czynników działających równocześnie.

• właściwości opon

Aktywowanie mechanizmów przylegania powierzchni opony do drogi związanych ze zjawiskiem tarcia następuje w momencie styku opony z nawierzchnią. Pod wpływem wody np. opadów atmosferycznych, siła adhezji maleje i rośnie zagrożenie wystąpienia zjawiska aquaplaningu. Zjawisko to zależy od prędkości pojazdu, ale również od właściwości opony. Badania przeprowadzone w latach 80. przez Czasownikowa i Wasiliewa oraz późniejsze analizy wykonane przez specjalistów z firmy Pirelli dowiodły, że istnieje zależność między prędkością aquaplaningu a ciśnieniem po-



Rys. 3. Schematyczny model interakcji opony i nawierzchni drogi uwzględniający zjawisko: a) adhezji; b) histerezy (opracowanie własne na podstawie [14])

Tabela 1. Czynniki wpływające na właściwości przeciwpoślizgowe (opracowanie własne na podstawie: [5] i [13])

Charakterystyka nawierzchni	Parametry ruchowe i techniczne pojazdu	Warunki środowiskowe
Stan techniczny nawierzchni · nierówności podłużne · koleiny	Stan ogumienia · głębokość i rzeźba bieżnika · szerokość opon · skład gumy i twardość · ciśnienie powietrza · temperatura	Warunki atmosferyczne · temperatura · woda (opady deszczu, kondensacja) · śnieg, lód
Rodzaj nawierzchni i jej charakterystyka materiałowa · typ mieszanki mineralno-asfaltowej · uziarnienie · odporność kruszywa na polerowanie · technika teksturowania	Prędkość pojazdu	Zanieczyszczenia · pył i piasek · ciecze ropopochodne · środki odladzające
Tekstura · mikrotekstura · makrotekstura · megatekstura		

wietrza w oponie i cechami charakterystycznymi opony takimi jak: głębokość i rzeźba bieżnika oraz szerokość opony odpowiedzialne za wielkość strefy kontaktu z nawierzchnią [16]. Parametry te w połączeniu z parametrami technicznymi pojazdu są jednak trudne do ujęcia w matematyczne zależności, w rezultacie czego zmiana współczynnika tarcia jest trudna do opisanie w sposób ilościowy. Przyjmuje się jednak, że im większe trudności z odprowadzeniem wody i/lub mniejsza powierzchnia styku opony z nawierzchnią, tym działa mniejsza siła tarcia. W konsekwencji zmniejszeniu ulega również współczynnik tarcia.

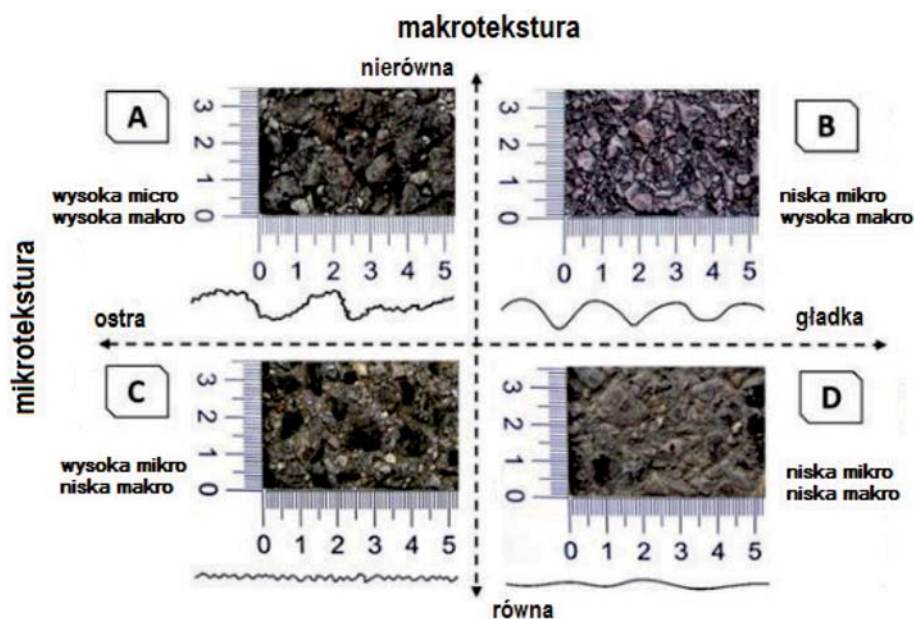
Mówiąc o właściwościach opony należy zwrócić również uwagę na zmianę jej właściwości wraz z upływem czasu. Jest to spowodowane starzeniem się gumy, z której została wykonana. W wyniku starzenia opona twardnieje, a współczynnik tarcia maleje.

• charakterystyka nawierzchni

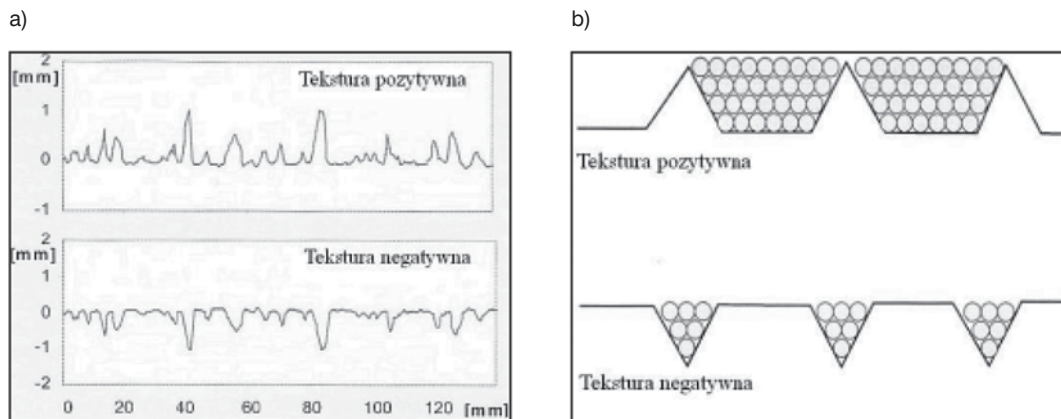
Z opublikowanej dotychczas literatury wynika, że właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni zmieniają się w procesie jej eksploatacji wskutek oddziaływania ruchu pojazdów. Wielkość zmian uzależniona jest w znacznym stopniu od rodzaju zastosowanych mieszanek mineralno-asfaltowych, uziarnienia i odporności użytego kruszywa na polerowanie. Największa intensywność zmian współczynnika tarcia jest rejestrowana w początkowym etapie użytkowania nawierzchni drogowych i dopiero po tym okresie następuje jego ustabilizowanie. Jak zauważono w pracy badawczej TD-88 [7] ustabilizowanie się współczynnika tarcia na pewnym poziomie na nawierzchniach asfaltowych następuje dopiero po zderzeniu cienkiej warstwy asfaltu, a następnie wypolerowaniu wystających ziaren kruszyw grubych. Osiągnięcie takiego stanu jest uzależnione od technologii wykonania warstwy ścieralnej, natę-

żenia i kategorii ruchu oraz elementu układu drogowego. W przypadku nawierzchni betonowych zachodzące zmiany są uwarunkowane również techniką teksturowania ich powierzchni.

Z charakterystyką zastosowanego kruszywa i etapem budowy drogi związane jest zagadnienie tekstury nawierzchni. Nawierzchnię w zależności od rodzaju tekstury można zaliczyć do jednej z czterech kategorii (rys. 4). Wyróżnia się tu znaczenie mikrotekstury i makrotekstury, które prawidłowo dobrane wpływają na poprawę przyczepności w płaszczyźnie opona–nawierzchnia. Mikroteksturę stanowią drobne nierówności o długości fal poniżej 0,5 mm, spowodowane chropowatością powierzchni wystających grubych ziaren. Wielkość mikrotekstury zależy od początkowej chropowatości powierzchni ziarna oraz od jego odporności na polerowanie, działanie czynników ruchu i środowiska. Mikrotekstura jest odpowiedzialna za przerwanie cienkiego filmu wodnego na mokrej nawierzchni i utworzenie strefy suchego kontaktu na styku opony z nawierzchnią oraz zapewnienie odpowied-



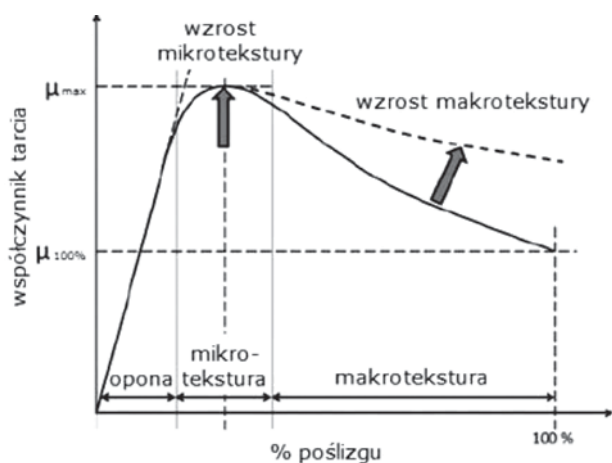
Rys. 4. Rodzaje tekstury nawierzchni drogowych (źródło: [12])



Rys. 5. Przykłady pozytywnej i negatywnej makrotekstury nawierzchni: a) rzeczywista tekstura, b) model tekstury (źródło: [4])

niego tarcia pomiędzy kołem a nawierzchnią w wyniku wzajemnego oddziaływania międzycząsteczkowego. W przypadku makrotekstury tworzą ją nierówności w zakresie długości fal 0,5–50 mm spowodowane wystającymi ziarnami kruszywa. Makrotekstura zależy od składu materiału, z którego jest wykonana warstwa ścieralna oraz od technologii jej wbudowania. W warunkach mokrej nawierzchni odpowiada za jej drenaż. Z punktu widzenia współpracy opon samochodowych z nawierzchnią istotną rolę odgrywa tzw. kierunkowość makrotekstury związana z użytą technologią lub materiałami nawierzchni: pozytywna lub negatywna (rys. nr 5a i 5b). Przy tej samej głębokości, makrotekstura pozytywna ma nieznacznie wyższy współczynnik tarcia i nieco niższą zależność prędkości od współczynnika tarcia niż makrotekstura negatywna [10].

Ueckermann i inni wskazują, że mikrotekstura wpływa na maksymalną wartość współczynnika tarcia, podczas gdy makrotekstura reguluje spadek współczynnika tarcia w końcowej fazie hamowania pojazdu [17]. Spadek współczynnika tarcia jest tym mniejszy, im makrotekstura jest większa (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ tekstury nawierzchni na współczynnik tarcia (źródło: [10])

Pośredni wpływ na wartość współczynnika tarcia przypisuje się megateksturze, która określa odchylenie po-

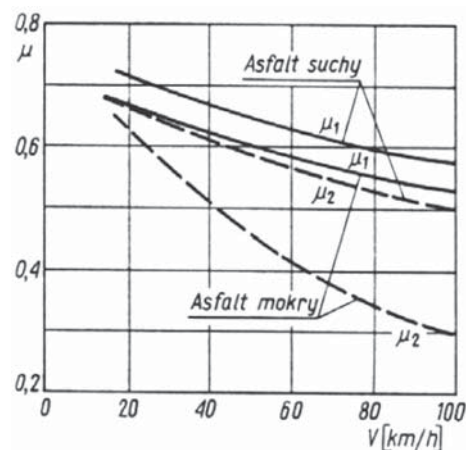
wierzchni nawierzchni od rzeczywiście płaskiej powierzchni w zakresie długości fali od 50 mm do 500 mm. Niska megatekstura może wynikać np. z deformacji nawierzchni lub nieprawidłowej technologii budowy dróg. Utrudnia kontakt opony z nawierzchnią zmniejszając przyczepności na ich styku. Podobny wpływ wykazują nierówności podłużne nawierzchni, wskutek chwilowej utraty kontaktu opony z nawierzchnią

oraz nierówności poprzeczne (koleiny), w których zbiera się gruba warstwa wody.

• prędkość pojazdu i grubość filmu wodnego na powierzchni nawierzchni

W przypadku suchej nawierzchni współczynnik tarcia uwarunkowany jest charakterystyką nawierzchni i właściwościami gumy opony samochodowej. Jego wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości pojazdu, co zilustrowano na rysunku nr 7. Znaczący spadek związany jest przede wszystkim z pogorszeniem odprowadzania wody spod kół pojazdu przy dużych prędkościach. Wyjaśnienie tego procesu opiera się na koncepcji trzech stref kontaktu opony z mokrą nawierzchnią (rys. 8). Koncepcja ta po raz pierwszy została zasugerowana przez Gougha, a później rozszerzona przez Moore'a [3]. Strefy kontaktu definiowane są w następujący sposób:

- strefa pierwsza (1) – oponę od nawierzchni oddziela klin wody, a za jej odprowadzanie odpowiada bieżnik opony,
- strefa druga (2) – oponę od nawierzchni oddziela cienka warstwa wody, a za jej drenaż odpowiada tekstura nawierzchni,
- strefa trzecia (3) – tzw. „suchy kontakt” opony z nawierzchnią.



Rys. 7. Wpływ prędkości na wartość współczynnika tarcia (źródło: [23])



Rys. 8. Strefy kontaktu opony z mokrą nawierzchnią (źródło: [11])

Początkowo, gdy samochód porusza się z niewielką prędkością, przeważa strefa 3 tzw. „suchy kontakt”. W tej strefie dominują siły tarcia. Wraz ze wzrostem prędkości pojazdu, wielkość strefy 3 ulega zmniejszeniu z powodu niewystarczającego odprowadzania wody. Opona poruszająca się stosunkowo szybko nad „powierzchnią zalaną” powoduje, że woda gromadzi się na przedzie opony szybciej, niż ciężar auta jest w stanie ją wyprzeć. Uderzenie opony w zgromadzony klin wody powoduje, że ciśnienie hydrodynamiczne wody rośnie. Jeśli osiągnie większą wartość niż nacisk, jaki wywiera pojazd na nawierzchnię, to pod oponą gromadzi się cienka warstwa wody uniemożliwiająca zachowanie kontaktu opony z nawierzchnią. Następuje aquaplaning. Proces ten zilustrowano na rysunku 9.

• warunki środowiskowe

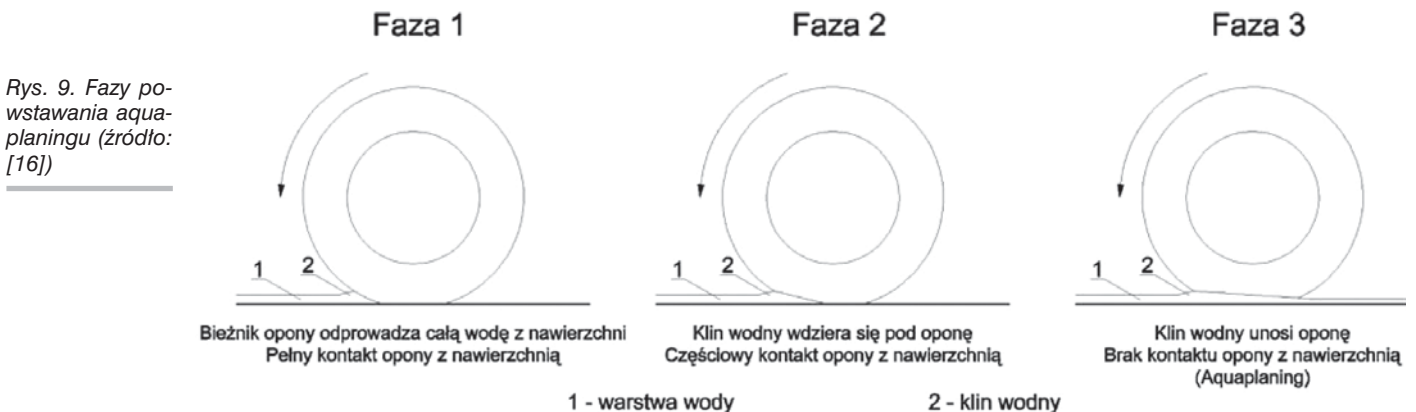
Dotychczasowe badania prowadzone na całym świecie w kierunku zrozumienia zjawisk zachodzących na styku opony z nawierzchnią pokazują, że wartości współczynnika tarcia związane są z warunkami otaczającego środowiska, takimi jak warunki atmosferyczne (temperatura, opady atmosferyczne) czy obecność zanieczyszczeń. Duże różnice

we właściwościach przeciwpoślizgowych poszczególnych nawierzchni obserwuje się po ich zawilgoceniu. Woda w postaci opadów deszczu lub kondensacji może działać jako warstwa poślizgowa, znacznie zmniejszając tarcie między oponą a nawierzchnią. Wpływ grubości warstwy wody na tarcie jest minimalny przy niskich prędkościach i dość wyraźny przy wyższych prędkościach (tab. 2). Oprócz wody (w tym lodu i śniegu), niekorzystny wpływ na tarcie nawierzchni będą miały wszelkie zanieczyszczenia na styku nawierzchni z oponą. Zanieczyszczenia nawierzchni w postaci np. pyłu czy drobnego piasku stanowią ciała obce, które w połączeniu z wodą tworzą warstwę poślizgową pomiędzy kołem a nawierzchnią, pogarszając właściwości przeciwpoślizgowe. Spadek współczynnika tarcia następuje na skutek zmniejszenia się sił tarcia. Analogiczny wpływ na właściwości przeciwpoślizgowe wykazują ciecze ropopochodne i chemiczne środki odładzające.

Przegląd literatury dokonany przez Luo w ramach pracy badawczej [6] wskazuje, że temperatura nie ma bezpośredniego wpływu na współczynnik tarcia, ale odpowiada za zmianę właściwości opon, które są materiałami lepkosprężystymi. Wyróżnia się tu znaczenie temperatury powietrza, powierzchni nawierzchni i opon, przy czym temperatury te są ze sobą silnie skorelowane. Poniżej przywołano przykładowe wyniki obserwacji prowadzonych przez różnych badaczy ujęte w pracy autorstwa Luo [6]. Kummer i Meyer w 1962 roku zauważyli, że wartość tarcia mierzona przy pomocy wahadła angielskiego spada w wyższych temperaturach. Zdaniem ich spadek współczynnika tarcia może być spowodowany wzrostem temperatury gumy okrywającej ślizgacz. Trend ten zgadza się z wynikami uzyskanymi

Tabela 2. Zmiany wartości współczynnika tarcia w zależności od warunków drogowych, stanu zużycia opon i prędkości jazdy (źródło: [21])

Prędkość jazdy [km/h]	Stan zużycia opony	Jezdnia sucha	Jezdnia mokra (warstwa wody 0,2 mm)	Silny deszcz (warstwa wody 1 mm)	Kałuze (warstwa wody 2 mm)	Jezdnia oblodzona
		μ_{HF}				
50	nowa	0,85	0,65	0,55	0,50	0,1 i mniej
	zużyta	1,00	0,50	0,40	0,25	
90	nowa	0,80	0,60	0,30	0,05	
	zużyta	0,95	0,20	0,10	0,00	
130	nowa	0,75	0,55	0,20	0,00	
	zużyta	0,90	0,20	0,10	0,00	



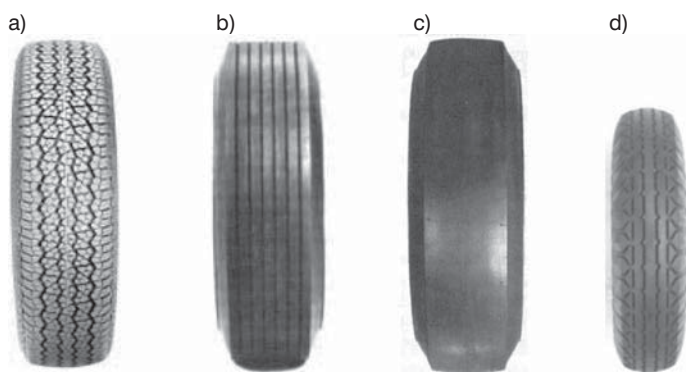
Rys. 9. Fazy powstawania aquaplaningu (źródło: [16])

przez Jayawickrama i Thomasa w 1997 roku, którzy zaszeregowali, że zmiany temperatury nie mają bezpośredniego wpływu na właściwości przeciwpoślizgowe, ale zmieniają właściwości opon. Wyższa temperatura sprawia, że opona jest bardziej elastyczna. Zmniejsza to straty energii opony związane z mechanizmem histerezy połączonym z zjawiskiem tarcia. W pomiarach wskaźnika szorstkości wykonywanych wahadłem angielskim największy wpływ temperatury na wielkość siły tarcia pomiędzy gumową nakładką ślizgacza a nawierzchnią obserwuje się w temperaturze poniżej 10°C.

Analizując wpływ warunków atmosferycznych na właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni należy uwzględnić możliwość zmian spowodowanych sezonową zmiennością. Na przykład warunki zimowe i związane z tym prace utrzymaniowe mogą zwiększać mikroteksturę nawierzchni. W rezultacie pomiary współczynnika tarcia wykonywane wiosną i wczesnym latem mogą dawać wyższe wartości niż wyniki pomiarów wykonanych późnym latem lub jesienią [9].

Urządzenia do pomiarów współczynnika tarcia nawierzchni

Pomiar współczynnika tarcia wykonuje się na nawierzchniach zwilżonych określoną ilością wody zgodnie z ustalonym w przypadku danego sprzętu pomiarowego sposobem pomiaru bazującym na podłużnej lub poprzecznej zasadzie tarcia. Na świecie do wykonywania pomiarów współczynnika tarcia stosowane są różne urządzenia pomiarowe różniące się między sobą konstrukcją, sposobem montażu koła pomiarowego, jego obciążeniem, wartością stopnia poślizgu s oraz rodzajem opony pomiarowej. Przykładowe opony pomiarowe przedstawiono na rysunku nr 10. Jak podaje Hall i inni, opony rowkowane wykazują mniejszą wrażliwość na zmienność warunków pomiaru i grubość warstwy wody, ale są wrażliwe na mikroteksturę nawierzchni, podczas gdy na opony gładkie w większym stopniu wpływa makrotekstura nawierzchni [5]. Badania przeprowadzone przez Departament Transportu Florydy (FDOT) wskazują, że ocena właściwości przeciwpoślizgowych z wykorzystaniem gładkiej opony zapewnia lepszy wskaźnik bezpieczeństwa niż pomiary z użyciem opon rowkowanych [8].



Rys. 10. Opony pomiarowe stosowane w pomiarach współczynnika tarcia nawierzchni: a) bieżnikowana ASTM E1136, b) rowkowana ASTM E501, c) gładka ASTM E524, d) bieżnikowana T49 – norma szwedzka (źródło: [9])

W zależności od sposobu pomiaru współczynnika tarcia wyróżnia się cztery grupy urządzeń mobilnych:

a) Urządzenia mierzące współczynnik tarcia poprzecznego (*Side-Force*).

Urządzenia tej grupy służą do pomiaru współczynnika tarcia poprzecznego w warunkach swobodnego toczzenia koła pomiarowego obróconego od kierunku ruchu o pewien kąt α . Współczynnik tarcia wyznaczany jest na podstawie porównania siły poprzecznej działającej na koło (lub koła, jeśli występują dwa koła pomiarowe) i obciążenia statycznego. Najbardziej rozpowszechnionym aparatem przystosowanym do ciągłych pomiarów współczynnika tarcia poprzecznego jest urządzenie SCRIM – *Side Force Coefficient Routine Investigation Machine*. Urządzenie mierzy siłę poprzecznego naporu, na jaki napotyka gładkie koło pomiarowe swobodnie toczące, odchyłone od kierunku ruchu o kąt $\alpha = 20^\circ$ przy poślizgu $s = 34\%$.

b) Urządzenia mierzące współczynnik tarcia podłużnego w warunkach ustalonego poślizgu s koła pomiarowego (*Fixed Slip*).

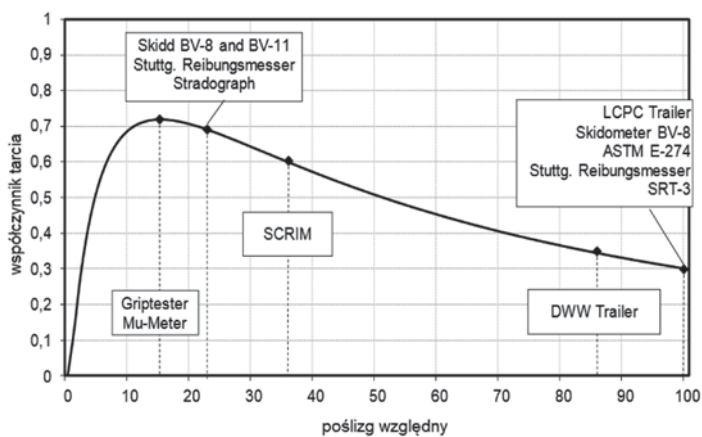
Urządzenia z grupy *Fixed Slip* mierzą współczynnik tarcia podłużnego w warunkach ustalonego poślizgu koła pomiarowego s wymuszonego kinematycznie lub hydraulicznie. Kąt odchylenia koła pomiarowego od kierunku ruchu wynosi zero. Współczynnik tarcia wyznaczany jest na podstawie porównania siły tarcia i obciążenia statycznego. Przykładowo urządzenie TWO (*Traction Watcher One*) norweskiej produkcji, do pomiaru współczynnika tarcia używa dwóch takich samych kół sprzężonych ze sobą przekładnią łańcuchową. Pierwsze z nich jest toczące swobodnie po nawierzchni z ustaloną, stałą prędkością z przedziału 5–100 km/h, a drugie obraca się z wymuszonym poślizgiem równym 17,8%.

c) Urządzenia pracujące ze zmiennym poślizgiem koła pomiarowego (*Variable Slip*).

Jest to charakterystyczna grupa urządzeń pomiarowych, która mierzy siły tarcia o zmiennym poślizgu, umożliwiając tym samym wykonywanie pomiarów w warunkach zbliżonych do działania systemu ABS.

d) Urządzenia wykonujące pomiar współczynnika tarcia podłużnego przy pełnej blokadzie koła pomiarowego $s = 100\%$ (*Locked Wheel*).

Urządzenia z grupy *Locked Wheel* wykonują pomiar współczynnika tarcia podłużnego przy pełnej blokadzie koła pomiarowego ($s = 100\%$) wymuszonej przez układ hamulcowy. Typowy zestaw pomiarowy składa się z pojazdu holującego oraz przyczepy pomiarowej jedno- lub dwukołowej. Przyczepa wyposażona jest w system dystrybucji wody połączony ze zbiornikiem wody umieszczonym na pojeździe ciągnącym. Pomiar wyzwala się w momencie osiągnięcia przez pojazd wymaganej prędkości. Zasadę pełnej blokady koła pomiarowego stosuje się w urządzeniach pomiarowych wykorzystywanych do pomiarów punktowych (nieciągłych).



Rys. 11. Zróżnicowanie metod pomiaru współczynnika tarcia w funkcji poślizgu względnego (źródło: [22])

W tabeli 3 zestawiono metody i urządzenia wraz z warunkami pomiaru współczynnika tarcia. Porównując wymienione grupy urządzeń pomiarowych, należy zaznaczyć, że różny stopień poślizgu powoduje, że każda z prezentowanych grup mierzy współczynnik tarcia na innym poziomie wartości liczbowych. Powyższe zostało zobrazowane na rysunku nr 11 przedstawiającym wykres zależności współczynnika tarcia od stopnia poślizgu koła pomiarowego (poślizg względny) ze wskazaniem urządzeń w charakterystycznym dla nich zakresie pomiarowym. Na uwagę zasługuje urządzenie SRT-3 należące formalnie do grupy urządzeń mierzących współczynnik tarcia przy pełnej blokadzie koła pomiarowego, które umożliwia wyznaczanie pełnych charakterystyk współczynnika tarcia $\mu=f(s)$ (w funkcji poślizgu względnego) w każdym hamowaniu.

W Polsce aktualnie do pomiarów monitorujących stan

Tabela 3. Przegląd metod i urządzeń mobilnych do pomiarów współczynnika tarcia (opracowanie własne na podstawie: [2], [5] i [7])

Grupa urządzeń	Mierzony parametr	Zalety	Wady	Nazwa urządzenia	Poślizg (%)	Opona	Grubość warstwy wody (mm)	Zdjęcie poglądowe
LOCKED WHEEL	Współczynnik tarcia podłużnego	System przyjazny dla użytkownika, stosunkowo prosty	Pomiar nieciągły (punktowy)	SRT-3	100	Rowkowana	0,5	
				ADHERA	100	Gładka	1,0	
SIDE-FORCE	Współczynnik tarcia poprzecznego	Ciągły pomiar	Pomiar wrażliwy na uszkodzenia nawierzchni np. ubytki, pęknięcia	SCRIM	34	Gładka	0,5	
		Pomiar możliwy na krzywych odcinkach drogi np. Rondo		ODOLOGRAF	34	Gładka	0,5	
FLIXED SLIP	Współczynnik tarcia podłużnego	Ciągły pomiar	Urządzenie wymaga dużej ilości wody do ciągłego pomiaru	GRIPTESTER	15	Gładka	0,5	
				TRACTION WATCHER ONE (TWO)	18	Gładka	0,5	
VARIABLE SLIP	Współczynnik tarcia podłużnego	Ciągły pomiar	Wysokie koszty utrzymania systemu	VIAFRICTION	1-75	Gładka	0,5	
			Urządzenie wymaga dużej ilości wody do ciągłego pomiaru	NORSEMETER OSCAR	5-95	Gładka	0,5	

właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni dróg krajowych wykorzystywane są zestawy pomiarowe SRT-3 oraz wdrażane są urządzenia TWO i ViaFriction.

Zestaw pomiarowy SRT-3

Urządzenie SRT-3 (fot. 1) jest urządzeniem pomiarowym skonstruowanym w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów (IBDiM) w Warszawie, przy współpracy z Politechniką Warszawską. Metodyka badań bazuje na pomiarze siły tarcia rozwijanej między kołem pomiarowym a nawierzchnią zwilżoną wodą w ilości $0,5 \text{ l/m}^2$ w warunkach pełnej blokady koła pomiarowego, tj. przy poślizgu $s = 100\%$. Wartość współczynnika tarcia wyznacza się w punktach oddalonych co 50 m lub 100 m, na podstawie pomiarów w śladzie koła przy temperaturze otoczenia od 5°C do 30°C . Pomiar może być wyzwalany automatycznie, albo ręcznie przez operatora.

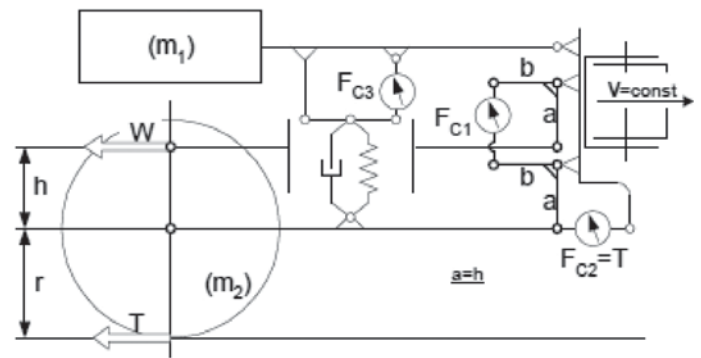
W Polsce do wykonywania pomiarów współczynnika tarcia stosowano różne opony pomiarowe. Aktualnie w badaniach współczynnika tarcia stosuje się oponę rowkowaną (*ribbed tyre*) rozmiaru 165 R 15 zalecaną przez World Road Association (PIARC). Każdy zestaw jest zaopatrzony w minimum 2 opony testowe: wzorcową i roboczą. Opona wzorcowa służy do wyznaczania poziomu odniesienia dla drugiej (i następnych) opony roboczej.



Fot. 1. Zestaw SRT-3

Zestaw pomiarowy składa się z pojazdu holującego, jednokołowej przyczepki dynamometrycznej montowanej z tyłu samochodu, zbiornika na wodę, komputera podkładowego oraz elektronicznej aparatury kontrolno-pomiarowej. Schemat kinematyczny przyczepki dynamometrycznej przedstawiono na rysunku 12. Konstrukcja przyczepy umożliwia pomiar siły tarcia występującej między hamowanym kołem a nawierzchnią drogi oraz siły pionowej obciążającej koło, dzięki czemu można obliczyć chwilową wartość współczynnika przyczepności.

Pomiar wykonywany jest w dwóch niezależnych torach pomiarowych. Automatyzacja mechanizmu hamowania i zapisu wyników pomiarów następuje przy użyciu kom-



Rys. 12. Schemat układu pomiarowego przyczepki dynamometrycznej SRT-3 (źródło: [15])

putera pokładowego i układu kontrolno-pomiarowego. W momencie całkowitego zablokowania koła pomiarowego oba czujniki zamontowane w dwóch torach pomiarowych mierzą tę samą siłę, co stwarza możliwość kontroli poprawności działania układu pomiarowego. Przy całkowicie zablokowanym kole obydwie wartości powinny być sobie równe. Dopuszczalna odchyłka, decydująca o przydatności wykonanego pomiaru nie może przekraczać wartości $\Delta=0,05$.

Cykl pomiarowy obejmuje:

- uruchomienie zaworów pneumatycznych układu wodnego oraz hamulcowego koła pomiarowego,
- rejestrację sił przenoszonych przez czujniki tensometryczne,
- rejestrację prędkości obrotowej koła pomiarowego,
- obliczenie wartości współczynników przyczepności oraz siły nacisku koła pomiarowego na jezdnię,
- zapisanie wyników pomiaru do zbioru dyskowego oraz wypisanie wyników pomiaru na ekranie monitora, gdzie dla każdego „hamowania” otrzymywane są następujące wartości:
 - v – prędkość pomiarowa,
 - miM – wartość współczynnika przyczepności obliczona w torze pomiaru momentu dla czujnika tensometrycznego pionowego F_{C3} ,
 - miF – wartość współczynnika przyczepności obliczona w torze pomiaru siły przyczepności dla czujnika tensometrycznego poziomego F_{C2} ,
 - mik – skorygowana wartość współczynnika przyczepności uwzględniająca reakcje w zawieszeniu przyczepy dynamometrycznej w czasie pomiarów F_z ,
 - F_z – wartość pionowego nacisku dynamicznego koła pomiarowego na jezdnię odniesiona do nacisku statycznego – czujnik F_{C3} ,
 - $dyst$ – droga przebyta przez zestaw od momentu wykonania pierwszego pomiaru wyrażona w metrach,
 - dgn – informacje diagnostyczne (cyfry od 0 do 9 oznaczają określone stany diagnostyczne).

W pliku wynikowym wartości współczynnika tarcia zapisywane są z dokładnością do 0,001.

Dane techniczne zestawu pomiarowego SRT-3 oraz standardowe warunki pomiaru przedstawiono w tabeli nr 4.

Tabela 4. Specyfikacja techniczna zestawu pomiarowego SRT-3 oraz warunki pracy

Obciążenie nominalne koła pomiarowego	2943 N (300 kg)
Nominalna prędkość pomiarowa	60 km/h
Typ opony pomiarowej	165 R 15 ribbed tyre
Typ opony referencyjnej	165 R 15 ribbed tyre
Masa całkowita	370 kg
System hamowania	hydropneumatyczny
System wypływu wody	pneumatyczny
Czas hamowania	regulowany
Czas uśredniania mierzonych wartości	regulowany
Krok pomiarowy	≤ 100 m
Dokładność pojedynczego pomiaru	≤ 0,001
Ciśnienie w oponie pomiarowej	0,2 MPa
Ilość wody	0,5 l/m ²
Temperatura otoczenia	5–30°C
Kryterium dokładności pomiędzy dwoma kanałami pomiarowymi	$\Delta \leq 0,05$

GDDKiA dysponuje dwunastoma zestawami SRT-3 wyprodukowanymi w latach 1995–2010.

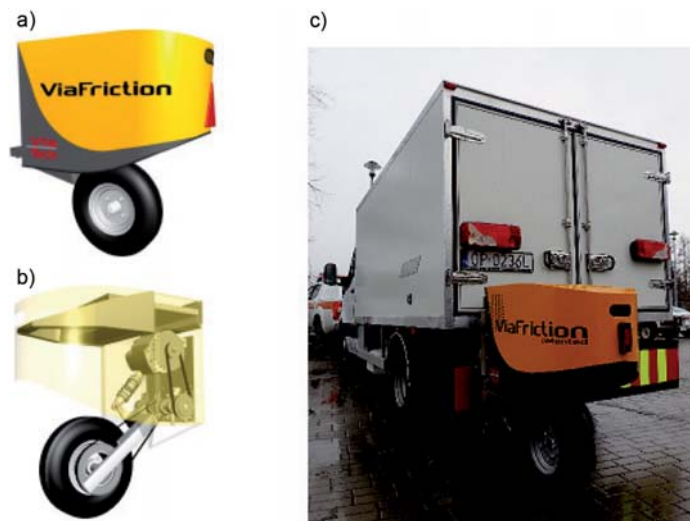
Urządzenie ViaFriction

ViaFriction to jednokołowe urządzenie do pomiaru współczynnika tarcia opracowane przez norweską firmę ViaTech we współpracy z Statens Vegvesen (Norweski Zarząd Dróg). Urządzenie może być zamontowane na podwoziu pojazdu lub bezpośrednio z tyłu pojazdu jako przyczepa ciągnięta przez pojazd holujący (fot. 2). Pomiary współczynnika tarcia wykonywane są zwykle w prawym śladzie kół, ale istnieje możliwość pomiarów w lewym lub w obu śladach kół. Pomiar współczynnika tarcia jest dokonywany w sposób ciągły i następuje w trakcie hamowania gładkiej opony bezprofilowej ASTM 1551. ViaFriction do przyhamowywania koła pomiarowego wykorzystuje hamulec elektryczny sterowany przez komputer. Urządzenie opcjonalnie może być wyposażone w czujnik temperatury, wilgotności, MPD (tekstury), system GPS, rejestracji obrazów ViaPhoto oraz łączność internetową. W tabeli nr 5 przedstawiono specyfikację techniczną i warunki pomiaru urządzeniem ViaFriction.

Jak podaje producent urządzenia, ViaFriction może działać w następujących trybach:

- stały poślizg (Fix) – tryb domyślny: współczynnik tarcia mierzony jest przy stałych wartościach poślizgu. Wartość poślizgu można zmieniać od 1% do 75%. Za standardową wartość poślizgu uznaje się wartość na poziomie 18%.
- zmienny poślizg (Var): wartość poślizgu zmienia się w sposób stopniowy od koła swobodnie toczącego do prawie całkowitego zablokowania. W trybie tym otrzymuje się pełną krzywą poślizgu.

- nadzór (Chk): wartości powyżej ustawionego limitu nie są rejestrowane. Tryb nadzoru jest wariantem trybu stałego poślizgu przeznaczonym do wykrywania odcinków drogi o niskim współczynniku tarcia. Pomiar wykonywany jest na sucho, bez użycia wody.



Fot. 2. Urządzenie do pomiaru współczynnika tarcia ViaFriction: a) jednokołowa przyczepa pomiarowa (źródło: [19]), b) szkic budowy wewnętrznej jednokołowej przyczepy pomiarowej (źródło: [19]), c) pojazd holujący z jednokołową przyczepą pomiarową

Tabela 5. Specyfikacja techniczna urządzenia ViaFriction

Obciążenie pionowe na koło pomiarowe	> 1000 N (> 100 kg)
Prędkość pomiarowa	20–95 km/h
Typ opony pomiarowej	opona zabezpieczona ASTM 1551 4,00-8 NHS
Ciężar (tylko jednostka pomiarowa)	80 kg
System hamowania	elektryczny
Dodatkowa aparatura pomiarowa	czujniki temperatury powietrza, nawierzchni, wilgotności
Minimalna długość pomiaru	regulowana, minimum 10 cm
Dokładność pojedynczego pomiaru	≤ 0,001
Ciśnienie w oponie pomiarowej	0,2 MPa
Ilość wody	wg wyboru 0,5 l/m ² dla nawierzchni drogowych
Mierzony zakres wsp. tarcia	0,1–0,9
Kryterium dokładności pomiędzy dwoma pomiarami	$\Delta\mu \leq 0,04$ $\Delta\sigma \leq 0,01$

Operator obsługuje urządzenie ViaFriction za pomocą komputera pokładowego. Pomiary można następnie analizować za pomocą dostarczonego przez producenta oprogramowania ViaPlot. Wyniki pomiarów mogą być również importowane do arkusza Excel.

Zestawy pomiarowe, które są eksploatowane na terenie naszego kraju, składają się z pojazdu holującego, jednokolowej przyczepki montowanej z tyłu samochodu, zbiornika na wodę zainstalowanego wewnątrz pojazdu, komputera podkładowego, elektronicznej aparatury sterująco-pomiarowej oraz podnośnika umożliwiającego transport jednostki pomiarowej nad nawierzchnią drogową.

Podsumowanie i wnioski

Różnorodność i liczba urządzeń stosowanych na całym świecie do pomiaru współczynnika tarcia jest duża. Chociaż urządzenia te dzieli się na cztery grupy w zależności od metody pomiaru, wszystkie mogą różnić się pod względem konstrukcyjnym. W ciągu ostatnich dwudziestu lat w realizowanych projektach badawczych (Hermes, *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*, Tyrosafe, Rosanne, *European Pavement Friction Workshop*) pracowano nad próbą rozwiązania tego problemu poprzez opracowanie metody harmonizacji urządzeń do oceny właściwości przeciwpoślizgowych. Podkreślono przy tym potrzebę jakościowego, kontrolowanego, rzetelnego procesu kalibracji i kontroli urządzeń. Stosowane urządzenia muszą gwarantować poprawność uzyskanych wyników, ponieważ od tego zależy bezpieczeństwo użytkowników dróg. Zapewnienie bezpieczeństwa w ruchu drogowym przy uwzględnieniu, że na koniec 2019 roku Polska była na piątym miejscu w Europie pod względem długości dróg szybkiego ruchu, wiąże się z większą potrzebą wykorzystywania do pomiarów drogowych urządzeń mobilnych poruszających się z prędkością zbliżoną do prędkości ruchu pojazdów. Co więcej, urządzenia mobilne do pomiarów ciągłych to także większa efektywność monitorowania stanu nawierzchni stale powiększającej się polskiej sieci dróg krajowych. Podkreślić należy jednak, że wdrożenie alternatywnych urządzeń do pomiarów ciągłych współczynnika tarcia wymaga nie tylko określenia wymagań w polskich warunkach, ale również porównania z dotychczas stosowanymi metodami, w celu zapewnienia ciągłości wnioskowania.

Bibliografia

- [1] Cairney P., *Skid resistance and crashes: a review of the literature*, Research report ARR no. 311. ARR Transport Research Ltd., Vermont South, Vic, 1997.
- [2] Descornet G., Schmidt B., Boulet M., Gothié M., Do M-T., Fafé J., Alonso M., Roe P., Forest R., Viner H., *Harmonization of European Routine and research Measuring Equipment for Skid Resistance*, FEHRL Report 2006/01, HERMES Final Report, 2006.
- [3] Flintsch G.W., McGhee K.K., de León Izeppi E., Najafi S. *The Little Book of Tire Pavement Friction Version 1.0*, Pavement Surface Properties Consortium, 2012.
- [4] Gardziejczyk W., *Hałaśliwość nawierzchni drogowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2018.
- [5] Hall J.W., Smith K.L., Titus-Glover L., Wambold J.C., Yager T.J., Rado Z., *Guide for Pavement Friction*, National Cooperative Highway Research Program, Washington, 2009.
- [6] Luo Y., *Effect of Pavement Temperature on Frictional Properties of Hot-Mix-Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road*, Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2003.
- [7] Mechowski T., Młynarczyk Z., Grączewski A., Borucki R., *Analiza zmienności właściwości przeciwpoślizgowych warstwy ścierniczej nawierzchni w początkowym okresie jej eksploatacji*, Sprawozdanie z realizacji pracy TD-88, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2009.
- [8] Noyce D.A., Bahia H.U., Yambo J., Chapman J., Bill A., *Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Surface Friction for Road Safety Improvements*, Project 04 – 04. Midwest Regional University Transportation Center College of Engineering Department of Civil and Environmental Engineering University of Wisconsin, Madison, 2007.
- [9] Wallman C., Åström H., *Friction measurement methods and the correlation between Road friction and traffic safety. A literature review*, Swedish National Road and Transport Research Institute, 2001.
- [10] Bukowski L., *Zagadnienia dotyczące współczynnika tarcia nawierzchni jezdni*, Drogownictwo, 10, 2017, 337-344.
- [11] Do M-T., Zahouani H., *Influence of the road-surface texture on the speed dependency of tire/road friction*, 10th International Conference Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Saint Etienne, 2005.
- [12] Kotek P., Kovac M., *Comparison of valuation of Skid Resistance of Pavements by Two Device with Standard Methods*, Procedia Engineering, 111, 2015, 436-443.
- [13] Mataei B., Zakeri H., Zahedi M., Nejad F.M., *Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A literature Review*, Journal of Civil Engineering, 6, 2016, 537-565.
- [14] Parczewski K., Wnęk H., *Wykorzystanie przyczepności podczas hamowania pojazdu*, Eksploatacja i Niezawodność, 14(2), 2012, 176-180.
- [15] Pokorski J., Reński A., Sar H., *Badanie przyczepności opony do nawierzchni w warunkach letniej eksploatacji*, Logistyka, 6, 2010, 2759-2770.
- [16] Sandecki M., *Kształtowanie ramp na drogach dwujezdniowych*, Drogownictwo, 2, 2017, 52-59.
- [17] Ueckermanna A., Wanga D., Oesera M. i Steinauer A. B., *A contribution to non-contact skid resistance measurement*, International Journal of Pavement Engineering, 16, 2014, 646-659.
- [18] Ładkiewicz-Krochmal K., *Analiza porównawcza wyników współczynnika tarcia uzyskiwanych urządzeniami ViaFriction oraz SRT-3*, Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska, Warszawa, 2019.
- [19] Instrukcja obsługi ViaFriction urządzenie do pomiaru tarcia. ViaTech, 2016.
- [20] Korzanowski G., *Wpływ kruszyw na właściwości przeciwpoślizgowe i hałaśliwość nawierzchni*, Polski Kongres Drogowy, Warszawa, 2017 [online]. Dostępny w Internecie: <http://kongresdrogowy.pl/baza-wiedzy/233-kruszywa-i-nie-tylko-s> (dostęp 30.05.2019).
- [21] Kulczyk I., *Hamowanie pojazdów*, Materiały Zespołu Szkół Samochodowych w Bydgoszczy, 2010 [online]. Dostępny w Internecie: https://www.zssplus.pl/transport/pin/hamowanie_pojazdow.pdf (dostęp: 30.05.2019).
- [22] Mechowski T., *Badania współczynnika tarcia nawierzchni drogowych w Polsce: sprzęt, procedury pomiarowe i wymagania*, Polski Kongres Drogowy, Warszawa, 2017 [online]. Dostępny w Internecie: http://kongresdrogowy.pl/files/upload/NIM_TMechowski.pdf (dostęp: 03.06.2019).
- [23] Paszkowski J., *Diagnostyka układu hamulcowego w warunkach stacjonarnych. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego*, Zakład Urządzeń Konstrukcji Elektrycznych, Politechnika Warszawska, 2010 [online]. Dostępny w Internecie: http://www.ee.pw.edu.pl/~paszkowj/jarek/Diagnostyka/HAMULCE/Hamulce_v1_2010.pdf (dostęp: 30.05.2019).
- [24] Wasilewska M., Gardziejczyk W., *Właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni drogowych, a bezpieczeństwo ruchu samochodowego*, Polskie Drogi, 2015 [online]. Dostępny w Internecie: https://budownictwo.wnp.pl/wlasciwosci-przeciwposlizgowe-nawierzchni-drogowych-a-bezpieczenstwo-ruchu-samochodowe-go,254516_1_0_0.html (dostęp 11.04.2019 r.).