

Wpływ nawierzchni i opon na opór toczenia

Współpraca opony z nawierzchnią jezdni ma kluczowe znaczenie dla osiągnięć pojazdów samochodowych. Od jakości tej współpracy zależą: bezpieczeństwo, szeroko rozumiany komfort i ekonomia. Można z pewnym uproszczeniem stwierdzić, że podstawowym zadaniem nawierzchni drogowych jest zapewnienie optymalnych warunków pracy opon. Zadaniem opon jest natomiast zapewnienie pojazdowi niezbędnych własności trakcyjnych, tak aby pojazd spełniał w możliwie największym stopniu wymagania użytkowników. Nie ulega wątpliwości, że współpraca opony z jezdnią zależy w zbliżonym stopniu od parametrów nawierzchni jezdni oraz właściwości opon. Niniejszy artykuł porusza zagadnienia wpływu nawierzchni jezdni i konstrukcji opon na jeden z istotnych parametrów opisujących współpracę opony z jezdnią, jakim jest opór toczenia. Artykuł nawiązuje do publikacji [1, 2, 3], w których omówiony jest wpływ oporu toczenia na zużycie energii przez pojazdy samochodowe oraz przedstawione są w ogólnym zarysie metody badania oporu toczenia opon.

Opór toczenia opon samochodowych wynika ze strat energii, jakie występują podczas cyklicznego odkształcania opony oraz nawierzchni jezdni w związku z toczaniem się po niej koła. Na nawierzchniach utwardzonych odkształcenia opony są zazwyczaj znacznie większe niż odkształcenia nawierzchni, w związku z czym to one decydują o oporze toczenia. Podstawowym materiałem konstrukcyjnym opon są mieszanki kauczukowe optymalizowane pod kątem zadań, jakie mają pełnić w poszczególnych częściach opony. Mieszanki wykorzystywane w części bieżnikowej muszą charakteryzować się dobrą przyczepnością do typowych nawierzchni drogowych oraz dużą wytrzymałością na ścieranie. Mieszanki w rejonie barku i ścianek bocznych muszą mieć małe straty związane z histerezą. Dodatkowo w oponach bezdętkowych wewnętrzna powierzchnia opony musi być wykonana z takiej mieszanki, która zapewnia wymaganą szczelność. Konstruktorzy opon dążą do tego, aby stosowane przez nich mieszanki gumowe i materiały wykorzystywane w karkasie opony oraz w opasaniu miały możliwie małą pętlę histerezy i aby elementy opony miały kształt geometryczny zmniejszający naprężenia, co prowadzi do zmniejszenia strat energetycznych.

Nawierzchnie drogowe również podlegają odkształceniom podczas współpracy z oponami, ale te odkształcenia są znacznie mniejsze niż odkształcenia występujące w oponach. Można przyjąć, że dla konwencjonalnych, sztywnych nawierzchni drogowych straty energetyczne w nich występujące są znikome i nie mają znaczenia dla wartości oporu toczenia. Odstępstwem od tej reguły są nawierzchnie poroelastyczne [4], które ze względu na zawartość agregatu gumowego powyżej 20% w stosunku wagowym do reszty składników uginają się tak mocno, że ma to widoczny wpływ na opór toczenia, a przy bardzo intensywnym ruchu drogowym ulegają nawet znacznemu nagrzananiu.

Powyższe stwierdzenie nie oznacza jednak, że nawierzchnie drogowe nie mają wpływu na opór toczenia. Wpływ ten jest

The impact of road surface and tires on rolling resistance

The interaction of tires and the road surface is crucial for the performance of vehicles. The quality of this interaction influences safety, broadly understood comfort and efficiency. It can be said with some simplification that the primary task of road surfaces is to ensure the optimal working conditions of tires, while the task of tires is to provide a vehicle with necessary traction so that it could fulfill the requirements of its users to the maximum extent possible. There is no doubt that the interaction of a tire with a road depends to a similar extent on the parameters of the road surface and the characteristics of tires. The article discusses the issues of the impact of the road surface and tire construction on one of the crucial parameters describing the interaction of a tire with a road which is rolling resistance.

Keywords:

tires, road surface, rolling resistance

bowiem bardzo istotny, ale wynika przede wszystkim z tekstury nawierzchni, która ma decydujące znaczenie dla lokalnych odkształceń elementów bieżnika [5] oraz z równości nawierzchni, która wpływa na odkształcenia ścianek bocznych opony oraz na straty energii w układzie zawieszenia pojazdu (głównie w amortyzatorach) [6]. Głównym problemem z określeniem wpływu tekstury nawierzchni na opór toczenia opon jest to, że powszechnie stosowane deskryptory, takie jak MPD (*Mean Profile Depth*) czy MTD (*Mean Texture Depth*), stworzone zostały z myślą o charakteryzowaniu nawierzchni jezdni pod kątem przyczepności na mokro, a nie oporu toczenia. Dla przyczep-

Oznaczenie	Opis	MPD [mm]
APS4r17	Replika imitująca powierzchniowe utrwalenie 8/10. Kruszywo mineralne zatopione w poliuretanowej żywic	4,75
PERSr17	Nawierzchnia poroelastyczna z kruszywem 4 mm	1,53
DAC16r20	Replika betonu asfaltowego z kruszywem 16 mm wykonana z laminatu epoksydowego	1,33
ISOr20	Replika nawierzchni standardowej wg normy ISO wykonana z laminatu epoksydowego	1,06
SMA8r20	Replika SMA 8 wykonana z laminatu epoksydowego	1,31
STEELr20	Gładka nawierzchnia stalowa	0,42
SWr20	Safety Walk – materiał przypominający papier ścierny o granulacji 80	0,84

Tab. 1. Charakterystyka replik nawierzchni drogowych

ności na mokro istotna jest bowiem objętość wody (a dla hałasu opon objętość powietrza), jaka może się zmieścić pomiędzy powierzchnią opony i nawierzchni. Takie ujęcie problemu nie jest jednak prawidłowe dla charakteryzowania oporu toczenia, bowiem opona „nie czuje” tych zagłębień w nawierzchni drogowej, z którymi nie ma bezpośredniego kontaktu. Na rys. 1 przedstawiona jest eksperymentalna, prosta pod względem geometrycznym tekstura nawierzchni (z lewej strony) oraz rzeczywista powierzchnia styku tej nawierzchni z gładką oponą (z prawej strony). Wyraźnie widoczne jest zjawisko częściowego envelopingu, w wyniku którego tylko część nawierzchni ma bezpośredni styk z bieżnikiem opony. Pomimo że sferyczne występy nawierzchni miały wysokość 3 mm, zagłębiły się one w bieżnik opony jedynie na 1,2 mm.

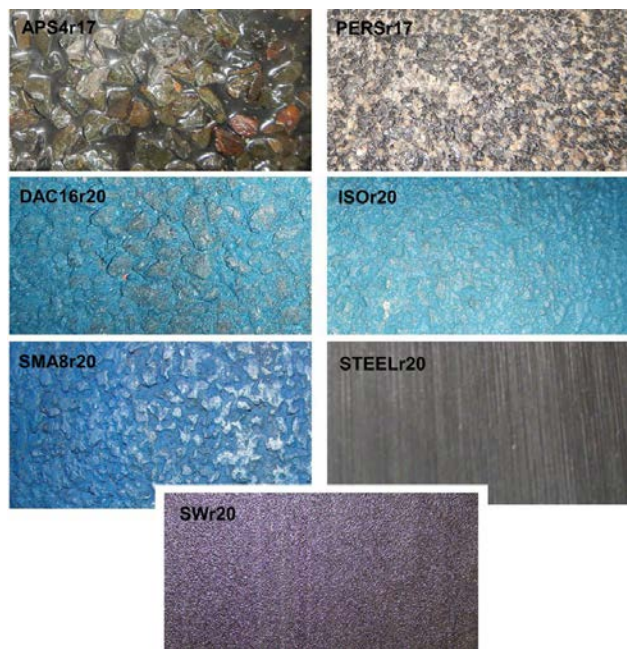
Jedne z pierwszych prac dotyczących zjawiska envelopingu prowadzone były przez naukowców z Belgii i Holandii [7], ale uzyskane wyniki nie były w pełni satysfakcjonujące. Obecnie prace nad envelopingiem prowadzone są zarówno w BRRC (Belgia), jak i na Politechnice Gdańskiej i dzięki znacznie bardziej zaawansowanym technikom pomiarowym uzyskano pewien postęp w opracowaniu algorytmu deskryptora tekstury ukierunkowanego na charakteryzowanie nawierzchni drogowych pod kątem oporu toczenia opon. Niestety ten deskryptor nie jest jeszcze na tyle zaawansowany, aby mógł być stosowany praktycznie, w związku z czym najpewniejszą charakteryzację nawierzchni drogowych w zakresie oporu toczenia zapewniają badania drogowe. W niniejszym artykule przedstawione są wyniki badań drogowych prowadzonych przez Politechnikę Gdańską za pomocą przyczepy badawczej omówionej w [4] oraz badań laboratoryjnych z wykorzystaniem maszyn bieżnych wyposażonych w repliki nawierzchni drogowych [2].

Wyniki badań laboratoryjnych

Laboratoryjna metoda badania oporu toczenia na maszynach bieżnych nie najlepiej nadaje się do określania wpływu nawierzchni na opór toczenia opon, gdyż klasyczne nawierzchnie drogowe nie mają wystarczającej wytrzymałości mechanicznej, aby wytrzymać działanie siły odśrodkowej występującej podczas obracania bębnow zewnętrznych. Wady tej pozbawione są jedynie bębny wewnętrzne, ale są one bardzo rzadko



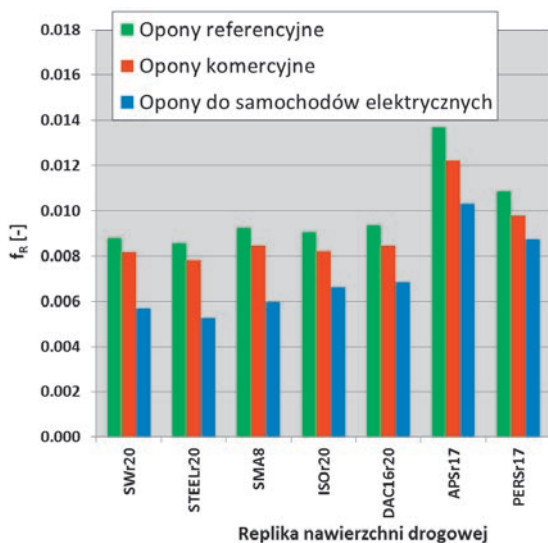
Rys. 1. Eksperymentalna nawierzchnia składająca się z regularnych sferycznych wybrzuszeń o wysokości XXX. mm. Z lewej strony widoczna pełna tekstura, a z prawej strony tylko ta jej część, która ma kontakt z gumą bieżnika (szary kolor)



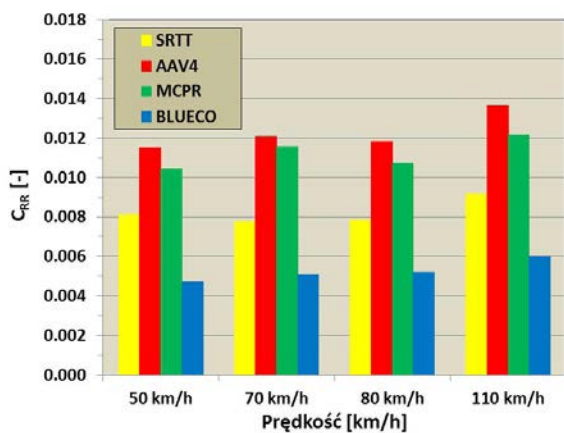
Rys. 2. Repliki nawierzchni drogowych stosowane na maszynach bieżnych na Politechnice Gdańskiej

spotykane ze względu na wielkość i koszty. Praktycznie jedynym bębniem wewnętrznym, który jest często wykorzystywany do badań opon, jest maszyna bieżna PFF znajdująca się w BASt w Bergisch Gladbach (Niemcy) [8]. Metoda laboratoryjna nadaje się jednak dobrze do badania opon, o ile bęben pokryty jest repliką nawierzchni drogowej odwzorowującą teksturę wybranej nawierzchni rzeczywistej. Na Politechnice Gdańskiej stosowane są repliki przedstawione na rys. 2 i scharakteryzowane w tab. 1.

Podczas badań laboratoryjnych wykorzystywane były wszystkie wymienione w tab. 1 repliki, na których przebadano 3 opony przyjęte jako referencyjne [3], 8 nowoczesnych opon komercyjnych znajdujących się na rynku i 4 opony przeznaczone do samochodów elektrycznych. Opony badane były według metody ISO [9]. Na rys. 1 przedstawione są współczynniki oporu toczenia uśrednione dla poszczególnych grup opon uzyskane na poszczególnych replikach. Z rysunku wynika, że największy opór toczenia występuje dla nawierzchni APS4r17, stanowiącej replikę powierzchniowego utrwalenia o bardzo agresywnej teksturze (MPD = 4,75 mm). W następnej kolejności plasuje się bardzo gładka nawierzchnia PERSr17. W przypadku tej nawierzchni duży opór toczenia nie jest związany z teksturą, a z dużą elastycznością tej nawierzchni. Badania termograficzne wykazały, że przy intensywnej pracy maszyny bieżnej nawierzchni



Rys. 3. Współczynniki oporu toczenia uśrednione dla poszczególnych grup opon; prędkość: 80 km/h



Rys. 4. Współczynniki oporu toczenia uśrednione dla poszczególnych grup opon; prędkość: 50 km/h

nia PERSr17 w rejonie współpracy z oponą testową znacznie się nagrzewała, co potwierdziło hipotezę o stratach energetycznych zachodzących w tej nawierzchni. Dla pozostałych replik pomimo istotnych różnic w wartościach MPD (od 0,42 do 1,33 mm) współczynniki oporu toczenia są zbliżone. Na uwagę zasługuje fakt, że opony przeznaczone do samochodów elektrycznych (ale w większości nadające się również do samochodów hybrydowych i konwencjonalnych) wykazują o około 20-30% mniejszy opór niż typowe opony komercyjne.

Wyniki badań drogowych

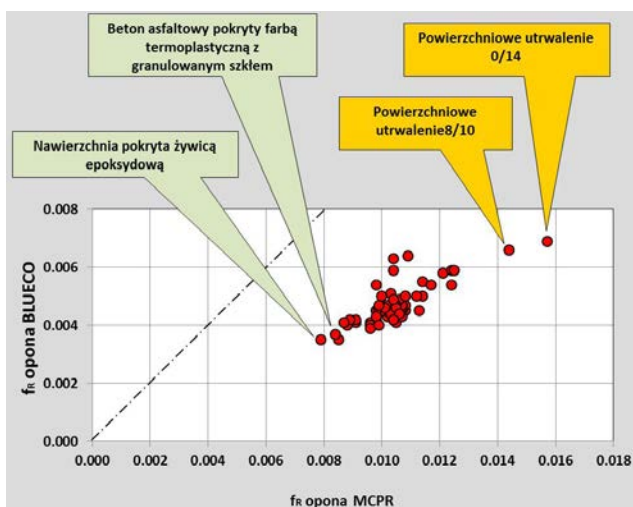
Z uwagi na to, że badania drogowe oporu toczenia opon są kosztowne, czasochłonne i wymagają dobrych warunków atmosferycznych, liczba badanych opon została ograniczona do 4 sztuk. Wyselekcjonowane opony to: SRTT (*Standard Reference Test Tyre*), AAV4 (Avon AV4 195R14C), MCPR (Michelin Primacy HP 225/60R16) i BLUECO (Continental BLUECO 195/50R18). Pierwsze dwie opony to opony referencyjne [3], trzeci typ opony to nowoczesna opona komercyjna, a czwarta opona skonstruowana została specjalnie do samochodów elektrycznych i hybrydowych. Badania prowadzone były na 80 nawierzchniach dro-

Rodzaj nawierzchni	fR
Nawierzchnia eksperymentalna pokryta gładką warstwą żywicy epoksydowej	0,008
Beton asfaltowy pokryty farbą termoplastyczną z granulowanym szkłem	0,008
Beton asfaltowy pokryty farbą termoplastyczną z granulowanym szkłem o dużej przyczepności	0,009
Eksperymentalna nawierzchnia SMA8 (Dania)	0,009
SMA8 (Dania)	0,009
Asfalt piaskowy 0/4	0,009
Beton asfaltowy typu ISO 0/6	0,009
SMA11 (modyfikowany gumą)	0,009
SMA11	0,009
Beton asfaltowy 0/10	0,010
Beton cementowy poprzecznie rowkowany	0,010
Beton cementowy przeciągany wzdłużnie grzebieniem	0,010
Nawierzchnia poroelastyczna przyklejona do bloczków betonowych	0,010
Beton cementowy poprzecznie szcztokowany	0,010
Powierzchniowe utwardzenie o podwyższonej przyczepności 1/3 (Colgrip®)	0,010
Beton asfaltowy 8	0,010
Porowaty beton asfaltowy 0/6	0,010
Beton cementowy poprzecznie frezowany	0,010
Beton cementowy przecierany jutą	0,010
SuperPave (USA) 12,5	0,010
SMA8 (Polska)	0,010
Beton asfaltowy 10	0,010
Bloczki betonowe	0,010
Beton cementowy poprzecznie frezowany	0,011
Beton cementowy przeciągany wzdłużnie grzebieniem oraz szlifowany	0,011
Beton cementowy z odsłoniętym kruszywem	0,011
Bardzo cieńki dywanik asfaltowy	0,011
Utrwalenie powierzchniowe dwuwarstwowe	0,011
Asfalt porowaty dwuwarstwowy	0,011
Beton cementowy frezowany	0,012
Beton cementowy porowaty	0,012
Asfalt porowaty jednowarstwowy	0,012
Nawierzchnia poroelastyczna HET	0,013
Powierzchniowe utwardzenie 8/10	0,014
Powierzchniowe utwardzenie 0/14	0,016

Tab. 2 współczynniki oporu toczenia dla wybranych nawierzchni drogowych (prędkość 50 km/h, opona MCPR)

gowych w USA i w różnych krajach europejskich. Nawierzchnie obejmowały zarówno szeroko wykorzystywane i sprawdzone rozwiązania typowe dla poszczególnych krajów, jak i nawierzchnie specjalne oraz nawierzchnie testowe.

W tab. 2 zestawione są współczynniki oporu toczenia uzyskane dla wybranych nawierzchni podczas badania opony MCPR przy prędkości 50 km/h, obciążeniu 4000 N i regulowanym ciśnieniu pompowania 210 kPa. Pomijając nawierzchnie eksperymentalne pokryte żywicami lub farbami termoplastycznymi, najniższe wartości oporu toczenia uzyskano dla nawierzchni typu SMA8, a następnie SMA11. Największe współczynniki oporu toczenia uzyskano dla powierzchniowego utwardzenia 8/10 i 0/14. Zaobserwowano, że opór toczenia na nawierzchniach typu powierzchniowe utwardzenie może być nawet 2 razy większy niż opór to-



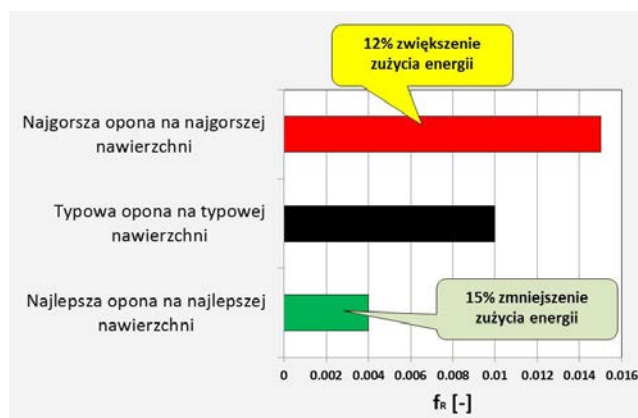
Rys. 5. Porównanie oporu toczenia opon MCPR i BLUECO uzyskanych na różnych nawierzchniach przy prędkości 50 km/h

czenia na nawierzchni SMA8. Rezultaty bardzo zbliżone pod względem rankingu nawierzchni uzyskano dla wszystkich badanych opon oraz wszystkich prędkości. Na rys. 4 przedstawione są współczynniki oporu toczenia uśrednione dla wszystkich badanych nawierzchni. Jak wynika z rysunku, opona przeznaczona do samochodów elektrycznych (BLUECO) charakteryzuje się znacznie mniejszym (często ponaddwukrotnie) oporem toczenia niż opony tradycyjne. Jak wykazuje analiza rys. 5, ranking nawierzchni uzyskany przy pomocy opon MCPR i BLUECO jest bardzo podobny, co można uznać za zjawisko korzystne, gdyż ułatwia optymalny wybór nawierzchni pod względem jej wpływu na opór toczenia.

Wnioski – wpływ nawierzchni i opon na zużycie energii

Jak wynika z przedstawionych powyżej danych, zarówno poszczególne opony, jak i poszczególne nawierzchnie różnią się znacznie w zakresie oporu toczenia, jaki występuje podczas współpracy opony z jezdnią. Różnice te są na tyle duże, że mogą w poważnym stopniu wpływać na zużycie energii przez pojazdy. W zależności od warunków ruchu i typu pojazdu zmiana oporu toczenia o 10% może prowadzić do zmian zużycia energii przekraczających nawet 4%, przy czym zazwyczaj jest to około 2-3% [3]. Na rys. 6 przedstawione są trzy scenariusze oparte na wyborze typowych lub ekstremalnych kombinacji opon i nawierzchni. Przyjmując jako punkt odniesienia scenariusz, w którym opona o średnich własnościach w zakresie oporu toczenia toczy się po średniej nawierzchni, można stwierdzić, że zastosowanie najlepszych opon i nawierzchni (pod względem oporu toczenia) jakie obecnie są na rynku, pozwala uzyskać oszczędności energii dochodzące do ok. 15%. Jeśli natomiast po nawierzchni o dużych oporach toczenia toczy się opona charakteryzująca się również dużym oporem toczenia, to straty energii wzrastają o ok. 12%.

Oszczędności w zużyciu energii przekładają się na proporcjonalne zmniejszenie emisji CO₂, zmniejszenie kosztów eksploatacji i poprawę osiągnięć pojazdów. Ten ostatni aspekt jest szczególnie cenny dla pojazdów elektrycznych, które w większości dysponu-



Rys. 6. Porównanie trzech scenariuszy doboru opon i nawierzchni pod kątem ich wpływu na opór toczenia

ją niewielkim zasięgiem operacyjnym związanym z ograniczoną pojemnością akumulatorów. □

Podziękowania

Prace badawcze przedstawione w niniejszym artykule prowadzone były w ramach projektu PBS-ROLRES (grant numer PBS1/A6/1/2012) i Projektu Polsko-Norweskiego LEO finansowanych przez NCBiR (grant numer 196195/2013).

Piśmiennictwo

1. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Ronowski G.: *Opór toczenia opon samochodowych*. „Magazyn Autostrady”, nr 7, 2014
2. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B.: *Methods of Tire Rolling Resistance Measurements*. Troisième Congrès Tunisien de Mécanique CO-TUME'2014, Sousse, Tunisia, 24-26 March 2014.
3. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Ronowski G., Wilde W.J.: *Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, Round 2, Research Project Final Report 2014-29*. Minnesota Department of Transportation, Research Services and Library, St. Paul, Minnesota, USA.
4. Ejsmont J., Goubert L., Ronowski G., Świeczko-Żurek B.: *Ultra Low Noise Poroeleastic Road Surfaces*. Coatings 2016, 6, 18; doi:10.3390/coatings6020018.
5. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko-Żurek B., Sommer S.: *Road texture influence on tyre rolling resistance*. „Road Materials and Pavement Design”, 2016 <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1160835>.
6. Ejsmont J., Ronowski G., Taryma S., Świeczko-Żurek B.: *The Influence of Road Surface Unevenness on Tyre Rolling Resistance*. The Archives of Automotive Engineering (Archiwum Motoryzacji), Vol. 70, No. 4, 2015.
7. Von Meier A., Van Blokland G.J., Descornet G.: *The influence of texture and sound absorption on the noise of porous road surfaces*. 2nd International Symposium on Road Surface Characteristics, June 1992, Berlin, Germany.
8. Glaeser K.P., Bartolomaeus W.: *Vehicle-Pavement Interaction Facility (PFF)*. Federal Highway Research Institute (BASt), Germany, 2014, Press and Public Relations, available on-line at: http://www.bast.de/EN/Automotive_Engineering/Technology/F3-e-PFF.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
9. *ISO 28580 (2009) Passenger car, truck and bus tyres - Methods of measuring rolling resistance - Single point test and correlation of measurement results*. International Organisation for Standardization, Geneva, Szwajcaria.