

OPÓR TOCZENIA OPON SAMOCHODOWYCH

Jerzy Ejsmont, Beata Świczko-Żurek, Grzegorz Ronowski

Opór toczenia opon samochodowych jest jednym z istotnych parametrów charakteryzujących współpracę opony samochodowej z nawierzchnią jezdni. Jego wartość wpływa na zużycie paliwa, a przez to na koszt transportu samochodowego, oraz na osiągi pojazdów takie jak prędkość maksymalna czy zdolność przyspieszania. W zależności od warunków ruchu zmniejszenie oporu toczenia o 10%, powoduje zmniejszenie zużycia paliwa o 2-4%. Zmniejszone zużycie paliwa to nie tylko niższe koszty eksploatacji pojazdów, ale również niższa emisja CO₂. Niestety opór toczenia jest stosunkowo trudno do zmierzenia. W niniejszym artykule przedstawiony jest wpływ oporu toczenia na zużycie energii przez samochody osobowe oraz przegląd metod badania oporu toczenia opon.

Dla użytkowników dróg najważniejszymi parametrami związanymi z nawierzchnią jezdni są:

- **w zakresie bezpieczeństwa:** przyczepność w różnorodnych warunkach pogodowych i zdolność odprowadzania przez nawierzchnię wód opadowych (widoczność podczas deszczu),
- **w zakresie komfortu jazdy:** równość nawierzchni i jej "hałaśliwość", a dokładniej wpływ na hałas generowany przez opony,
- **w zakresie ekonomii:** opór toczenia opon.

Powyższe parametry charakteryzują jednak nie tyle samą nawierzchnię, a jej współpracę z konkretną oponą samochodową. Zazwyczaj zakres wpływu opony i nawierzchni jest porównywalny co powoduje, że dla oceny nawierzchni trzeba korzystać z opony albo jeszcze lepiej z zestawu opon referencyjnych, a dla oceny opon niezbędne są nawierzchnie referencyjne o ściśle określonych charakterystykach.

Opór toczenia opony wynika ze strat energetycznych jakie powstają podczas cyklicznego odkształcania się ścianek bocznych, barków i bieżnika opony. Ponieważ materiały wykorzystywane do produkcji opon charakteryzują się znaczną histerezą, więc ilość energii którą trzeba włożyć by odkształcić oponę jest większa niż ilość energii oddawanej podczas powrotu opony do kształtu pierwotnego. Generowanie oporu następuje zarówno w związku z ugięciami struktury nośnej opony jak i z odkształceniami elementów bieżnika ("klocków") bezpośrednio współpracujących z chropowatą nawierzchnią jezdni.

Na ugięcie struktury nośnej opony ma wpływ przede wszystkim rozmiar opony, jej obciążenie i ciśnienie pompowania, oraz do pewnego stopnia również sztywność ścianek bocznych oraz pasa bieżnika. Nierówności nawierzchni jezdni również wpływają na ugięcie opony oraz, co bardzo ważne, na ugięcie zawieszenia pojazdu. Ponieważ zawieszenia współczesnych pojazdów mają zawsze elementy sprężysto-tłumiące, więc ugięcia zawieszenia powodują istotne straty energii, co zazwyczaj

jest wliczane jako składnik oporu toczenia opon. Z tego powodu równość nawierzchni (np. charakteryzowana wskaźnikiem IRI) w istotny sposób wpływa na opór toczenia pojazdu.

Tekstura nawierzchni wpływa w znaczący sposób na lokalne odkształcenia elementów bieżnika opony. Nawierzchnia o wyraźnej, agresywnej teksturze powoduje znaczne zwiększenie lokalnych odkształceń co prowadzi do wzrostu oporu toczenia. Trzeba sobie jednak zdawać sprawę, że przy wyraźnie zarysowanej teksturze (np. nawierzchnie typu powierzchniowe utrwalenie 16 mm) elastyczność elementów bieżnika ("klocków") jest zbyt mała aby odkształcenie klocka odwzorowywało dokładnie kształt nawierzchni. W wyniku zjawiska nazywanego *envelopingiem*, przy znacznej teksturze kontakt pomiędzy elementami bieżnika i nawierzchnią ogranicza się do najbardziej wystających fragmentów nawierzchni (zazwyczaj są to wierzchołki kruszywa), a w innych rejonach nie dochodzi do bezpośredniego kontaktu bieżnika i nawierzchni - patrz Rys. 1

Klasyczne metody charakteryzowania tekstury (np. MPD) nie uwzględniają zjawiska *envelopingu* (otulania) w konsekwencji czego nie odzwierciedlają prawidłowo kształtu nawierzchni "widzianego" przez oponę. Kształt, głębokość i pojemność kieszonek ma wpływ na przyczepność na mokro gdyż oddziałuje na odprowadzanie wody i przecinanie filmu wodnego oraz na hałas generowany przez opony. Jednocześnie głębokość kieszonek powietrznych praktycznie nie wpływa na opór toczenia opon, bo odkształcenia elementów bieżnika występują tylko w strefach bezpośredniego styku nawierzchni i bieżnika. Oznacza to, że klasyczne wskaźniki charakteryzujące nawierzchnię (MPD, Re) niezbyt dobrze korelują się z oporem toczenia, szczególnie dla agresywnej tekstury przy której styk opony z nawierzchnią występuje jedynie w rejonie wierzchołków nierówności.

W chwili obecnej brak jest zweryfikowanych metod określania profilu ugięcia elementów bieżnika z uwzględnieniem profilu nawierzchni, sztywności mieszanki gumowej bieżnika i algorytmu otulania. Nieliczne prace prowadzone w tym zakresie (np. [1]) wskazują jedynie na kierunek dalszych badań ale nie dostarczają niestety praktycznych algorytmów. Sytuację komplikuje fakt, że *enveloping* uzależniony jest silnie od własności mieszanki gumowej, rzeźby bieżnika, ciśnienia w oponie i obciążenia.

Zgodnie z prawami fizyki odkształcenia wynikające ze współpracy opony z jezdnią występują nie tylko w oponie, ale również w nawierzchni. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że impedancja mechaniczna nawierzchni jezdni jest zazwyczaj znacznie większa niż impedancja opony w związku z czym ugięcia nawierzchni są minimalne. Dla typowych nawierzchni drogowych dynamiczny Moduł Younga wynosi około 10 - 45 GPa podczas gdy dla opon samochodowych zazwyczaj zbliżony jest do 0.3 - 1 MPa [2]. Dla typowej opony do samochodów osobowych ugięcie struktury nośnej wynikające z ciśnienia pompowania i sztywności ścianek bocznych wynosi około 15-20 mm, a lokalne ugięcia mieszanki gumowej elementów bieżnika wywołane teksturą nawierzchni wynoszą od kilku dziesiątych części milimetra do 2-3 milimetrów. Ugięcie typowej nawierzchni drogowej w dobrym stanie technicznym dla nacisku wywołanego przejazdem opony samochodu osobowego wynosi jedynie kilka setnych części milimetra. Wynika z tego, że znaczna większość energii związanej z toczeniem się koła tracona jest w oponie.

Problem uginania się nawierzchni drogowych stał się bardzo istotny przy badaniach nawierzchni poroelastycznych (PERS) wykazujących znacznie większe ugięcia niż klasyczne nawierzchnie asfaltowe i cementowe [3]. Przykładowa nawierzchnia poroelastyczna produkowana przez firmę HET w Niemczech przedstawiona jest na rysunku 2. Ugięcie nawierzchni PERS-HET spowodowane naciskiem

koła samochodowego wynosi około 0.5 mm. Pomimo że nawierzchnia poroelastyczna PERS-HET ugina się znacznie bardziej od nawierzchni klasycznej, to jednak opór toczenia opon zmierzony na tej nawierzchni jest wyraźnie mniejszy niż opór toczenia na innych nawierzchniach drogowych. Wynika to zapewne z bardzo małej tekstury tej nawierzchni, która praktycznie eliminuje lokalne ugięcia elementów bieżnika wymuszane przez kruszywo w typowych nawierzchniach bitumicznych.

Wpływ oporu toczenia na zużycie energii przez samochody osobowe

Podczas jazdy pojazdu silnik musi pokonywać opory ruchu, których najważniejszymi składnikami są: opór toczenia, opór powietrza i ewentualnie opory wzniesienia oraz bezwładności. Dodatkowo przy modelowaniu zjawisk energetycznych korzystnie jest wprowadzenie pojęcia oporów własnych silnika obracającego się z daną prędkością obrotową ale bez obciążenia. Opory te opisane są poniższymi równaniami:

$$F_R = C_{RR} \cdot m \cdot g \quad (1)$$

$$F_D = c_x \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{V_a^2}{2} \quad (2)$$

$$F_I = (m + m_r) \cdot a \quad (3)$$

$$F_G = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4)$$

$$P = (F_R + F_D + F_I + F_G) \cdot V + P_0 \quad (5)$$

$$E = P \cdot t \quad (6)$$

Gdzie:

F_R	-	opór toczenia [N]
F_D	-	opór aerodynamiczny [N]
F_I	-	opór bezwładności [N]
F_G	-	opór wzniesienia [N]
P	-	moc oporów ruchu [W]
E	-	energia [J]
C_{RR}	-	współczynnik oporów toczenia [-]
m	-	masa pojazdu [kg]
g	-	przyspieszenie ziemskie - 9.81 m/s ²
c_x	-	współczynnik aerodynamiczny [-]
A	-	powierzchnia czołowa [m ²]
ρ	-	gęstość powietrza - 1.28 kg/m ³
V_a	-	prędkość pojazdu względem powietrza [m/s]
m_r	-	równoważna masa elementów w ruchu obrotowym [kg]
α	-	kąt nachylenia drogi
V	-	prędkość pojazdu [m/s]
P_0	-	moc oporów własnych silnika przy pracy bez obciążenia [W]
t	-	czas [s]



W pojeździe z napędem spalinowym silnik przetwarza energię chemiczną zawartą w paliwie na energię mechaniczną niezbędną do pokonania oporów ruchu oraz oporów związanych z pracą silnika oraz układu napędowego. Przetwarzanie energii obarczone jest dużymi stratami, które powodują, że tylko jej część może być efektywnie wykorzystana. Dokładny model opisujący zjawiska energetyczne związane z pracą silnika i układu napędowego jest bardzo skomplikowany i trudno jest uzyskać wszystkie niezbędne do jego realizacji dane wejściowe. Dla oceny wpływu oporu toczenia na zużycie przez pojazd energii możliwe jest jednak zbudowanie modelu uproszczonego. W niniejszym opracowaniu celowo stosowane jest określenie "zużycie energii" zamiast powszechnego określenia "zużycie paliwa", gdyż rozważania dotyczą również pojazdów elektrycznych dla których paliwem jest energia elektryczna zgromadzona w bateriach akumulatorów.

Dla potrzeb analiz wpływu oporu toczenia na zużycie energii można przyjąć, że straty energetyczne występujące w silniku i układzie napędowym można przedstawić jako straty stałe (niezależne od obciążenia silnika) oraz straty proporcjonalne do obciążenia. Dla utrzymania określonej prędkości silnika konieczne jest dostarczenie pewnej mocy (P_0), nawet gdy silnik pracuje bez obciążenia. Jednocześnie wzrost obciążenia powoduje wzrost strat wynikający ze współczynnika sprawności poszczególnych podzespołów układu napędowego.

Jeśli analiza energetyczna ma być przeprowadzona tak, aby określone zostały względne współczynniki wpływu oporu toczenia na zużycie energii, to trzeba zmierzyć albo oszacować jedynie stałe straty energetyczne występujące w silniku i układzie napędowym. Straty stałe można wtedy potraktować jako swoiste opory ruchu pojazdu. Nie jest natomiast konieczne określenie współczynników sprawności odnoszących się do zjawisk przemiany energii chemicznej na mechaniczną oraz wynikających ze zmiany obciążenia układu napędowego o ile uznamy, że są one niezmiennie, albo słabo zmienne w bezpośredniej bliskości danego punktu pracy silnika.

W oparciu o przedstawiony model wykonane zostały symulacje wpływu zmian współczynnika oporu toczenia dla różnych typów samochodów osobowych i dostawczych oraz różnych prędkości jazdy. Wykonano również symulacje dla zmiennych warunków jazdy charakterystycznych dla ruchu miejskiego w oparciu o profil prędkości US FTP 75 (*EPA Federal Test Procedure*). Analizy wykonano dla współczynników oporu toczenia od 0.005 do 0.015 przyjmując współczynnik 0.01 jako bazowy. W celu uzyskania dużej reprezentatywności wyników symulacje prowadzone były dla 6 samochodów osobowych o różnej wielkości oraz dla 3 samochodów hybrydowych. Model obliczeniowy uwzględniał szczególne cechy samochodów hybrydowych, takie jak na przykład układ odzyskiwania energii w czasie hamowania.

Na rysunku 3 przedstawiona jest zależność pomiędzy symulowanym zużyciem energii dla samochodów osobowych poruszających się z różnymi (ale stałymi) prędkościami dla różnych wartości współczynnika oporu toczenia. Na rysunku przedstawione są również wyniki uzyskane dla symulowanego profilu prędkości FTP 75. Wyniki wskazują, że przy zmniejszeniu oporu toczenia o 50% przy prędkości 30 km/h zużycie energii spada o 21%. Dla prędkości 130 km/h i identycznej zmiany współczynnika oporu toczenia różnica w zużyciu energii wynosi już tylko 10%.

Ponieważ operowanie wieloma charakterystykami uzyskanymi dla różnych współczynników oporów toczenia nie jest praktyczne, wprowadzono syntetyczny wskaźnik nazwany *współczynnikiem wpływu oporu toczenia na zużycie energii pojazdu* (IF_{RR}). Wskaźnik ten wskazuje o ile zmieni się zużycie energii przez pojazd w stosunku do względnej zmiany współczynnika oporu toczenia. Jeśli na przykład przy

prędkości 90 km/h współczynnik $IF_{RR}=0.31$ a zmiana współczynnika oporu toczenia wyniesie 20% to należy spodziewać się zmiany zużycia energii o $0.31 \cdot 20\% = 6.2\%$. Współczynniki wpływu dla współczesnych samochodów osobowych oraz hybrydowych przedstawione są w Tab. 1

Tab. 1 Współczynniki wpływu oporu toczenia na zużycie energii dla samochodów osobowych i hybrydowych

Typ pojazdu	Jazda ze stałą prędkością							Jazda miejska FTP-75
	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h	150 km/h	
Klasyczny	0.46	0.45	0.38	0.31	0.24	0.19	0.16	0.22
Hybrydowy	0.42	0.43	0.38	0.31	0.25	0.21	0.17	0.32

Metody pomiaru oporu toczenia opon samochodowych

Pomimo tego, że opór toczenia należy do najważniejszych charakterystyk określających współpracę opony z nawierzchnią drogową, to jego pomiar jest nadal skomplikowany i nie doczekał się w pełni standaryzacji. Co prawda istnieją normy dotyczące laboratoryjnych badań oporu toczenia, np. [3, 4, 5], ale dotyczą one jedynie metod laboratoryjnych, które nadają się do badania opon ale nie nadają się do badania nawierzchni [6].

Metody laboratoryjne bazują na maszynach bieżnych, które z jednym wyjątkiem (BASt, Niemcy) wyposażone są w bębny zewnętrzne po których toczą się badane koła - patrz Rys. 4. Na bębnach zewnętrznych nie można położyć normalnych nawierzchni drogowych, gdyż siła odśrodkowa spowodowała by ich oderwanie i zniszczenie stanowiska badawczego. Co najwyżej można wyposażyć bębny w repliki nawierzchni wykonane z laminatów lub innych materiałów tak, aby zachowana była tekstura oryginalnej nawierzchni. Nawet najlepiej wykonana replika ma jednak dużą krzywiznę oraz inną sztywność niż nawierzchnia oryginalna. Przy badaniu wpływu nawierzchni na opór toczenia najlepiej jest więc wykorzystywać metody drogowe w których urządzenie badawcze porusza się po drodze publicznej lub po odcinku testowym na torze doświadczalnym.

Badania oporu toczenia w warunkach drogowych są bardzo trudne. Do ich prowadzenia stosowane są dwie metody - metoda wybiegu oraz metoda przyczepowa. Metoda wybiegu polega na rozpędzeniu pojazdu badawczego do zadanej prędkości, a po odłączeniu napędu rejestrowaniu parametrów ruchu takich jak prędkość i droga w funkcji czasu aż do zatrzymania. Następnie na drodze matematycznej, poprzez rozwiązywanie równań ruchu pojazdu oblicza się opór toczenia. Niestety aby przeprowadzić prawidłowo pomiary trzeba dokładnie znać współczynnik aerodynamiczny pojazdu, przekrój czołowy, masę pojazdu oraz momenty bezwładności elementów wirujących połączonych z kołami oraz straty energetyczne w podzespołach napędowych sprzęgniętych z kołami pojazdu. Konieczne jest również monitorowanie prędkości i kierunku wiatru podczas całej próby wybiegu. Dla wyeliminowania wpływu ewentualnych wzniesień toru pomiarowego konieczne jest wykonywanie badań w obie strony, co nie zawsze jest możliwe. Doświadczenia wskazują, że wyniki uzyskiwane metodą wybiegu obarczone są dużymi błędami a same pomiary są bardzo czasochłonne.

Drugą metodą badań drogowych jest metoda przyczepowa. Specjalna przyczepa badawcza holowana przez samochód osobowy lub dostawczy wyposażona jest w układ umożliwiający pomiar siły oporu



toczenia. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że metoda przyczepowa jest łatwa w realizacji, ale tak nie jest. Siła oporów toczenia wynosi średnio jedynie około 0.8 - 1.3% siły nacisku koła na jezdnię co powoduje, że konieczne jest dokładne mierzenie małych sił w układzie obciążonym siłami większymi o 2 rzędy wielkości. Nawet najmniejsze niedokładności geometryczne systemu pomiarowego mogą powodować wpływ siły obciążającej koło badane na odczyty siły oporów ruchu. Również przyśpieszenie lub opóźnienie pojazdu doświadczalnego powoduje wystąpienie w układzie pomiarowym sił bezwładności które zakłócają pomiar [7].

W chwili obecnej na całym świecie jest tylko kilka przyczep badawczych dostosowanych do badania oporu toczenia opon do samochodów osobowych, z czego jedynie 4 przyczepy są intensywnie eksploatowane. Dwie z tych przyczep znajdują się na Politechnice Gdańskiej, jedna w Belgii (BRCC) i jedna w Niemczech (BAST). Najnowsza przyczepa Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (WMPG) o nazwie R² Mk.2 przedstawiona jest na rysunku 5. Przyczepa ta wykorzystuje układ pomiarowy oparty na pionowym wahaczu który zapewnia wyeliminowanie składowej poziomej od siły pionowej obciążającej koło pomiarowe. Dodatkowo zastosowany jest opatentowany przez PG układ mechaniczny eliminujący wpływ nachylenia drogi oraz przyśpieszenia [8]. Zarówno układ pomiaru wychylenia wahacza jak i system określający położenie przyczepy względem nawierzchni oparte są na wysokiej jakości laserach - patrz Rys. 6. Przyczepa wyposażona jest dodatkowo w laserowy system pomiaru tekstury nawierzchni, który może dokonywać pomiarów jednocześnie z pomiarami oporów toczenia.

Przyczepy R² wykorzystywane są intensywnie do badań prowadzonych w ramach projektów ramowych Unii Europejskiej oraz projektów zleczanych przez kontrahentów z krajów UE oraz USA. W porównaniu do pozostałych przyczep, przyczepy R² wykazują znacznie większą efektywność pomiarów, gdyż możliwe jest badanie kilku odcinków pomiarowych zlokalizowanych jeden za drugim za jednym przejazdem. Inne przyczepy wymagają osobnych przejazdów dla każdej nawierzchni oraz przejazdów kalibracyjnych.

WMPG pracuje nad określeniem wpływu tekstury nawierzchni na opór toczenia [9] oraz nad optymalizacją nawierzchni drogowych dla ruchu pojazdów elektrycznych. Prowadzone są również prace zmierzające do stworzenia międzynarodowej normy określającej metodykę prowadzenia badań oporu toczenia w warunkach drogowych. Autorzy przewidują, że część wyników zostanie w przyszłości opublikowana w Magazynie Autostrady.

Podziękowanie

Prace przedstawione w niniejszym artykule prowadzone były w ramach projektu PBS2 - ROLRES i Projektu Polsko-Norweskiego LEO finansowanych przez NCBiR.

Bibliografia

1. 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, Berlin, 23-26 June 1992

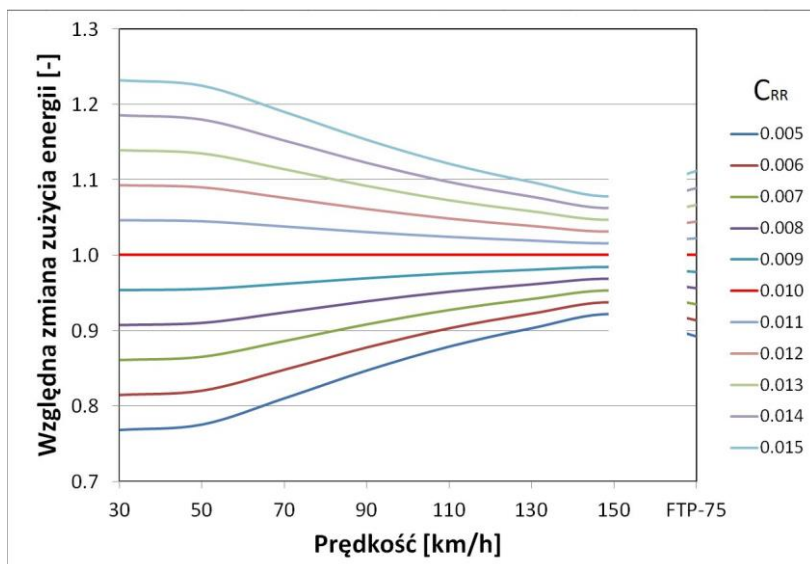
2. Lak M.A, Degrande G., Lombaert G.: "Influence of poroelastic road surfaces on ground borne vibration due to traffic", Deliverable D6.8, 7FP Persuade, 2013
3. Sandberg U., Goubert L., Biligiri K.P., Kalman B.: "State-of-the-Art regarding poroelastic road surfaces", Deliverable D8.1, 7FP "PERSUADE", 2010, wersja elektroniczna: http://persuade.fehrl.org/?m=3&id_directory=1710
4. International Standard ISO 18164, "Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres - Methods of measuring rolling resistance".
5. International Standard ISO 28580, "Passenger car, truck and bus tyres - Methods of measuring rolling resistance - Single point test and correlation of measurement results".
6. SAE Recommended Practice J1269, "Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires".
7. Ejsmont J., Świczko-Żurek B.: "Methods of Tire Rolling Resistance Measurements", COTUME'2014, Congrès Tunisien de Mécanique, Sousse, Tunezja 2014.
8. Ejsmont J., Taryma S.: " Tire rolling resistance measurements on the road and in the laboratory", Tire Technology International. - 2008, s.46-48 - ISSN 1462-4729, The Annual Review of Tire Materials and Tire Manufacturing Technology.
9. Ejsmont J., Taryma S., Ronowski G.: "Urządzenie do pomiaru oporów toczenia opon, zwłaszcza samochodowych w warunkach drogowych podczas jazdy", Patent na wynalazek nr P.384491, 01/2013
10. Świczko-Żurek B., Ejsmont J., Ronowski G.: "Reduction of Tire Rolling Resistance by Optimization of Road Surfaces and Tires", COTUME'2014, Congrès Tunisien de Mécanique, Sousse, Tunezja 2014.



Rys. 1 Otulanie ("*enveloping*") nawierzchni jezdni przez elementy bieżnika opony



Rys. 2 Nawierzchnia poroelastyczna PERS-HET na odcinku doświadczalnym w Szwecji



Rys. 3 Względny wpływ zmian współczynnika oporu toczenia (odniesiony co $C_{RR}=0.01$) na zużycie energii przez konwencjonalne samochody osobowe.