

Piotr A. Wrzecioniarz, Wojciech Ambroszko, Aleksandra Pindel

Granice oporów ruchu w pojazdach. Opór toczenia

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.394

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówione zostały granice oraz przykładowe metody minimalizacji oporu toczenia.

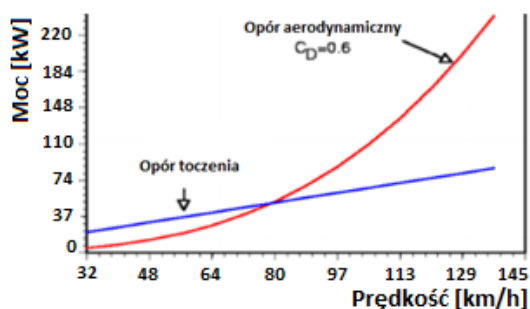
Słowa kluczowe: opór toczenia, samochody osobowe, samochody ciężarowe, pociągi, Hyperloop.

Wstęp

Obniżenie zużycia energii oraz zwiększenie efektywności jej wykorzystania jest bardzo istotną kwestią, także na obecnym etapie rozwoju motoryzacji charakteryzującym się m. in. zwiększającą się ilością pojazdów elektrycznych. Zminimalizowanie strat energetycznych w pojazdach elektrycznych przyczyni się również do zwiększenia ich zasięgu. Ważnymi czynnikami wpływającymi na efektywność wykorzystania energii w pojazdach jest wartość oporów aerodynamicznego i toczenia. Ich wielkość zależy od wielu czynników. Praca niniejsza podejmuje problem granic, do których można się zbliżyć projektując współczesne pojazdy zarówno poruszające się w warunkach normalnego ruchu drogowego i szynowego, jak i w przypadku ruchu w ograniczonej przestrzeni z obniżonym ciśnieniem (rozważania typu Hyperloop [21]). Bardziej szczegółowo rozważa się opór toczenia.

1. Zestawienie oporu toczenia i oporu aerodynamicznego

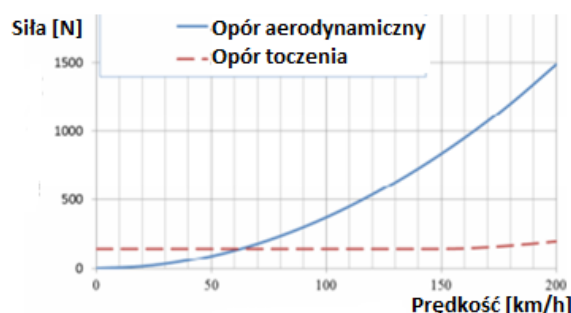
Wzajemne relacje oporów toczenia i aerodynamicznego są różne. W przypadku przeciętnych samochodów ciężarowych wielkość oporu aerodynamicznego zaczyna dominować nad wartością oporu toczenia przy prędkości około 80 km/h (50 MPH). Dla maksymalnych prędkości straty wynikające z działania oporu aerodynamicznego znacząco przewyższają straty wynikające z oporu toczenia. Przy prędkości 100 km/h (62 MPH) jest to około 50% (Rys. 1.) [7], [10].



Rys. 1. Porównanie wartości oporu aerodynamicznego i toczenia w samochodach ciężarowych [10].

W przypadku pociągów wartość oporu aerodynamicznego zaczyna dominować nad wartością oporu toczenia przy prędkości około 60 km/h [2]. W typowym samochodzie osobowym poruszającym się z prędkością 60 km/h wartości oporu aerodynamicznego i oporu toczenia osiągają porównywalną wartość. Oznacza to, że w warunkach miejskich opór toczenia jest odpowiedzialny za większą część wydatku energetycznego, niż opór aerodynamiczny. Poza miastem, dla prędkości 90 km/h oraz dla ruchu po autostradzie

wartość oporu aerodynamicznego wzrasta odpowiednio dwu- i czterokrotnie względem wartości oporu toczenia (Rys. 2.) [7].



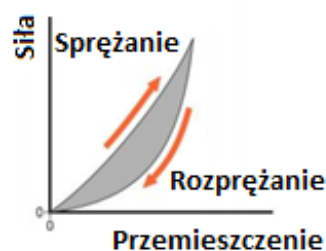
Rys. 2. Porównanie wartości oporu aerodynamicznego w samochodach osobowych [6].

Obniżając, poprzez zmiany konstrukcyjne, położenie obu krzywych, osiąga się inne wartości punktu dominacji jednego rodzaju oporu.

2. Opór toczenia

2.1 Definicja oporu toczenia

Opór toczenia to siła powstała na skutek toczenia się jednego ciała po drugim, która działa w kierunku przeciwnym do ruchu i przyczynia się do jego hamowania. Dzieje się tak m. in. dlatego, że pewna ilość energii jest wykorzystywana na sprężyste odkształcenie ciał pod wpływem obciążenia. Część tej energii jest odzyskiwana później w miarę postępowania obrotu, a co za tym idzie odciążenia ciał w punkcie deformacji. Cykl taki nazywany jest histerezą (Rys. 3.). Utracona w ten sposób energia jest rozpraszana w postaci ciepła na skutek powtarzanych cykli sprężania i rozprężania w punkcie styku obu ciał. Energia może zostać utracona również poprzez m. in. permanentne odkształcenie ciał [4], [7].



Rys. 3. Histereza powstała na skutek sprężania i rozprężania [13].

Opór toczenia wyrażany jest ogólnym wzorem:

$$F_r = N * c_r$$

gdzie:

F_r : opór toczenia [N],

N : obciążenie, siła normalna działająca na toczące się ciało [N],

c_r : współczynnik oporu toczenia.

Jak wynika z powyższego wzoru opór zależy od działającego obciążenia oraz od współczynnika oporu toczenia. Wartość współ-

czynnika zależy m. in. od rodzajów materiałów, z których wykonane są ciała, chropowatości ich powierzchni oraz od stopnia odkształcenia jakiego ulegają podczas ruchu. Wartość oporu nie jest funkcją liniową. Przy stałym obciążeniu jego wartość nieznacznie wzrasta z prędkością [7], [15].

2.2 Porównanie wielkości współczynnika oporu toczenia dla różnych rodzajów par tocznych

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wartości współczynnika oporu toczenia.

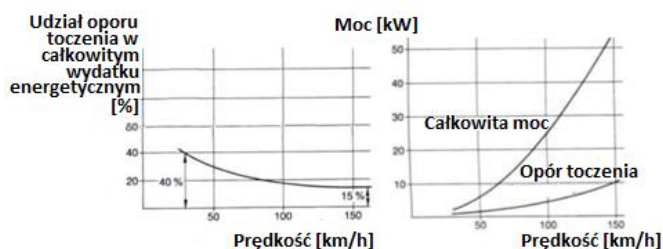
Tab. 1. Przykładowe wartości oporu toczenia dla wybranych par tocznych [16][17][18][19].

Współczynnik oporu toczenia	Rodzaj pary tocznej
0.001-0.0015	utwardzane łożyska kulkowe - stal
0.001-0.002	stalowe koła pociągów - szyny
0.0019-0.0065	żeliwne koła pociągów - szyny
0.005	koła tramwajowe - zabrudzone szyny
0.0065 [36]	Michelin SYMMETRY P225/60R16 low resistance tire
0.007 [36]	Bridgestone DUELER H/T 113S P265/70R17 low resistance tire
0.006-0.01	opona samochodu ciężarowego - asfalt
0.01-0.015	przeciętna opona samochodowa - beton
0.03	przeciętna opona samochodowa - asfalt
0.03-0.058	poliuretanowe koło - stal
0.04-0.08	przeciętna opona samochodowa - utwardzony piasek
0.6	stalowe koło - asfalt

Średnio opony samochodowe osiągają wartość współczynnika oporu toczenia rzędu $0,01 \div 0,03$. Koła pociągów za to wykazują 10 razy mniejszy opór toczenia niż opony. Współczynnik oporu toczenia w tym przypadku jest równy $0,001 \div 0,002$. Ponadto koła pociągów są dużo bardziej trwałe, pozwalają na transport cięższych zestawów oraz umożliwiają rozwijanie dużo wyższych prędkości. Masa pojazdu przypadająca na jednego pasażera dla samochodów osobowych jest niższa niż dla pociągów osobowych [7], [9]. Natomiast pociągi towarowe mogą przewieźć więcej towarów niż samochody ciężarowe przy tym samym wydatku energetycznym. Analiza tych podstawowych parametrów będzie prowadziła do powstania nowych środków transportu, które pojawią się w najbliższej przyszłości.

2.3 Rola oporu toczenia w wydatku energetycznym pojazdu

Rysunek 4 przedstawia udział oporów toczenia w średnim, całkowitym wydatku energetycznym pojazdu. W miarę zwiększania prędkości poruszającego się pojazdu obserwuje się procentowy spadek oporów toczenia w całkowitym wydatku energetycznym pojazdu. Wielkość oporu wzrasta nieznacznie podczas wzrostu prędkości pojazdu. Wykresy ukazują wagę zagadnienia redukcji oporu toczenia w samochodach miejskich poruszających się z prędkością do 50 km/h, co w dużej mierze dotyczyć będzie przyszłych miejskich pojazdów elektrycznych [7]. Optymalizacja tych oporów będzie bardzo ważnym zagadnieniem w najbliższej przyszłości.

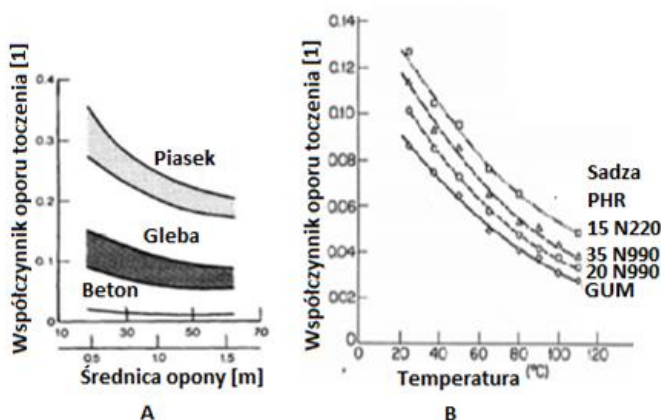


Rys. 4. Rola oporu toczenia w całkowitym wydatku energetycznym pojazdu [10].

2.4 Sposoby na obniżenie oporu toczenia w pojazdach

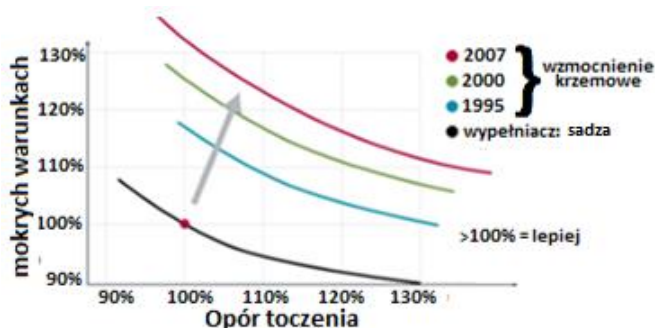
Opony samochodowe oprócz małego oporu toczenia muszą też spełniać szereg innych wymagań w tym takich, które są odpowiedzialne za bezpieczeństwo w czasie jazdy. Obniżenie oporów ruchu może mieć wpływ na zmianę wielu innych parametrów opony np. tłumienie drgań, przyczepność, aquaplaning. Duża wartość histerezy odpowiada za dobrą przyczepność, ale znacząco podwyższa wartość współczynnika oporu. W związku z powyższym, dobór optymalnych parametrów jest kwestią kompromisu [7, 13]. Istnieje jednak wiele sposobów na obniżenie oporu toczenia w oponach. Należą do nich między innymi odpowiedni dobór materiałów i bieżnika, optymalizacja średnicy i szerokości opony, dobór optymalnego ciśnienia, skrócenie czasu osiągnięcia stabilizacji temperaturowej oraz zmniejszenie masy pojazdu. Nie można pominąć również dużego udziału rodzaju i stanu nawierzchni. Mniejsze koła wykazują wyższą wartość oporu toczenia niż większe (Rys. 5.a). Jest to związane z ich większą deformacją. Większe koła o tej samej konstrukcji i wykonane z tego samego materiału odkształcają się w mniejszym stopniu przy tym samym ciśnieniu i tej samej masie pojazdu. Zwężenie kół również wpływa na wzrost oporu toczenia. Dzieje się tak przez wzrost ugięcia w kierunku podłużnym, co z kolei wpływa w znacznym stopniu na zmniejszenie owalu opony. Szersza opona charakteryzuje się większą tendencją do ugięcia poprzecznego niż podłużnego, przez co odchylenie od owalu będzie mniejsze. Należy jednak wspomnieć, że wzrost szerokości opony powoduje również wzrost jej oporów aerodynamicznych oraz wzrost masy, który prowadzi do zwiększenia siły bezwładności podczas przyspieszania i hamowania. W rezultacie samochód zmienia prędkość wolniej oraz zużywa na to więcej energii. Aspekt ten jest ważny w szczególności podczas jazdy w warunkach miejskich, w których występują wielokrotne cykle zmian prędkości. Zwiększenie ciśnienia w węższych oponach w celu kompensacji strat wynikających z podłużnego odkształcenia (zmniejszenie histerezy) daje umiarkowane efekty [7, 11, 20]. Co więcej, dla zwiększenia ciśnienia w oponie konieczne jest zwiększenie szerokości i grubości metalowych umocnień, a to z kolei ma wpływ na zwiększenie jej masy, co jak było omówione wcześniej, nie jest najlepszym rozwiązaniem [13]. Większe ciśnienie w oponach wpływa również na zmniejszenie ich zdolności do absorbowania wstrząsów, wzrost tendencji do ślizgu oraz podskakiwania, a przez to do biegu jałowego [20].

Zmniejszanie się wartości oporu toczenia zachodzi także w miarę wzrostu długości jazdy poprzez osiągnięcie przez oponę równowagi temperaturowej. Opona, która osiągnęła już stan równowagi temperaturowej, ma zauważalnie mniejszy współczynnik oporu toczenia w danych warunkach niż taka, która została dopiero wprawiona w ruch (Rys. 5.b). Warunki miejskie nie sprzyjają niestety osiągnięciu odpowiedniej temperatury opon. Powodem tego jest zbyt mała średnia długość jazdy oraz częste cykle zatrzymań. Czas ten można jednak próbować skracać poprzez odpowiednią konstrukcję opon oraz dobór właściwych materiałów. Zużywanie bieżnika również ma wpływ na zmniejszanie wartości oporu na skutek mniejszej ilości materiału, który podlega deformacji [7], [9]. Również sam rodzaj bieżnika odgrywa dużą rolę w kształtowaniu się wielkości oporu toczenia. Opony o skośnym bieżniku wykazują większy współczynnik oporu toczenia niż np. koła o bieżniku podłużnym. Co więcej, im drobniejszy bieżnik tym mniejszy współczynnik oporu toczenia. Niestety wraz z wielkością bieżnika maleją też zdolności traktacji i trwałość.



Rys. 5. a - Zależność średnicy opony i podłoża od wartości współczynnika oporu toczenia [13], b - Zależność temperatury i materiału od wartości współczynnika oporu toczenia [4].

Nie tylko fizyczne aspekty konstrukcji opon mają wpływ na wielkość ich oporów toczenia. Poprzez modyfikacje istniejących mieszanek gum otrzymuje się zupełnie nowe materiały o lepszych właściwościach np. redukcja ilości wypełniaczy węglowych powoduje zmniejszenie współczynnika oporu toczenia (Rys. 6.). Niestety wpływa to również na szybkość zużycia opon. Efekt ten można jednak minimalizować poprzez dobór optymalnego procesu wytwarzania np. zwiększenie czasu mieszania lub poprzez utworzenie wypełniacza w postaci agregatów, a następnie połączenie go z gumą przy użyciu grup funkcyjnych, którymi w przypadku węgla są aminy (w przypadku krzemu jest to silanol). Wadą tego rozwiązania jest jednak wzrost lepkości mieszanki, co znacznie utrudnia jej przetwarzanie [7, 12].

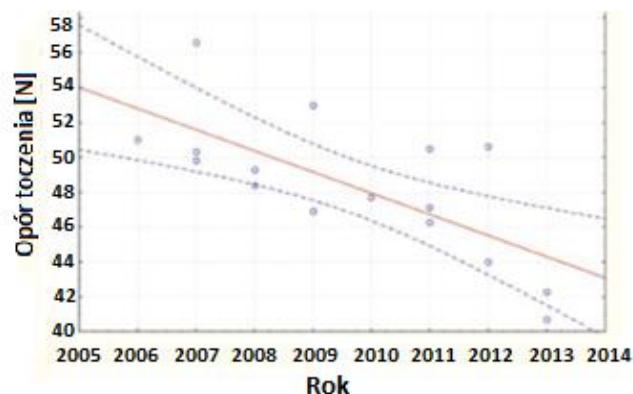


Rys. 6. Rozwój materiałów i ich wpływ na wartość oporu toczenia w oponach na przestrzeni lat [5].

2.5 Zmiany oporu toczenia na przestrzeni lat

Wykres na rys. 7 przedstawia spadek wartości średniego oporu toczenia w oponach na przestrzeni ostatnich lat [1].

Aktualnie głównym wyzwaniem w dalszym obniżaniu wartości oporu toczenia w pojazdach jest projektowanie nowych materiałów, które zapewnią optymalną deformację opony na wybojach przy jednoczesnym zachowaniu minimalnej deformacji podczas toczenia po gładkiej powierzchni [5, 7]. Najlepsze współcześnie opony osiągnęły współczynnika oporu toczenia do 0.0065. Przykładem takich opon są Michelin Symmetry P225/60R16 [17]. W przypadku szybkiej kolei próbuje się całkowicie wyeliminować opory toczenia poprzez zastąpienie tradycyjnych kół żółyskami powietrznymi lub systemami lewitacji elektromagnetycznej [7].



Rys. 7. Średni spadek wartości oporu toczenia w oponach na przestrzeni lat [1].

Podsumowanie

Obniżanie współczynnika oporu toczenia w oponach jest zadaniem skomplikowanym i niezwykle istotnym, gdyż ma on wpływ na bezpieczeństwo w czasie jazdy. Dobór odpowiednich parametrów opony jest zawsze kwestią kompromisu, a wypadkowa wartość oporu toczenia zależy nie tylko od samych opon, ale również od nawierzchni, po której porusza się pojazd. Pomimo postępu w przeszłości w dziedzinie minimalizowania wartości oporu toczenia w pojazdach, jest w tym zakresie jeszcze wiele możliwości osiągnięcia coraz lepszych wyników m. in. w zakresie ulepszenia materiałów, z których wykonane są koła, zastąpienie kół lewitacją elektromagnetyczną lub pneumatyczną, ale także rozwojem nawierzchni dróg. Ostatnie lata charakteryzują się poszukiwaniem nowych materiałów, prowadzoną od wielu lat optymalizacją ale także generowaniem całkiem nowych rozwiązań minimalizujących opory toczenia w jeszcze większym stopniu. Przykładem może być rozwój koncepcji Hyperloop [21]. Należy mieć nadzieję, że intensyfikacja prac prowadzonych w wielu miejscach na świecie przy zaangażowaniu znacznych środków finansowych doprowadzi niebawem do znacznego obniżenia oporów toczenia w pojazdach przyszłości.

Bibliografia:

1. Pfefer P., 6th International Munich Chassis Symposium 2015: Chassis Tech.
2. Orellano A., „Aerodynamic of High Speed Trains”, Vehicle aerodynamic lecture, Stockholm, KTH, may 2010.
3. Wrzecioniarz P., Ambroszko W., Górniak A., „Energy efficiency design of powertrain and body”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
4. Dodge R., Kelly, Clark, Samuel, „Handbook for the rolling resistance of pneumatic tires”, 1979.
5. Pike E., „Opportunities to Improve Tire Energy Efficiency”, The International Council in Clean Transportation, 2011.
6. Vdovin A., „Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars”, Thesis for the degree of licentiate of engineering, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2013.
7. Nowak A., Praca magisterska, Podstawowe opory ruchu w pojazdach przyszłości, wykonana pod kierunkiem dr hab inż. Piotra Wrzecioniarza prof. nadzw. PWr, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Maj 2016.
8. Ambroszko W., Wrzecioniarz P., Postęp w budowie pojazdów w świetle opinii rzeczoznawczych. Praca zbiorowa., Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
9. Barkan C., Railroad Transportation Energy Efficiency, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.

10. Versonnen E., „Rolling Resistance”, KdG, University College Antwerp, 2011.
11. Światowe trendy w ograniczaniu emisji samochodowej i ich wpływ na rozwój napędów pojazdów, paliw, olejów silnikowych i metod badawczych – znaczenie globalne nowych regulacji ograniczania emisji WLTP i RDE – podsumowanie 6th International Exhau, Przegląd techniczny, 14.10.2018.
12. The Pneumatic Tire, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety, Administration, 2006.
13. Mohan B., Redrouthu S. D., Tire Modelling For Rolling Resistance, University of Technology Göteborg, 2014.
14. Wrzecioniarz P., Wstęp do metodologii projektowania samochodów oszczędnych. KONES 81, Wrocław-Rydzyna, 1981.
15. http://www.dimnp.unipi.it/guiggiani-m/Michelin_Tire_Rolling_Resistance.pdf, May 2016.
16. http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html, May 2016.
17. https://en.wikipedia.org/wiki/Low_rolling_resistance_tire, May 2016.
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance, May 2016.
19. https://pl.wikipedia.org/wiki/Tarcie_toczne, May 2016.
20. http://www.schwalbetires.com/tech_info/rolling_resistance, May 2016.
21. http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf, May 2016.

Limitations of vehicle movement resistances.

Rolling resistance

In the paper limitations and exemplary methods of rolling resistance minimization are described. Changes of value of rolling resistance coefficient during years and values for exemplary rolling pairs are presented. Conclusions about future progress are formulated.

Keywords: rolling resistance, rolling resistance coefficient, cars, trucks, trains, Hyperloop.

Autorzy:

dr hab inż. **Piotr A. Wrzecioniarz** prof. nadzw. PWr – Politechnika Wroclawska, piotr.wrzecioniarz@pwr.edu.pl
 dr inż. **Wojciech Ambroszko** – Politechnika Wroclawska, wojciech.ambroszko@pwr.edu.pl,
 mgr inż. **Aleksandra Pindel** – Politechnika Wroclawska, aleksandra.pindel@pwr.edu.pl.