

**Witold Luty**

Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

**Marcin Zwierzyński**

Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

**Stanisław Taryma**

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

## **ANALIZA OPORU TOCZENIA KÓŁ JEZDNYCH SAMOCHODU PODCZAS JAZDY PO RÓŻNYCH NAWIERZCHNIACH DROGOWYCH**

Rękopis dostarczono: marzec 2016

**Streszczenie:** W pracy została podjęta problematyka zmiany oporu toczenia kół jednego samochodu w zależności od typu nawierzchni drogowej. Przeprowadzono badania eksperymentalne samochodu ciężarowego podczas jazdy po różnych nawierzchniach drogowych. Podczas badań wyznaczano charakterystyki wybiegu pojazdu. Na podstawie utworzonych charakterystyk wybiegu wyznaczono długości drogi wybiegu oraz uśrednione wartości współczynnika oporu toczenia kół pojazdu. Oceniono wpływ typu nawierzchni drogowej na uzyskane wartości współczynnika oporu toczenia kół pojazdu oraz wynikające z tego zmiany zużycia paliwa.

**Słowa kluczowe:** opór toczenia, metoda wybiegu, makrotekstura nawierzchni

### **1. WSTĘP**

Siła oporu toczenia kół jezdnych jest stałym składnikiem oporów ruchu pojazdu. Ma bezpośredni wpływ na zużycie paliwa w czasie jazdy, choć w mniejszym stopniu może wpływać na właściwości trakcyjne pojazdu [1, 2, 3, 6]. Opór toczenia koła ogumionego jest wynikiem jednoczesnego występowania wielu zjawisk fizycznych, w tym głównie rozpraszania energii na skutek [4, 5, 9, 12, 16]:

- cyklicznego odkształcania opony w kierunku promieniowym,
- występowania tarcia ślizgowego pomiędzy klockami bieżnika a podłożem,
- emisji hałasu.

W warunkach laboratoryjnych, przy ustalonych wartościach ciśnienia powietrza w kole i obciążenia normalnego, opór toczenia koła zależy od cech konstrukcyjnych opony determinujących jej elementarne właściwości, w tym od [5, 9, 11, 12, 15, 16]:

- konstrukcji oraz liczby warstw kordu osnowy i opasania,
- materiału gumy bieżnika oraz gumy innych elementów konstrukcyjnych,
- rozmiaru i współczynnika wysokości profilu.

W rzeczywistych warunkach ruchu z reguły należy się liczyć ze wzrostem oporu toczenia kół pojazdu. Występujące podczas jazdy pochylenie kół, zbieżność oraz toczenie kół ze znośzeniem bocznym są przyczyną rozpraszania dodatkowych porcji energii przez opony. Jednak istotną przyczyną zmian oporu toczenia kół jezdnych pojazdu mogą być również właściwości podłoża np. chropowatość lub właściwości lepko-sprężyste. Dotyczy to nawet dróg utwardzonych. Celem podjętej pracy była ocena wpływu różnych rodzajów nawierzchni drogi utwardzonej na opór toczenia kół jezdnych samochodu.

## 2. PROGRAM I WARUNKI BADAŃ

Wykonano badania eksperymentalne pojedynczego koła ogumionego w warunkach laboratoryjnych oraz samochodu podczas jazdy po różnych nawierzchniach drogowych. Badania eksperymentalne wykonano w następujących warunkach:

a) badanie stanowiskowe pojedynczego koła

- typ stanowiska – bębnowe,
- metoda pomiaru – metoda momentowa,
- rodzaje nawierzchni roboczej bębna – stal (steel), mastyks grysowy (sma), papier ścierny (sw),
- prędkość toczenia koła –  $V = 30, 40, 50$  km/h,
- obciążenie normalne koła –  $F_z = 11000, 18375$  N,
- ciśnienie powietrza w kole –  $p_k = 210, 420$  kPa.

b) badania drogowe pojazdu

- typ nawierzchni drogi - nawierzchnia drogowa w postaci płyt betonowych (PB - płyty betonowe), nawierzchnia drogowa asfaltowa dobrej jakości (GA - gładki asfalt), nawierzchnia asfaltowa dobrej jakości (SA - szorstki asfalt), nawierzchnia asfaltowa na lotnisku (AL - asfalt lotnisko), nawierzchnia betonowa na lotnisku (PBL - płyty betonowe lotnisko),
- liczba przejazdów – dwa przejazdy w obu kierunkach jazdy w celu zminimalizowania wpływu pochylenia drogi,
- ciśnienie powietrza w kołach –  $p_k = 210$  kPa oraz  $p_k = 420$  kPa,
- masa pojazdu  $m = 5920$  kg,
- warunki atmosferyczne – brak opadów atmosferycznych, wiatr słaby.

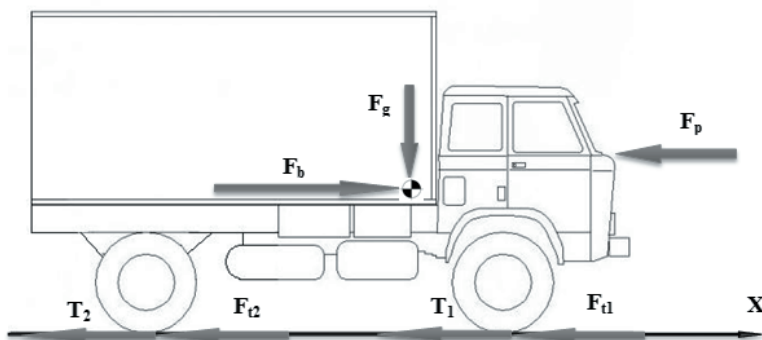
W badaniach wykorzystano samochód małej ładowności wysokiej mobilności Star 944 wyposażony w opony bezdętkowe całostalowe. Pojedyncze kompletne koło pojazdu poddano badaniom stanowiskowym.



### 3. METODA BADAŃ

Pomiar współczynnika oporu toczenia pojedynczego koła ogumionego wykonano na stanowisku bębnowym metodą momentową [7].

Opór toczenia kół jezdnych pojazdu mierzono metodą wybiegu. W warunkach wybiegu na pojazd działają siły przedstawione na rysunku 1. W bilansie sił dodano siłę oporu, która jest skutkiem oporów wewnętrznych układu napędowego pojazdu. Ta siła jest często pomijana w dostępnej literaturze jako nieistotna [1]. Jednak ze względu na cel badań uwzględniono tę siłę, a jej wartość oszacowano w badanym pojeździe na podstawie wyników pomiarów w ramach specjalnie przygotowanych i przeprowadzonych badań eksperymentalnych.



gdzie:

- $F_g$  – siła ciężkości,
- $F_b$  – siła oporu bezwładności pojazdu,
- $F_p$  – siła oporu powietrza,
- $F_{t1}$  – siła oporu toczenia dla przedniej osi,
- $F_{t2}$  – siła oporu toczenia dla tylnej osi,
- $T_1$  – siła oporu tarcia wewnętrznego układu napędowego działająca w przedniej osi jezdnej,
- $T_2$  – siła oporu tarcia wewnętrznego układu napędowego działająca w tylnej osi jezdnej,
- $X$  – kierunek ruchu.

Rys. 1. Schemat sił działających na pojazd w warunkach wybiegu

Na podstawie rysunku 1 zapisano bilans sił działających na pojazd w stanie wybiegu względem jego osi podłużnej:

$$F_p + F_t + T - F_b = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- $F_p$  – siła oporu powietrza,
- $F_t = F_{t1} + F_{t2}$  – suma sił oporu toczenia dla całego pojazdu,



$T = T_1 + T_2$  – suma sił oporu tarcia wewnętrznego układu napędowego pojazdu,  
 $F_b$  – siła oporu bezwładności pojazdu.

Po przekształceniu wyrażenia (1) zapisano zależność na współczynnik oporu toczenia  $f_t$  kół jezdnych pojazdu:

$$f_t = -\frac{\rho \cdot A \cdot c_x \cdot v_p^2}{2 \cdot m_c \cdot g} + \frac{\delta \cdot a}{g} - \frac{T}{m_c \cdot g} \quad (2)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość powietrza [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$A$  – powierzchnia czołowa pojazdu [ $\text{m}^2$ ],

$c_x$  – współczynnik oporu powietrza w kierunku osi podłużnej pojazdu [-],

$v_p$  – prędkość samochodu (względem ośrodka) [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],

$\delta$  – współczynnik mas wirujących [-],

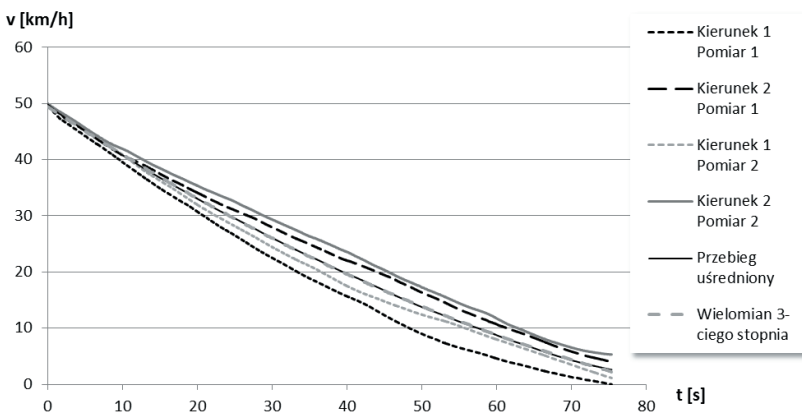
$m_c$  – masa całkowita pojazdu [ $\text{kg}$ ],

$a$  – opóźnienie ruchu pojazdu [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],

$T$  – suma sił oporu tarcia wewnętrznego układu napędowego dla całego pojazdu.

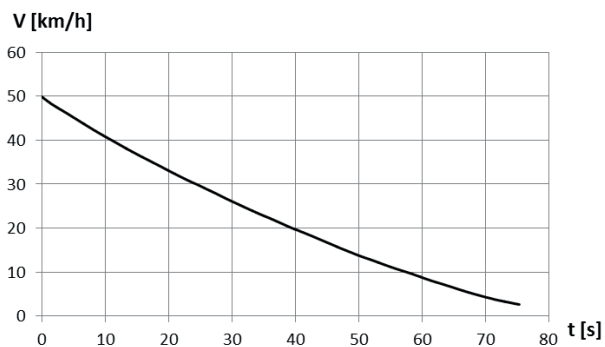
Wartość współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu określono na podstawie wyznaczonych charakterystyk wybiegu pojazdu [8,13]. Pojazd rozpędzono do określonej prędkości, a następnie napęd wyłączano poprzez ustawienie dźwigni zmiany biegów w położeniu neutralnym. Podczas swobodnego toczenia rozpędzonego pojazdu mierzono i rejestrowano prędkość jazdy, aż do całkowitego zatrzymania pojazdu. Czynności powtarzano na wszystkich wybranych nawierzchniach, przy dwóch wartościach ciśnienia powietrza w kołach. Otrzymane charakterystyki wybiegu (rys. 2) stanowiły podstawę do oszacowania wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu.



Rys. 2. Przykładowy zestaw charakterystyk wybiegu pojazdu



Na podstawie zestawu charakterystyk wybiegu pojazdu wyznaczano charakterystykę zastępczą poprzez uśrednianie uzyskanych wartości prędkości jazdy w każdej chwili czasu (rys. 3).

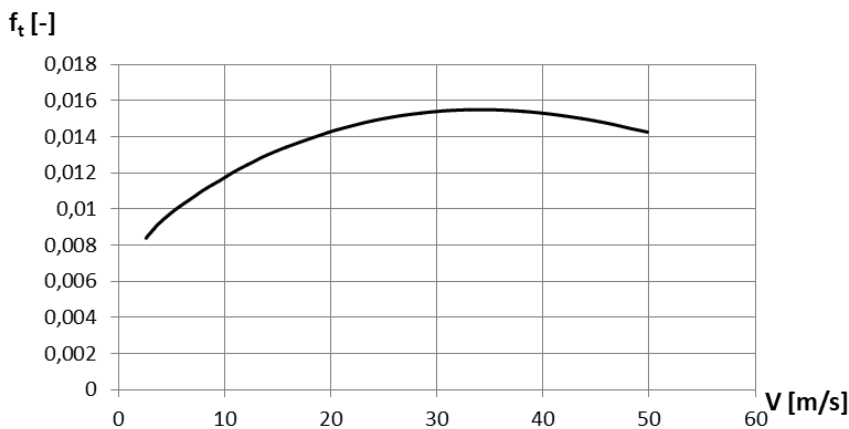


Rys. 3. Przykładowa charakterystyka zastępcza wybiegu pojazdu

W celu przygotowania danych do obliczeń współczynnika oporu toczenia przeprowadzono następujące czynności:

- oszacowanie pola powierzchni czołowej pojazdu  $A$ ,
- wyznaczenie wartości współczynnika mas wirujących  $\delta$  oraz oporu tarcia wewnętrznego układu napędowego  $T$ ,
- oszacowanie współczynnika oporu powietrza  $c_x$ ,
- pomiar masy pojazdu  $m$ .

Następnie, na podstawie wyrażenia (2), po uzyskaniu niezbędnych danych wyznaczono charakterystyki współczynnika oporu toczenia kół jezdnych samochodu (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka oporu toczenia kół jezdnych pojazdu



Wynikiem uznawany, jako wartość współczynnika oporu toczenia dla danego typu nawierzchni była średnia wartość współczynnika oporu toczenia w przedziale prędkości od 10 km/h do 30 km/h.

Podczas badań pojazdu dodatkowo dokonano pomiaru średniej głębokości makrotekstury metodą objętościową [14].

## 4. WYNIKI BADAŃ

W ramach badań wyznaczono średnie głębokości makrotekstury nawierzchni, długości drogi wybiegu oraz wartości współczynnika oporu toczenia uzyskanych na różnych nawierzchniach drogowych.

### 4.1. ŚREDNIE GŁĘBOKOŚCI MAKROTEKSTURY

Wyniki pomiaru średniej głębokości makrotekstury MTD metodą objętościową [14] nawierzchniach asfaltowych przedstawiono w tabeli 1. Nie wykonywano oceny głębokości makrotekstury na nawierzchniach betonowych. W tym przypadku metoda objętościowa jest niewiarygodna ze względu na nieznaczną chropowatość nawierzchni.

Tablica 1

#### Zestawienie wartości Średniej głębokości makrotekstury MTD

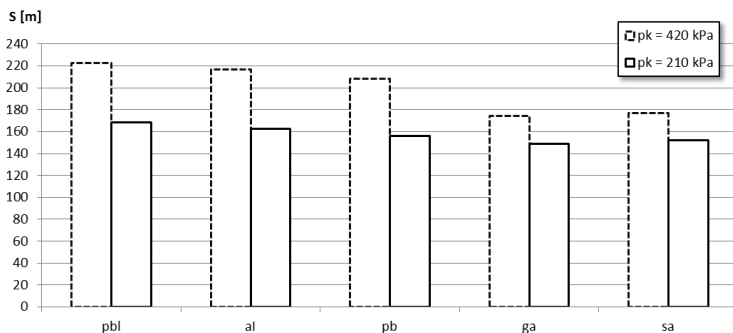
Nazwa i kod nawierzchni drogi	Średnio MTD [mm]
Gładki asfalt GA	0,284
Szorstki asfalt SA	0,457
Asfalt na lotnisku AL	0,486

### 4.2. DŁUGOŚCI DROGI WYBIEGU

Na podstawie wyznaczonych charakterystyk wybiegu samochodu wyznaczono wartości długości drogi wybiegu w przedziale prędkości od 30 km/h do 10 km/h. Długość drogi wybiegu jest pośrednią miarą oporu ruchu pojazdu, którego częścią składową jest opór toczenia. Wydłużenie drogi wybiegu w ściśle określonym przedziale prędkości można bezpośrednio kojarzyć ze zmniejszeniem oporu ruchu samochodu. Przy małych prędkościach jazdy zasadniczą część oporów ruchu stanowi opór toczenia.

Wartości długości drogi wybiegu uzyskane jako średnie wartości w poszczególnych warunkach ruchu zestawiono na rysunku 5.





gdzie:

pbl – płyty betonowe na lotnisku,

al – asfalt na lotnisku,

pb – płyty betonowe (droga publiczna),

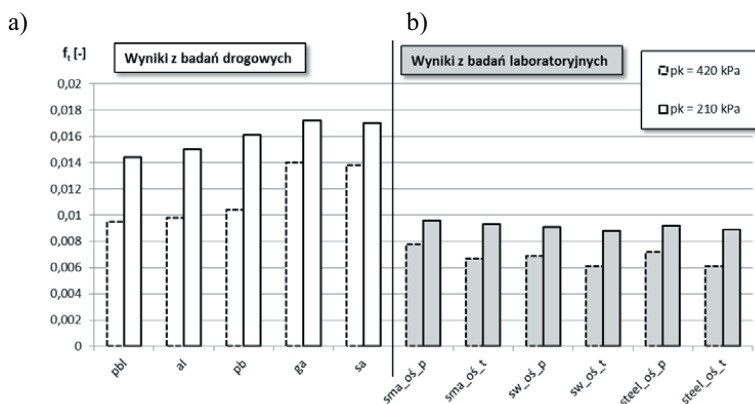
ga – gładki asfalt (droga publiczna),

sa – szorstki asfalt (droga publiczna).

Rys. 5. Zestawienie długości drogi wybiegu pojazdu Star 944 na różnych nawierzchniach drogi od prędkości 30km/h do 10km/h

### 4.3. WYNIKI POMIARU OPORU TOCZENIA KÓŁ JEZDNYCH POJAZDU

Wartości współczynnika oporu toczenia z badań drogowych i stanowiskowych zestawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Zestawienie wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu na podstawie: a) wyników badań drogowych, b) wyników badań stanowiskowych

gdzie:

pbl – płyty betonowe na lotnisku,

al – asfalt na lotnisku,

pb – płyty betonowe,

ga – gładki asfalt,

sa – szorstki asfalt,

sma\_oś\_p – mastyks grysowy (siła nacisku na podłoże dla osi przedniej Z1=36750N),

sma\_oś\_t – mastyks grysowy (siła nacisku na podłoże dla osi tylnej Z2=22200N),

sw\_oś\_p – papier ścierny (siła nacisku na podłoże dla osi przedniej Z1=36750N),

sw\_oś\_t – badanie laboratoryjne, papier ścierny (siła nacisku na podłoże dla osi tylnej Z2=22200N),

steel\_oś\_p – badanie laboratoryjne, stal (siła nacisku na podłoże dla osi przedniej Z1=36750N),

steel\_oś\_t – badanie laboratoryjne, stal (siła nacisku na podłoże dla osi tylnej Z2=22200N).

## 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie uzyskanych wyników badań zestawionych na rysunkach 5 i 6 można sformułować następujące spostrzeżenia.

Wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu wyznaczone metodą wybiegu na różnych rodzajach podłoża utwardzonego są od ok. 30% do 100% większe od wartości uzyskanych dla pojedynczego koła na stanowisku bębnowym w warunkach laboratoryjnych na nawierzchniach typu sma, sw i steel.

W skład siły oporu toczenia kół jezdnych pojazdu w warunkach rzeczywistych wchodzi inne siły oporów ruchu nie występujące w warunkach laboratoryjnych. W tym przypadku oprócz oporu toczenia kół, na dodatkowe siły oporów ruchu pojazdu (rys. 1) podczas jazdy w warunkach rzeczywistych składają się głównie:

- siła oporu ruchu wynikająca z rozpraszania energii w zawieszeniu poprzez pracę amortyzatorów (tarcie wiskotyczne), resorów piórowych (tarcie suche) oraz układu nośnego pojazdu (głównie tarcie suche),
- siła oporu ruchu wynikająca z geometrii zawieszenia i układu kierowniczego (zbieżność, pochylenie kół),
- siła oporu ruchu wynikająca z właściwości lepko-sprężystych samego podłoża,
- siła oporu ruchu wynikająca z rozpraszania energii na skutek toczenia się kół w obecności sił bocznych o nieznacznych wartościach, przenoszonych przez koła podczas jazdy w warunkach pochylenia poprzecznego nawierzchni drogi na której wykonywano próbę wybiegu.

Tych dodatkowych składowych oporów ruchu nie da się wyodrębnić ani jednoznacznie opisać, ale wykonane badania eksperymentalne potwierdzają ich istotny udział w rozpraszaniu energii kinetycznej pojazdu podczas jazdy w warunkach rzeczywistych. Udział przedstawionych dodatkowych składowych oporów ruchu pojazdu uwidacznia się mniej lub bardziej w kolejnych wariantach warunków ruchu pojazdu podczas badań.

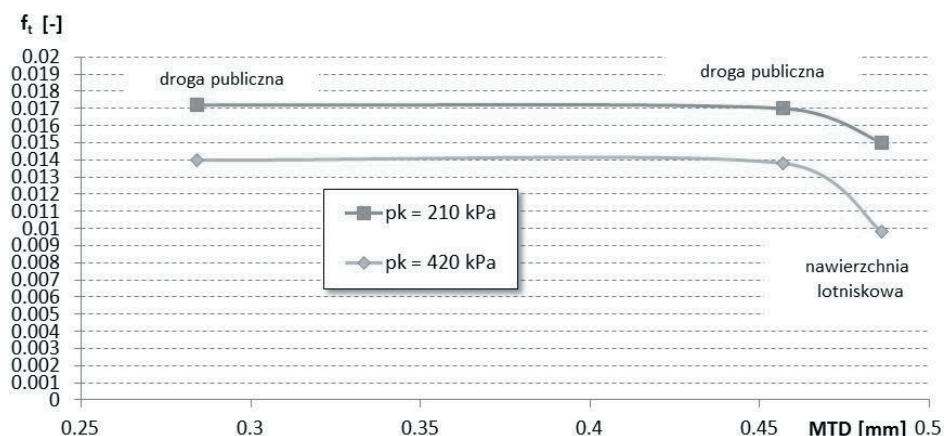
Uzyskano znaczne różnice pomiędzy wartościami współczynnika oporu toczenia kół pojazdu na nawierzchniach asfaltowych. Dodatkowe pomiary wykazały, że nawierzchnie





asfaltowe na których wykonywano badania różnią się pod względem średniej głębokości makrotekstury MTD (tablica 1). To znaczy, że chropowatość poszczególnych nawierzchni asfaltowych jest różna. Zestawienie zależności współczynnika oporu toczenia kół pojazdu na nawierzchniach asfaltowych w funkcji MTD pokazuje, że wzrost chropowatości nawierzchni drogi wpływa na obniżenie oporu toczenia kół jezdnych pojazdu (rys. 7). Nieznaczny wpływ chropowatości nawierzchni podłoża na opór toczenia kół pojazdu, taki jak ma to miejsce w przypadku nawierzchni asfaltowych na drogach publicznych (rys. 7) można uzasadnić zmianą udziału tarcia ślizgowego elementarnych wycinków gumy bieżnika opon w rozpraszaniu energii podczas toczenia kół. Podczas toczenia swobodnego koła ogumionego tarcie ślizgowe występuje w mikroobszarach śladu styku opony z podłożem szczególnie na granicy poszczególnych występow bieżnika oraz na granicy śladu styku czoła opony z podłożem (w przedniej i tylnej części śladu oraz na krawędziach bocznych) [9]. Wraz ze wzrostem chropowatości nawierzchni drogi rośnie współczynnik tarcia gumy bieżnika opony do podłoża. To sprawia, że w strefie styku opony z podłożem zmniejsza się udział obszarów styku gumy bieżnika z podłożem, w którym występuje tarcie ślizgowe. Uzasadnieniem dla tak sformułowanych wyjaśnień są wyniki pomiaru współczynnika oporu toczenia pojedynczego koła w warunkach laboratoryjnych (rys. 6b). W tym przypadku przy większym obciążeniu normalnym badanego koła (wynik pomiaru dla przedniej osi jezdnej) uzyskano większe wartości jego współczynnika oporu toczenia. Wzrost wartości obciążenia normalnego koła powoduje zwiększenie udziału stref tarcia ślizgowego pomiędzy gumą bieżnika, a podłożem szczególnie na gracy śladu.

Tarcie ślizgowe w strefie styku gumy bieżnika opony z podłożem jest jednym z wielu zjawisk, które przyczyniają się do rozpraszania energii podczas toczenia koła. Dlatego nawet znaczna zmiana chropowatości podłoża, taka jaką wskazano na przykładzie nawierzchni asfaltowych na drogach publicznych (rys. 6) może być przyczyną tylko nieznacznych zmian wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu.



Rys. 7. Ocena wpływu chropowatości nawierzchni asfaltowej na współczynnik oporu toczenia kół jezdnych pojazdu

Trudno jednak uzasadnić znaczny spadek wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu jaki pokazano na rys. 7. pod wpływem nieznacznego wzrostu chropowatości nawierzchni asfaltowej lotniskowej względem nawierzchni asfaltowej drogowej (MTD od ok. 0.46 mm do ok. 0.48 mm). W tym przypadku wzrost chropowatości może być tylko częściową przyczyną spadku współczynnika oporu toczenia. Jednak główną przyczyną tego znacznego spadku leży raczej w innym obszarze właściwości podłoża. Chodzi tu o właściwości podłoża, które uzasadniają spadek wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu na obu typach nawierzchni lotniskowych względem nawierzchni drogowych - zarówno asfaltowej jak i betonowej (rys. 6.). Uzyskano znacznie mniejsze (ponad 30%) wartości współczynnika oporu toczenia kół samochodu w warunkach ruchu po nawierzchniach lotniskowych (asfaltowej i betonowej) niż po nawierzchniach dróg publicznych (asfaltowej i betonowej).

Przyczyny zaobserwowanych relacji kryją się w dwóch obszarach związanych z:

- występowaniem nachylenia poprzecznego drogi publicznej,
- technologią wykonania nawierzchni, w tym głównie budową warstw technologicznych pod powierzchnią drogi i nawierzchni lotniskowej.

Nachylenie poprzeczne jest typowe dla drogi publicznej. Jest cechą nawierzchni drogowej, która ułatwia spływanie wody do rowu. Poruszanie się pojazdu po takiej drodze wiąże się z toczeniem kół jezdnych w obecności nieznaczonej, choć stale występującej siły bocznej. Reakcja boczna przenoszona w strefie styku opony z podłożem wywołuje odkształcenie boczne powłoki opony. Stałe odkształcenie boczne opony skutkuje zwiększeniem ilości energii rozpraszanej w postaci ciepła w jej powłoce. Dodatkowo reakcja boczna działająca na oponę w strefie styku z podłożem wywołuje wzrost udziału obszarów tarcia ślizgowego pomiędzy wycinkami elementarnymi gumy bieżnika względem podłoża, a tym samym dodatkowe straty energii. Dlatego poruszanie się pojazdu po drodze publicznej może skutkować zwiększonym oporem toczenia kół w porównaniu z nawierzchnią lotniskową, gdzie pochylenie poprzeczne nie jest zastosowane.

Technologia wykonania nawierzchni drogi, w tym głównie budowa warstw technologicznych pod powierzchnią determinuje jej właściwości sprężysto-tłumiące. Właściwości te decydują o podatności nawierzchni drogi na odkształcenie pod wpływem nacisku kół jezdnych pojazdu oraz o zdolności do rozpraszania energii na skutek tarcia wewnętrznego podłoża. W tym przypadku technologia wykonania nawierzchni lotniskowej z pokryciem asfaltowym jest inna, niż technologia wykonania nawierzchni dróg publicznych. Warstwa asfaltu na nawierzchni lotniskowej jest naniesiona bezpośrednio na sztywne zbrojone płyty betonowe, które dodatkowo są ułożone na grubej warstwie podkładu mineralnego. Taka konstrukcja nawierzchni lotniskowej zapewnia jej wysoką nośność, a jednocześnie małą podatność na odkształcenia pod wpływem nacisku kół jezdnych. Dzięki temu nawierzchnia lotniskowa ma niską zdolność do rozpraszania energii ruchu pojazdu. Na drodze publicznej warstwa asfaltu jest wylana bezpośrednio na ubite warstwy tłuczni. Zatem nawierzchnia drogi publicznej z założenia łatwiej poddaje się naciskowi kół jezdnych samochodu powodując większe rozpraszanie energii ruchu pojazdu.

Wartości współczynnika oporu toczenia kół samochodu uzyskane na nawierzchniach asfaltowych są wyższe niż na nawierzchniach betonowych (zarówno na drogach publicznych jak i na nawierzchni lotniskowej). Uzasadnienie tych relacji wiąże się z częścią uzasadnienia opisanego w ramach poprzedniego spostrzeżenia. Zastosowanie grubych i sztywnych płyt betonowych na drodze publicznej sprawia, że podłoże jest mniej podatne



na odkształcenia pod wpływem nacisku kół jezdnych pojazdu, a tym samym na rozpraszanie energii niż w przypadku nawierzchni asfaltowej wylanej bezpośrednio na warstwę tłucznia. Z kolei nawierzchnia lotniskowa asfaltowa jest wylana bezpośrednio na takie same płyty betonowe jakie są zastosowane na wierzchni lotniskowej betonowej (bez asfaltu). W tym przypadku dodatkowa warstwa asfaltowa zwiększa podatność nawierzchni na odkształcenia pod naciskiem kół jezdnych pojazdu, a tym samym zwiększa zdolność do rozpraszania energii ruchu pojazdu.

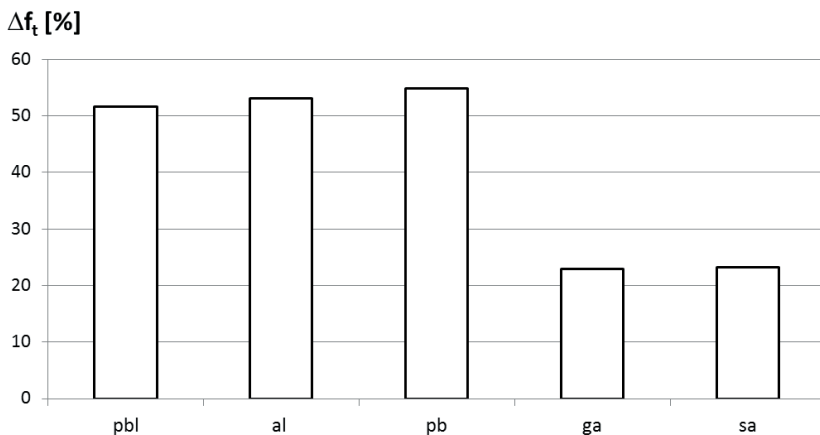
Zmniejszenie wartości ciśnienia powietrza w kołach powoduje jednoznaczny wzrost wartości współczynnika oporu toczenia kół samochodu na wszystkich nawierzchniach drogowych. Na rysunku 8 przedstawiono procentowy przyrost wartości współczynnika oporu toczenia  $\Delta f_t$  pod wpływem zmniejszenia ciśnienia w oponach z  $p_k = 420$  kPa do  $p_k = 210$  kPa. Do obliczeń wykorzystano następującą zależność:

$$\Delta f_t = \frac{f_{t2} - f_{t1}}{f_{t1}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

$f_{t1}$  – wartość współczynnika oporu toczenia przy ciśnieniu w kołach  $p_k = 420$  kPa,

$f_{t2}$  – wartość współczynnika oporu toczenia przy ciśnieniu w kołach  $p_k = 210$  kPa.



Rys. 8. Zestawienie przyrostów wartości współczynnika oporu toczenia pod wpływem zmniejszenia ciśnienia powietrza w oponach z  $p_k = 420$  kPa do  $p_k = 210$  kPa

Zaobserwowany wzrost wartości współczynnika oporu toczenia kół jezdnych pojazdu pod wpływem spadku wartości ciśnienia powietrza w kołach jest jednoznaczny i przewidywalny. Spadek wartości ciśnienia powietrza w kołach wywołuje wzrost histerezy powłoki opon, a jednocześnie wzrost ugięcia promieniowego na skutek spadku sztywności promieniowej [15]. Te dwie zmiany właściwości i warunków ruchu kół prowadzą do zwiększenia intensywności rozpraszania energii przez powłokę każdej z opon kół jezdnych pojazdu.



W przypadku nawierzchni asfaltowych dróg publicznych wzrost wartości współczynnika toczenia kół jednego pojazdu wyniósł około 20%. Natomiast na nawierzchniach o podłożu z płyt betonowych, zarówno drogowych jak i lotniskowych, w tym również pokryciem asfaltowym wzrost współczynnika oporu toczenia pod wpływem obniżenia ciśnienia powietrza w kołach wyniósł nawet do około 56%. Wygląda na to, że na sztywnych betonowych podłożach, nawet z pokryciem asfaltowym, opony pojazdu pracują w zakresie większej wartości ugięcia niż na podłożach asfaltowych dróg publicznych o większej podatności na odkształcenie. W tym kontekście zaobserwowane relacje są uzasadnione.

## 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono wartości średnie współczynnika oporu toczenia kół jezdnych samochodu ciężarowego na podstawie charakterystyk wybiegu dla różnych nawierzchni drogowych oraz różnych wartości ciśnienia powietrza w kołach. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że opory toczenia kół jezdnych pojazdu mogą się istotnie różnić od wyników pomiaru oporu toczenia pojedynczego koła w warunkach laboratoryjnych. Wykazano możliwość istotnych zmian wartości oporu toczenia kół jezdnych pojazdu na skutek zmiany wartości ciśnienia powietrza w kołach oraz zmiany typu nawierzchni drogowej. Zarówno chropowatość nawierzchni drogi utwardzonej jak i jej konstrukcja, która determinuje właściwości lepko-sprężyste pokrycia drogi mogą warunkować zmiany oporu toczenia kół jezdnych samochodu. Wykazano zatem, że energochłonność ruchu pojazdu, a co za tym idzie zużycie paliwa może mieć związek z technologią wykonania nawierzchni drogowych.

### Bibliografia

1. Arczyński S.: Teoria ruchu samochodu, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984.
2. D. E. Hall, J. C. Moreland: Fundamentals of Rolling Resistance. Rubber Chemistry and Technology: July 2001, Vol. 74, No. 3, pp. 525-539.
3. D.J. Schuring: Effect of rolling loss on vehicle fuel consumption. Tire science and technology, TSTCA, Vol. 22, No. 3, July-September, 1994, pp. 148-161.
4. Ejsmont J. A., Hałas opon samochodowych - wybrane zagadnienia. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, 1992.
5. Ejsmont J., Jackowski J., Luty W., Motrycz G., Stryjek P., Świczko Żurek B.: Analysis of rolling resistance of tires with run flat insert applying drum method and radial characteristic, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
6. Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G.: Opór toczenia opon samochodowych. Magazyn Autostrady Nr 7, 2014.
7. Ejsmont J., Taryma S., Woźniak R., Pomiar oporu toczenia opon samochodowych metodą momentową. Zesz. Nauk. P. Gdań. \*\*1996 nr 541 Mechanika nr 75 s. 55-63, 5 rys. bibliogr. 3 poz.
8. Jackowski J., Luty W., Wieczorek M.: Estimation of tire rolling resistance 12R22.5, Biuletyn WAT Vol. L, Nr 9 2001.
9. Jackowski J, Radzimierski M., Wieczorek Marcin: Ocena wpływu obciążeń zewnętrznych na współpracę bieżnika opony niskoprofilowej z nawierzchnią drogi. Logistyka – nauka 3-2014.



10. G.S. Fielding-Russell, P.S. Pillai: Tire rolling resistance from whole-tire hysteresis ratio. Rubber chemistry and technology, V65 n 2 May-Jun 1992 p. 444-452.
11. Jaworski J.: Ogumienie pojazdów samochodowych, Wydawnictwa komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
12. Luty W., Simiński P.: Analysis of radial elasticity of the tire with “run-flat” insert, Journal of Kones Powertrain and Transport, vol. 19 no.3 2012, p.319-326.
13. Orzełowski S.: Eksperymentalne badania samochodów i ich zespołów, Wydawnictwa Naukowo – techniczne, Warszawa 1995.
14. PN-EN 13036-1 - Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych, Metody badań, Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową.
15. P.S. Pillai: Total Tire Energy Loss Comparison by the whole tire hysteresis and the rolling resistance methods. Tire science and technology, TSTCA, vol. 23, No. 4, October-December, p.256-265.
16. Y. C. Lou: Relationship of Tire Rolling Resistance to the Viscoelastic Properties of the Tread Rubber. Tire Science and Technology: August 1978, Vol. 6, No. 3, pp. 176-188.

### ANALYSIS OF THE ROLLING RESISTANCE OF THE CAR WHEELS DURING DRIVING ON DIFFERENT ROAD SURFACES

**Summary:** The paper shows the issue of changing the rolling resistance of the car wheels depending on the type of road surface. The experimental study was performed on a truck whilst driving on different road surfaces. During the research vehicle coast-down characteristics have been created. Based on established vehicle coast-down characteristics were estimated the length of the road and average values of rolling resistance coefficient of the wheels. It was estimated how big had been the influence of the type of road surface on the received values of the coefficient of rolling resistance of the vehicle wheels and changes of the fuel consumption.

**Keywords:** rolling resistance, vehicle coast-down method, macro-texture of road surface

*Praca naukowa finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków budżetowych w ramach projektu RolRes – umowa PBS1/A6/12012.*

