



Imię i nazwisko autora rozprawy: **Wojciech Owczarzak**

Dyscyplina naukowa: **Inżynieria Mechaniczna**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Oscillation method of evaluation the car tires rolling resistance on road surfaces with different textures and stiffnesses**

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor <i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Jerzy Ejsmont	
Promotor pomocniczy <i>podpis</i>	Kopromotor <i>podpis</i>
dr hab. inż. Grzegorz Ronowski, prof. uczelni	



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: **Wojciech Owczarzak**

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej: **Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności** do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia

.....

podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem **prof. dr hab. inż. Jerzym Ejsmontem** ~~drugim promotorem~~ <drugi promotor>, promotorem pomocniczym **dr hab. inż. Grzegorzem Ronowskim**, ~~kopromotorem~~ <kopromotor>*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....

podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia

.....

podpis doktoranta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.





OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Wojciech Owczarzak

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Oscillation method of evaluation the car tires rolling resistance on road surfaces with different textures and stiffnesses

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Jerzy Ejsmont

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*: dr hab. inż. Grzegorz Ronowski, prof. uczelni

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polski: opona, nawierzchnia drogowa, opór toczenia, straty energii, oscylacja, tekstura

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: tire, road pavement, rolling resistance, energy losses, oscillation, texture

Streszczenie rozprawy w języku polskim: Opór toczenia jest jednym z trudniejszych do wyznaczenia parametrów opon samochodowych. Jest to spowodowane tym, iż w przypadku nowoczesnych opon siła oporu toczenia odpowiada 0,5–1% obciążenia opony, dlatego pomiary bardzo małych sił muszą być wykonywane w silnie obciążonym układzie. Stanowi to ogromny problem, szczególnie w warunkach drogowych. Pomiary laboratoryjne są łatwiejsze do wykonania, ze względu na możliwość kontrolowania warunków otoczenia, jednakże w większości przypadków maszyny bieżne nie mogą być wyposażone w prawdziwe nawierzchnie drogowe. Zazwyczaj są to stalowe bębny lub w najlepszym wypadku bębny pokryte replikami nawierzchni. Niniejsza rozprawa doktorska opisuje laboratoryjną metodę oceny oporu toczenia, którą można zastosować do wstępnej oceny nawierzchni drogowych (na podstawie małych próbek nawierzchni) oraz opon. Metoda opiera się na pośrednim pomiarze strat energetycznych występujących w wyniku cyklicznego dociskania opony do nawierzchni, wymuszonego swobodnym spadaniem powodującym oscylacje układu zawierającego masę, sprężystość i tłumienie.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: Tire rolling resistance is one of the most difficult tire parameters to measure. The reason for this is that the force of rolling resistance for modern tires corresponds to 0.5 – 1% of tire load, thus measurements of very small forces must be performed in a heavily loaded system. This indicates massive problems, especially in outdoor, road conditions. Laboratory measurements are easier to perform, as the environment may be better controlled. Trouble is that roadwheel facilities in general cannot be equipped with real road pavements. Typically they have steel drums or drums covered by replicas at best. This doctoral dissertation describes a laboratory method of rolling resistance evaluation, that may be used in preliminary assessment of road pavements (based on small pavement samples) and tires. The method is based on indirect measurement of energy losses occurring as a result of cyclic pressing of the tire against the surface, forced by free fall causing oscillations of the system containing mass, elasticity and damping.



Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi prof. dr hab. inż. Jerzemu Ejsmontowi za poświęcony mi czas i pomoc otrzymaną przy realizacji niniejszej pracy doktorskiej. Dziękuję również mojemu promotorowi pomocniczemu dr hab. inż. Grzegorzowi Ronowskiemu za cenne wskazówki i liczne konsultacje. Dziękuję także wszystkim moim kolegom z Zespołu Pojazdów, a w szczególności mgr inż. Sławomirowi Sommerowi. Na zakończenie pragnąłbym podziękować mojej żonie Marcie za okazaną cierpliwość i wyrozumiałość.

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
1 WPROWADZENIE	9
1.1 Sformułowanie problemu badawczego	9
1.2 Cel, teza i zakres pracy	10
2 ZJAWISKO OPORU TOCZENIA	12
2.2 Czynniki eksploatacyjne wpływające na opór toczenia.....	13
2.2.1 Prędkość jazdy	13
2.2.2 Ciśnienie powietrza i obciążenie	15
2.2.3 Wpływ zużycia bieżnika	18
2.2.4 Wpływ temperatury.....	19
2.2.5 Wpływ kierunku toczenia opon z kierunkową rzeźbą bieżnika	26
2.3 Czynniki konstrukcyjne opony	28
2.3.1. Wpływ wymiarów opony	28
2.3.2 Wpływ rzeźby bieżnika opony	29
2.3.3 Wpływ składu mieszanki gumowej.....	31
2.4 Wpływ nawierzchni na opór toczenia	33
2.5 Dotychczasowe metody pomiaru oporu toczenia	37
2.5.1 Metoda przyczepowa – na przykładzie przyczepy badawczej R ² Mk.2	37
2.5.2 Metoda momentowa z wykorzystaniem maszyn bieżnych	38
3 METODYKA BADAŃ.....	46
3.1 Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności	46
3.1.1 Opis metody badawczej	46
3.1.2 Stanowisko badawcze.....	47
3.1.3 Badane opony	53
3.1.4 Badane nawierzchnie drogowe	55
3.1.5 Wybór metody służącej do analizy otrzymanych wyników.....	58
4 WERYFIKACJA METODY OSCYLACYJNEJ I ANALIZA WYNIKÓW.....	65
4.1 Powtarzalność uzyskanych wyników	65
4.2 Porównanie wyników otrzymanych przy różnych ciśnieniach pompowania	70
4.3 Porównanie wyników otrzymanych przy zastosowaniu różnych obciążeń	78
4.4 Analiza wpływu sztywności nawierzchni oraz jej głębokości profilu	86
4.4.1 Analiza wpływu sztywności nawierzchni	86
4.4.2 Analiza wpływu głębokości profilu nawierzchni.....	89
4.5 Analiza wpływu temperatury	93
4.6 Analiza wpływu mieszanki gumowej	97



PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	99
Wykaz literatury	103
Wykaz ilustracji.....	105
Wykaz tabel	109

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

<i>APS4</i>	- szorstka nawierzchnia drogowa stosowana do badań oporu toczenia na stanowisku bębnowym	
C^4	- współczynnik tłumienia drgań	[N/m ²]
C_{EL}	- współczynnik metody oscylacyjnej (Coefficient of Energy Losses)	[-]
C_{statA}	- sztywność promieniowa opony	[N/m]
C_{RR}	- wsp. oporu toczenia (Coefficient of Rolling Resistance)	[-]
<i>DAC16</i>	- beton asfaltowy o maksymalnym uziarnieniu 16mm	
e	- wartość przemieszczenia reakcji pionowej podłoża	[m]
f	- ugięcie opony przy obciążeniu nominalnym	[mm]
f'	- ugięcie opony wyznaczone przez styczną do krzywej środkowej	[mm]
F_a	- siła adhezji	[N]
F_h	- siła histerezy	[N]
F_{nom}	- obciążenie nominalne	[N]
F_{r25}	- współczynnik oporu toczenia obliczony dla temperatury otoczenia 25°C	[-]
F_r	- współczynnik oporu toczenia zmierzony w temperaturze otoczenia	[-]
f_t	- współczynnik oporu toczenia	[-]
K_t	- temperaturowy współczynnik korekcyjny	[-]
M	- moment siły mierzony na wale bębna maszyny bieżnej	[Nm]
M_{SKIM}	- moment siły oporów własnych maszyny bieżnej	[Nm]
<i>MPD</i>	- średnia głębokość profilu nawierzchni	[mm]
<i>PERS</i>	- nawierzchnia poroelastyczna	
<i>SMA8</i>	- nawierzchnia będąca mieszanką mineralno-asfaltową o dużej zawartości grysów	
<i>SW80</i>	- nawierzchnia bardzo gładka Safety Walk	

1 WPROWADZENIE

1.1 Sformułowanie problemu badawczego

Opór toczenia opon samochodowych jest jednym z najistotniejszych parametrów opisujących współpracę opony z nawierzchnią drogową. Ma on bezpośredni wpływ na zużycie energii przez poruszający się pojazd, emisję związków toksycznych do atmosfery (takich jak np. NH_3 , CO_2 czy NO_2), oraz na jego osiągi, takie jak prędkość maksymalna, przyspieszenie, czy zasięg maksymalny. Wysoka wartość oporu toczenia powoduje również podwyższenie temperatury opony, co przyspiesza proces jej starzenia i obniżenia wytrzymałości mechanicznej. Opór toczenia jest jednym z podstawowych oporów ruchu (wraz z oporem powietrza, wzniesienia i bezwładności). W zależności od warunków ruchu, zmniejszenie oporu toczenia o 10% powoduje zmniejszenie zużycia paliwa o 2-4%. [1,2,4]. Można go redukować poprzez doskonalenie technologii produkcji opon oraz nawierzchni drogowych. Aby było to możliwe, niezbędnym jest prowadzenie pomiarów weryfikujących skuteczność zastosowanych w tym zakresie rozwiązań.

Do pomiaru oporu toczenia stosuje się metody drogowe oraz laboratoryjne. Jego pomiar jest jednak skomplikowany i do tej pory nie doczekał się pełnej standaryzacji.

W warunkach drogowych stosuje się dwie metody pomiaru: przyczepową oraz wybiegu. Pierwsza z wymienionych metod bazuje na zastosowaniu specjalnej przyczepy badawczej, holowanej przez samochód osobowy lub dostawczy. Na świecie istnieje tylko kilka przyczep badawczych dokonujących pomiarów w warunkach drogowych. Przykładem są dwie przyczepy zbudowane i używane do badań na Politechnice Gdańskiej (np. przyczepa $R^2Mk.2$). Wykorzystują one układ pomiarowy oparty na pionowym wahaczu, który ma na celu zniwelowanie składowej poziomej od siły pionowej obciążającej koło pomiarowe. Co więcej zastosowano tu układ mechaniczny, eliminujący wpływ nachylenia drogi oraz przyspieszenia [3]. Układ pomiaru wychylenia wahacza oraz system wyznaczający położenie przyczepy względem nawierzchni opierają się na wysokiej jakości laserach. Metoda przyczepową charakteryzuje się dużą dokładnością pomiaru, jednak posiada kilka ograniczeń. Dla większości przyczep niezbędny jest prosty i poziomy odcinek drogi o długości przynajmniej 100 m, co może stanowić problem w przypadku opracowywania nowych typów nawierzchni drogowych. Innymi utrudnieniami mogą być również czas wykonania pomiaru (zależny od położenia badanej nawierzchni drogowej), warunki atmosferyczne w trakcie badania oraz oczywiście koszty budowy i eksploatacji takiej przyczepy (wraz z kosztami zakupu i eksploatacji pojazdu holującego).

Druga z wymienionych metod drogowych, metoda wybiegu, polega na rozpędzeniu pojazdu badawczego do określonej prędkości, a następnie odłączeniu napędu. Podczas wybiegu rejestrowane są takie parametry jak prędkość i droga w funkcji czasu, aż do momentu zatrzymania pojazdu. Otrzymane dane wykorzystuje się w obliczeniach polegających na rozwiązywaniu równań ruchu pojazdu, czego efektem końcowym jest opór toczenia. Metoda ta jest dosyć kłopotliwa w zastosowaniu ze względu na konieczność znajomości takich parametrów jak współczynnik aerodynamiczny pojazdu, przekrój czołowy, masa pojazdu, momenty bezwładności elementów wirujących połączonych z kołami, a także straty energetyczne w podzespołach napędowych sprzęgniętych z kołami pojazdu. Oprócz tego należy również

rejestrwać prędkość oraz kierunek wiatru podczas trwania pomiaru i to w miejscu, w którym aktualnie pojazd się znajduje. W celu wyeliminowania wpływu nachyleń badanego odcinka, pomiar należy wykonać w obie strony (co nie zawsze jest możliwe). Wszystko to sprawia, że otrzymane wyniki obarczone są sporymi błędami [4].

W przypadku metod laboratoryjnych, ze względu na zalecenia normy ISO (*ISO 18164:2005 Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres -- Methods of measuring rolling resistance*), do pomiarów oporu toczenia najczęściej stosuje się maszyny bieżne z zewnętrzną bieżnią stalową lub nawierzchnią Safety Walk, czyli taśmą zawierającą cząstki mineralne przytwierdzone polimerem do plastikowej folii (wyjątkiem jest maszyna bieżna stosowana przez ośrodek badawczy BASt w Niemczech, gdzie stosuje się bieżnię wewnętrzną) [4,5]. Niestety problemy techniczne z maszyną bieżną w BASt spowodowały, że praktycznie nie prowadzi się na niej badań oporu toczenia. Niekiedy stosuje się także repliki rzeczywistych nawierzchni drogowych, wykonanych ze zbrojonych laminatów lub innych materiałów z zachowaniem oryginalnej tekstury nawierzchni. Metoda ta charakteryzuje się dużą dokładnością pomiaru, powtarzalnością wyników oraz kontrolą warunków pomiarów. Do jej wad można zaliczyć czasochłonną procedurę wykonywania replik nawierzchni, czas samego badania, koszt budowy stanowiska oraz jego eksploatacji. Co więcej stosowane repliki zbudowane są z innego materiału niż oryginalne nawierzchnie (zastosowanie oryginalnych nawierzchni ze względu na ich dużą masę spowodowałyby oderwanie ich przez siłę odśrodkową), co przekłada się na inną sztywność niż oryginał. Bieżnia maszyny wymusza również kształt replik o dużej krzywiznie, przez co konieczne jest przeliczanie otrzymanego wyniku na powierzchnię płaską. Wszystko to sprawia, że na etapie opracowywania nowych nawierzchni drogowych, metoda bębnowa nie jest powszechnie stosowana.

Analizując dotychczasowe metody wyznaczania oporu toczenia opon samochodowych, można stwierdzić brak uproszczonych metod opartych na ocenie współpracy opony z nawierzchnią pod kątem strat energetycznych. Co więcej brakuje metody pozwalającej na badanie rzeczywistych próbek nawierzchni drogowych w warunkach laboratoryjnych (repliki stosowane na bębnach posiadają inną sztywność oraz są zakrzywione). Metoda i urządzenie będące przedmiotem pracy pozwalają na tego typu pomiar w sposób szybki i tani.

1.2 Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy było stwierdzenie możliwości oceny współpracy opony samochodowej z nawierzchnią drogową pod kątem strat energetycznych, na podstawie pomiarów stacjonarnych wykonywanych na małych próbkach nawierzchni, a w dalszej kolejności opracowanie metody i urządzenia umożliwiającego prowadzenie badań porównawczych opon i nawierzchni na mało skomplikowanym, a przez to tanim stanowisku laboratoryjnym.

Poniżej przedstawione są główne cele niniejszej pracy:

- Stwierdzenie możliwości oceny współpracy opony samochodowej z nawierzchnią drogową pod kątem strat energetycznych, na podstawie pomiarów stacjonarnych.

- Opracowanie założeń proponowanej metody oraz budowa stanowiska umożliwiającego wykonanie badań.
- Analiza wpływu czynników eksploatacyjnych oraz konstrukcyjnych opony na otrzymywane wyniki pomiarów.
- Wyznaczenie sposobu opracowania otrzymanych danych i przedstawienia ich w postaci liczbowego współczynnika, skorelowanego ze współczynnikiem oporu toczenia.

Przystępując do realizacji wyżej przedstawionych celów sformułowano poniższą tezę:

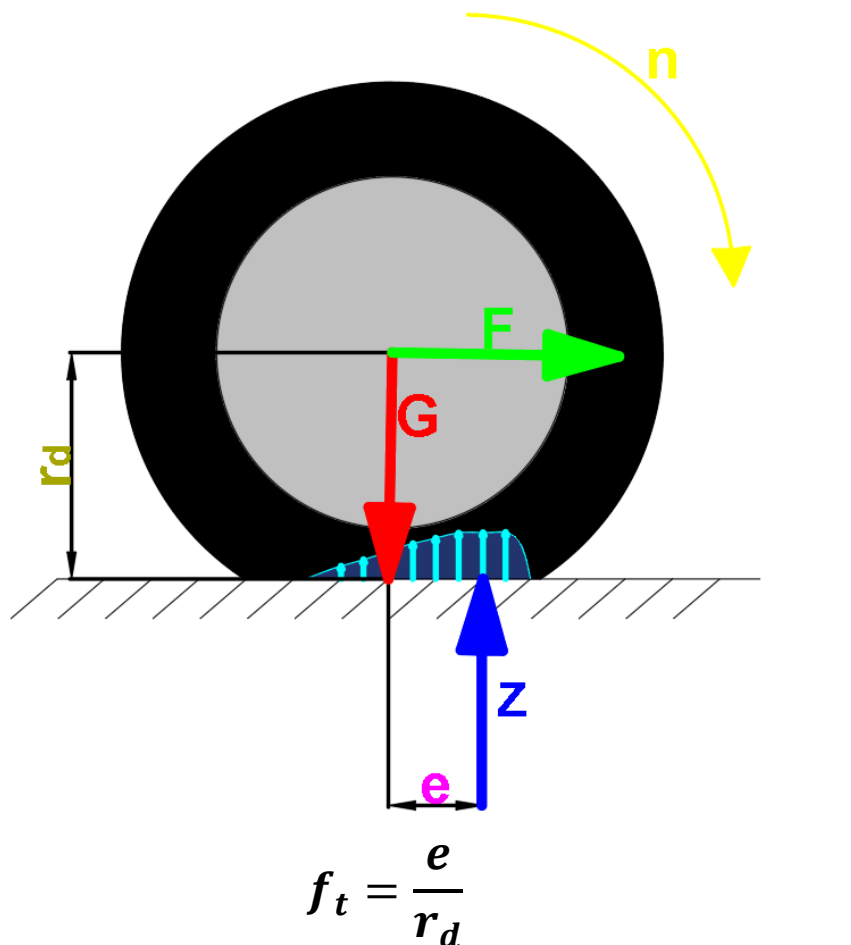
Ocena oporu toczenia jest możliwa dzięki pośredniemu pomiarowi strat energetycznych, występujących w wyniku cyklicznego dociskania opony do nawierzchni o danej teksturze, wymuszonego swobodnym spadaniem powodującym oscylacje układu.

Dla zaprezentowanego celu i tezy pracy zaproponowano następujący jej zakres:

- Przedstawienie problemu badawczego w postaci potrzeby opracowania prostej, szybkiej i taniej metody stacjonarnej, umożliwiającej porównywanie próbek nawierzchni pod kątem strat energetycznych, w trakcie ich współpracy z oponami samochodowymi.
- Przedstawienie czynników eksploatacyjnych oraz konstrukcyjnych opony mających wpływ na wielkość oporu toczenia opon samochodowych.
- Zaprojektowanie oraz zbudowanie stanowiska badawczego.
- Opracowanie metodyki badań proponowanej metody.
- Wykonanie serii pomiarów określających wpływ czynników eksploatacyjnych oraz konstrukcyjnych na otrzymywane wyniki.
- Analiza otrzymanych wyników badań oraz porównanie ich z wynikami współczynników oporu toczenia uzyskanymi przy pomocy dostępnych obecnie metod.
- Korelacja otrzymanych wyników ze współczynnikiem oporu toczenia.

2 ZJAWISKO OPORU TOCZENIA

Oporem toczenia nazywamy siłę, która opiera się ruchowi ciała toczącego się po poziomej powierzchni. Natomiast norma ISO 28580:2018 definiuje opór toczenia jako stratę energii (lub zużycie energii) na jednostkę przebytej odległości [5]. Powszechniej stosowany jest jednak współczynnik oporu toczenia f_t , który jest stosunkiem wartości przemieszczenia reakcji pionowej podłoża e , do wielkości promienia dynamicznego r_d toczącego się koła (Rysunek 1). Opór toczenia opon samochodowych wynika bezpośrednio ze strat energetycznych powstających w trakcie cyklicznej deformacji struktury opony podczas nacisków występujących na śladzie jej styku z nawierzchnią. Ugięcie opony wymaga pewnej pracy, która musi być dostarczona do układu od strony pojazdu. Materiały wykorzystywane do produkcji opon charakteryzują się znaczną histerezą co powoduje, że ilość energii wykorzystywanej do odkształcenia opony jest większa niż ilość energii oddawanej podczas powrotu opony do pierwotnego kształtu. Zdecydowana większość traconej przez pojazd w wyniku oporu toczenia energii przetwarzana jest na ciepło. Pozostała, znacznie mniejsza część energii przetwarzana jest na energię akustyczną oraz na trwałe odkształcenia nawierzchni i ścieranie opony. Opór generowany jest przez ugięcia struktury nośnej opony (pas bieżnika, ścianek bocznych) oraz przez odkształcenia elementów bieżnika [4,6]. Część oporu toczenia wynika również z odkształceń nawierzchni.



Rysunek 1. Schemat sił działających na toczące się koło samochodowe (materiał własny)

Opór toczenia opony samochodowej uwarunkowany jest takimi czynnikami jak [2]:

- Konstrukcja opony (szerokość, wysokość, średnica osadzenia, wzór i głębokość rzeźby bieżnika, liczba warstw kordu oraz materiał z jakiego jest wykonany, materiał opasania, rodzaj mieszanki gumowej).
- Warunki ruchu, a więc obciążenia koła, ciśnienie powietrza w oponie, temperatura opony, kierunek toczenia, prędkość toczenia.
- Nawierzchnia drogowa, czyli jej rodzaj, tekstura, sztywność oraz stan techniczny.

W kolejnych podrozdziałach opisano wpływ wyżej wymienionych czynników wraz z omówieniem wyników badań wykonanych nad nimi przez Zespół Pojazdów na Politechnice Gdańskiej.

2.2 Czynniki eksploatacyjne wpływające na opór toczenia

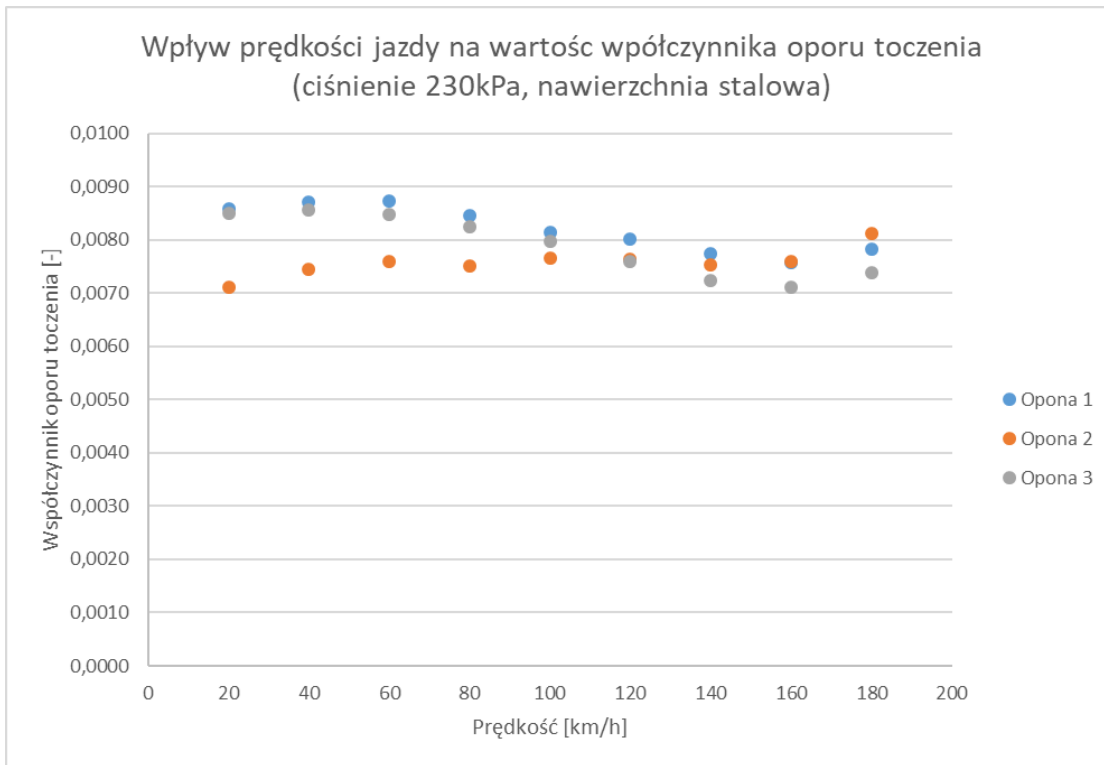
Opór toczenia opon samochodowych jest zależny od takich czynników eksploatacyjnych jak:

- Prędkość jazdy.
- Ciśnienie powietrza w oponie.
- Obciążenie koła.
- Zużycie bieżnika.
- Temperatura otoczenia oraz ogumienia.
- Kierunek toczenia w przypadku opon z bieżnikiem kierunkowym (jednak ten czynnik ma najmniejszy wpływ na wartość oporu toczenia, co pokazują wyniki przeprowadzonych badań w podrozdziale 2.2.5.).

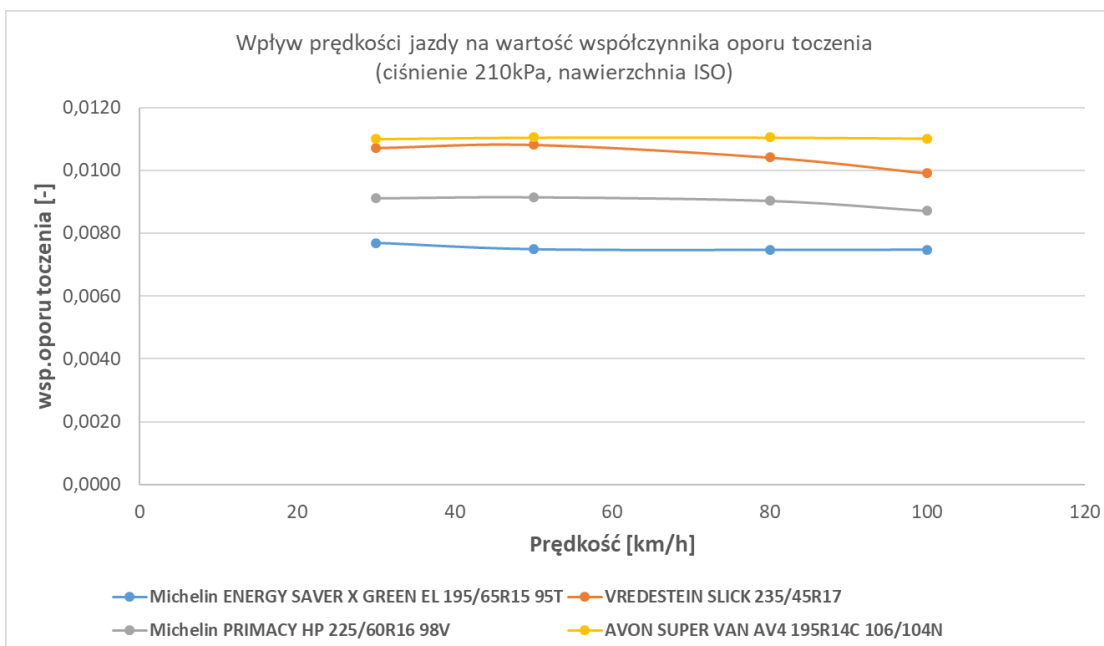
2.2.1 Prędkość jazdy

Dla większości opon współczynnik oporu toczenia wraz ze wzrostem prędkości jazdy zmienia się zgodnie z tendencją przedstawioną na Rys. 2-4. Do prędkości około 140-160 km/h współczynnik oporu toczenia przeważnie maleje. Jest to spowodowane spadkiem strat histerezy wywołanej wzrostem temperatury mieszanki gumowej bieżnika (zjawisko to najczęściej obserwuje się w przypadku opon z silikonową mieszanką bieżnika) oraz wzrostem ciśnienia wewnątrz opony powodującym mniejsze odkształcenia (usztynwienie opony) [2].

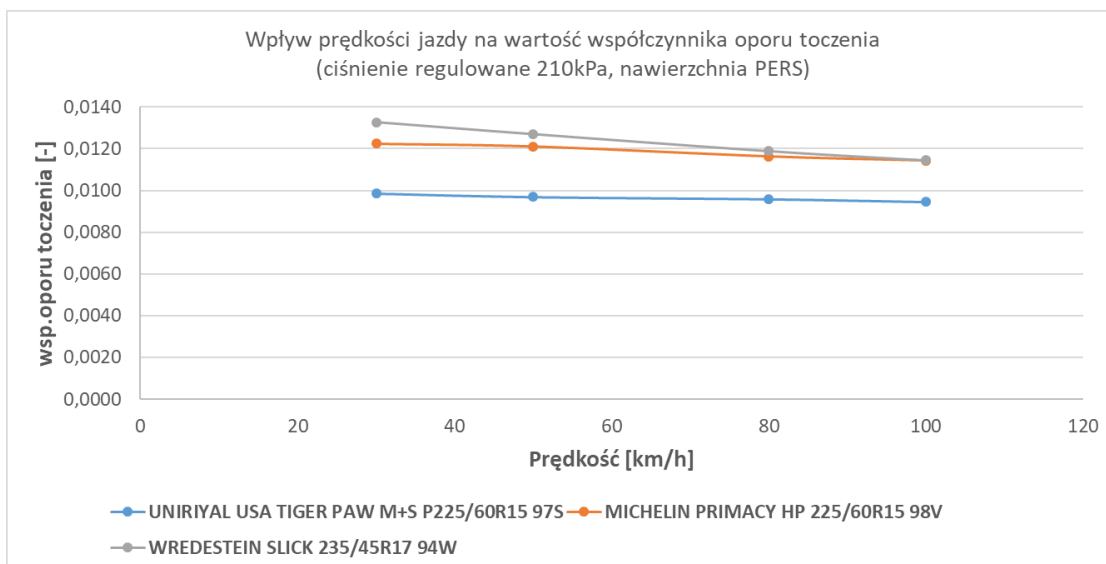
Dla wyższych prędkości współczynnik oporu toczenia zaczyna rosnąć. Jest to spowodowane najprawdopodobniej tym, że straty energii wywołane szybkością odkształceń opony są dominujące w odniesieniu do mechanizmu wynikającego z przyrostu ciśnienia wewnątrz opony na skutek przyrostu jej temperatury.



Rysunek 2. Wpływ prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia, ciśnienie 230kPa, nawierzchnia stalowa (materiał własny)



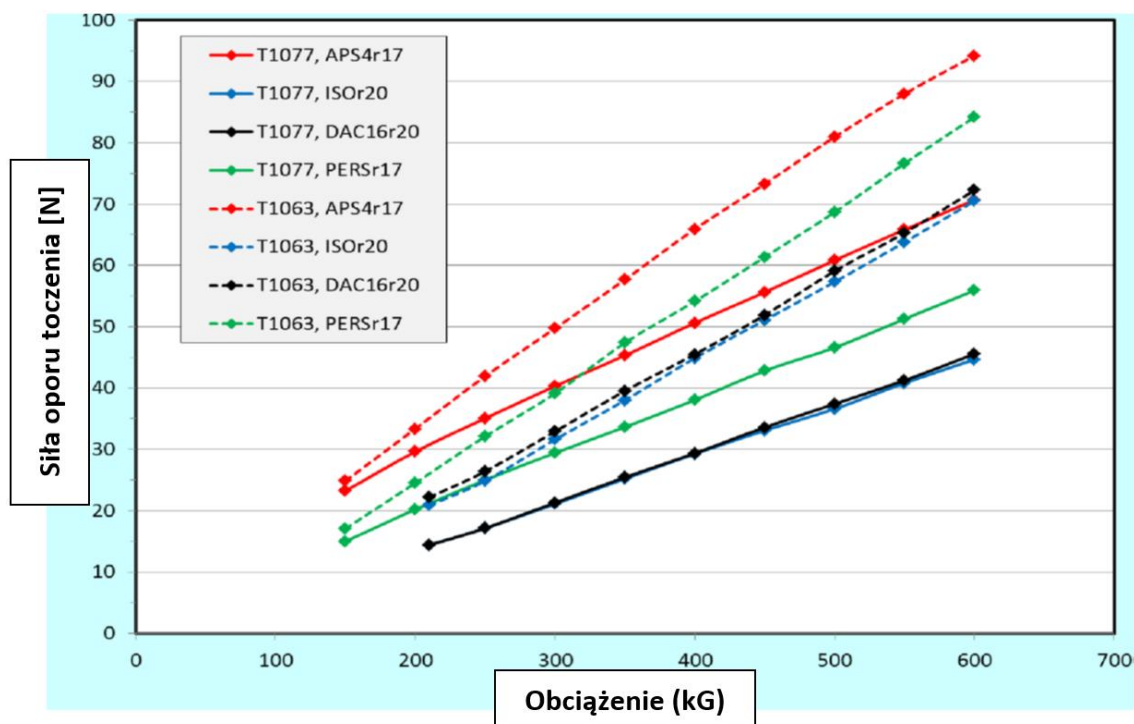
Rysunek 3. Wpływ prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia, ciśnienie 210kPa, nawierzchnia ISO (materiał własny)



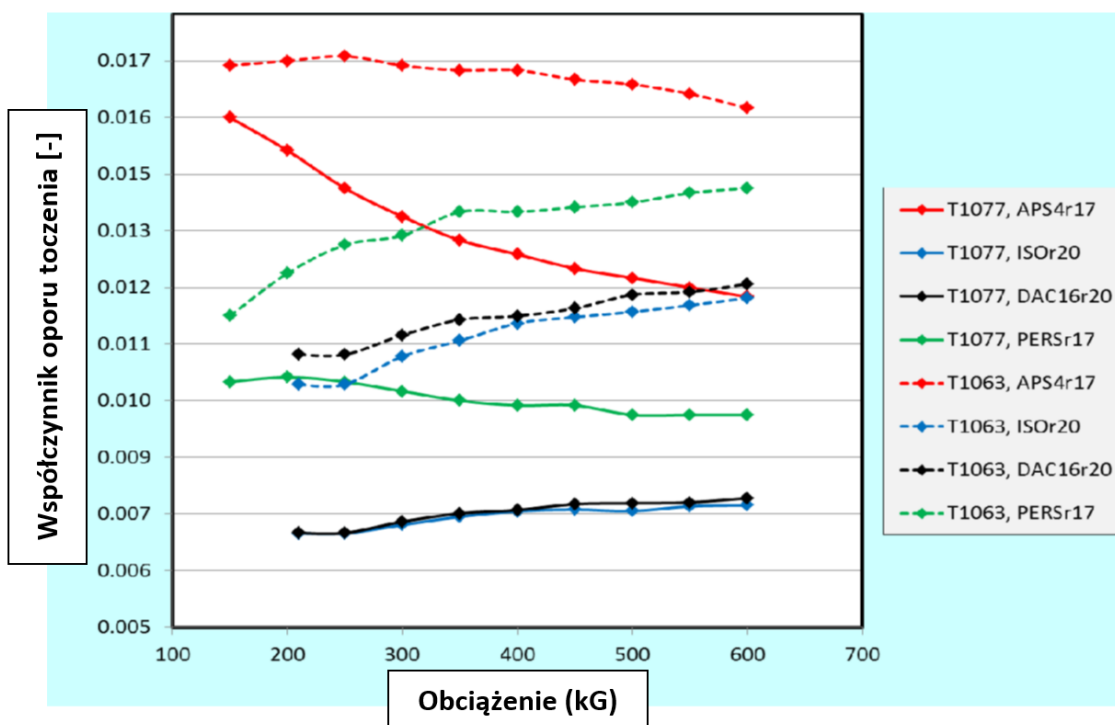
Rysunek 4. Wpływ prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia, ciśnienie regulowane 210kPa, nawierzchnia PERS, (materiał własny)

2.2.2 Ciśnienie powietrza i obciążenie

Siła oporu toczenia rośnie wraz ze wzrostem obciążenia opony (Rysunek 5), natomiast wartości współczynnika oporu toczenia zachowują się w tym przypadku różnie (Rysunek 6), co jest zależne od kombinacji opona/nawierzchnia. Obciążenie opony powoduje odkształcenie promieniowe, co w następstwie wywołuje straty histerezy. Powoduje ono też wzrost lokalnych poślizgów elementów bieżnika na śladzie styku opony z nawierzchnią, zwiększając tym samym straty tarcia, które również mają wpływ na opór toczenia [2,7,26].

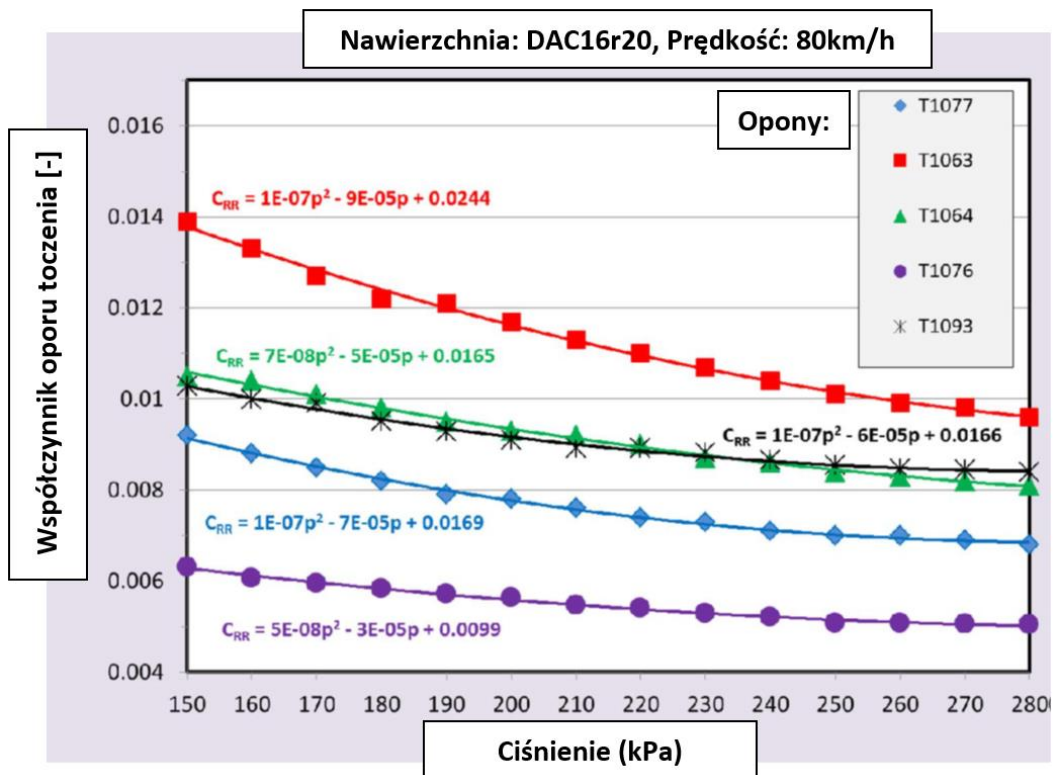


Rysunek 5. Zależność siły oporu toczenia od obciążenia przy prędkości 80 km/h [26]

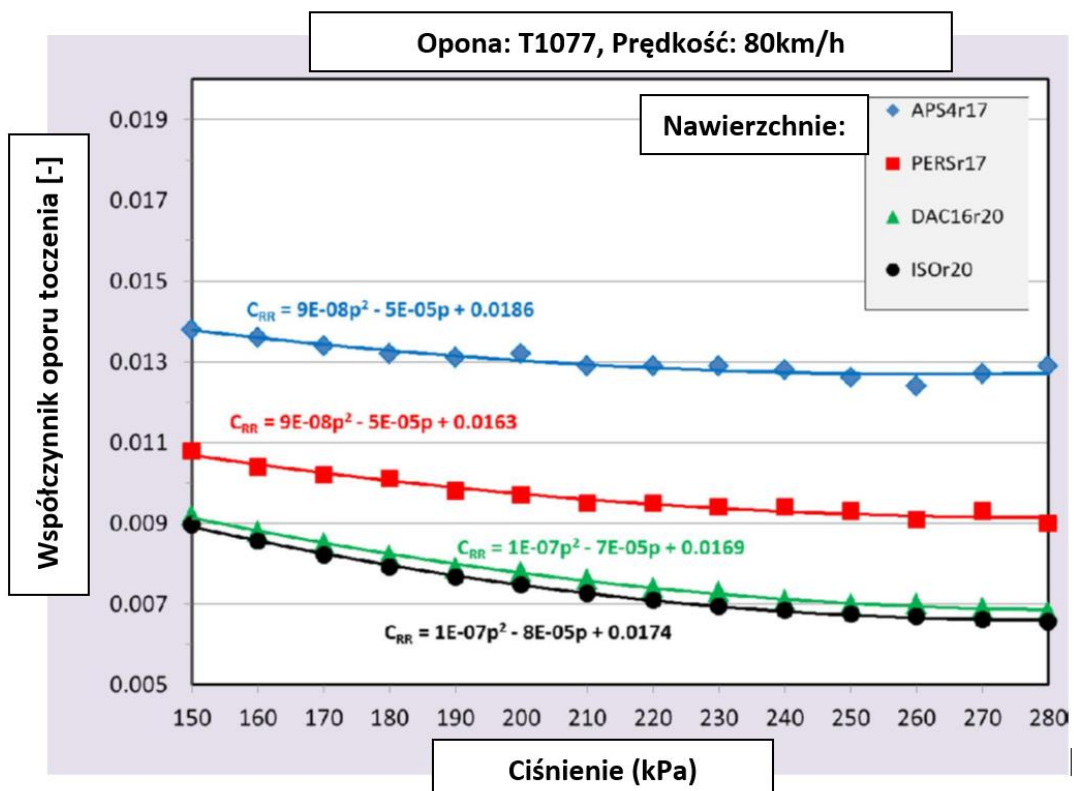


Rysunek 6. Wpływ obciążenia na wartość współczynnika oporu toczenia przy ciśnieniu 210 kPa oraz prędkości 80 km/h [26]

Wzrost ciśnienia zawsze powoduje zmniejszenie wartości współczynnika oporu toczenia. Pas bieżnika staje się sztywniejszy, a przez to w mniejszym stopniu ulega odkształceniu. Zmiany współczynnika oporu toczenia względem ciśnienia są zależne od jego ogólnej wartości dla danej opony. Te, które odznaczają się stosunkowo wysokimi wartościami współczynnika oporu toczenia są bardziej czułe na zmiany ciśnienia (nawet powyżej 3,5% przy zmianie ciśnienia o 10 kPa), niż modele o jego niskiej wartości. Zastosowane ciśnienie pompowania musi posiadać wartość kompromisową, aby zapewnić z jednej strony stosunkowo niskie wartości oporu toczenia, a z drugiej równomierne zużycie bieżnika na całej szerokości opony, jej odpowiednią sztywność i kierowność. Poniższe wykresy obrazują zależności współczynnika oporu toczenia od ciśnienia (Rysunek 7, Rysunek 8) oraz od kombinacji obciążenia i ciśnienia (Rysunek 9) [26].

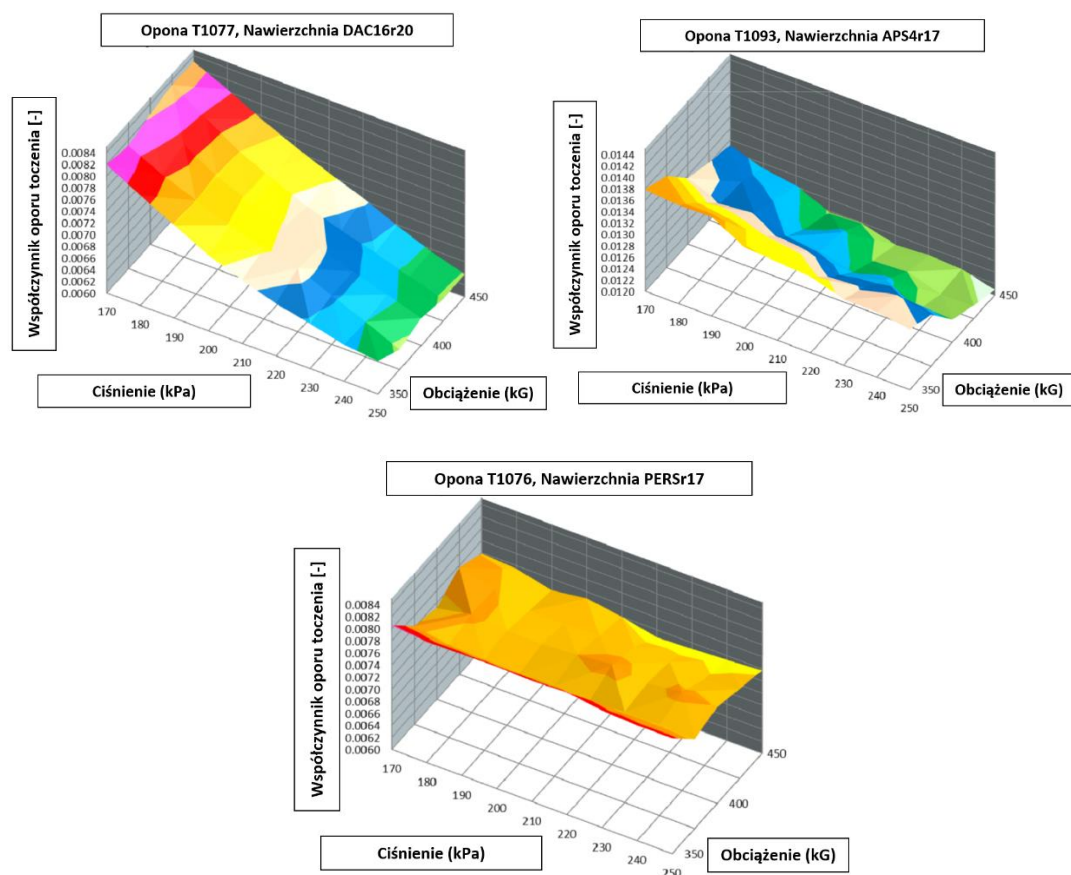


Rysunek 7. Zależność pomiędzy współczynnikiem oporu toczenia, a ciśnieniem dla różnych opon [26]



Rysunek 8. Zależność pomiędzy współczynnikiem oporu toczenia, a ciśnieniem dla różnych nawierzchni drogowych [26]

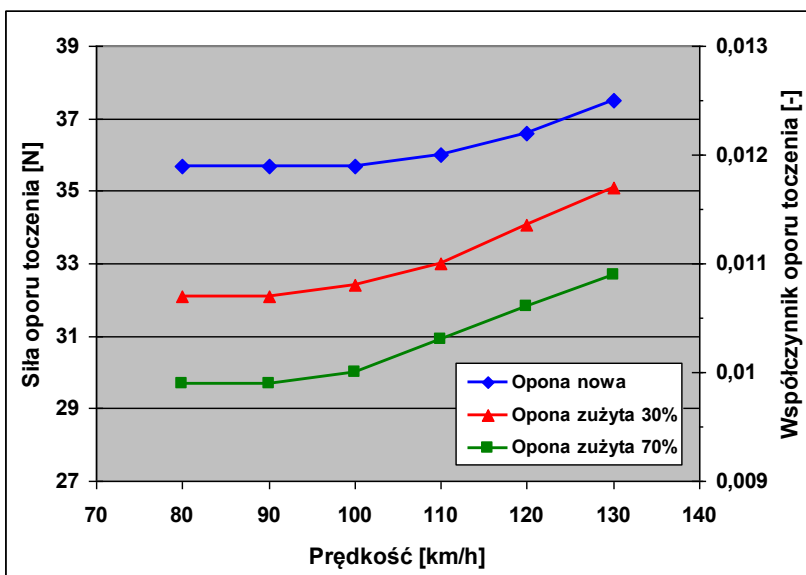
Ustalenie najkorzystniejszej wartości ciśnienia i obciążenia pod kątem uzyskania niskiego współczynnika oporu toczenia jest skomplikowane i zależne od kombinacji opona/nawierzchnia, zaś ta w głównej mierze zależy od tekstury i sztywności nawierzchni, po której toczy się badana opona.



Rysunek 9. Zależność współczynnika oporu toczenia w zależności od kombinacji obciążenia i ciśnienia dla różnych opon i nawierzchni [26]

2.2.3 Wpływ zużycia bieżnika

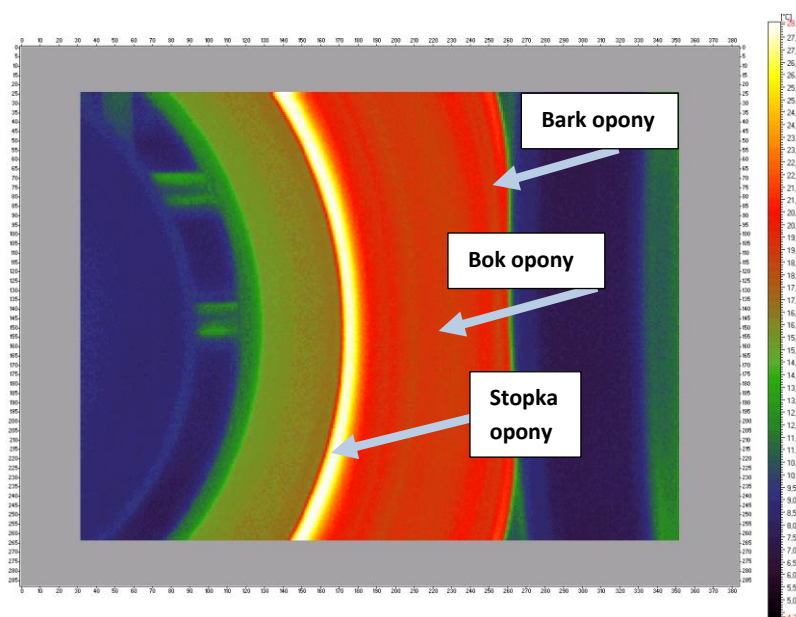
Opór toczenia zmienia się wraz ze zużyciem opony. W trakcie eksploatacji zmienia się głębokość bieżnika, a przez to masa i średnica opony. Zmniejszająca się grubość pasa bieżnika powoduje uelastycznienie czoła opony, a tym samym zmniejszenie oporów toczenia [8,9,10]. Głębokość bieżnika nowej opony ma więc z jednej strony zapewniać stosunkowo niską wartość oporu toczenia, a z drugiej dobrą przyczepność na mokrej powierzchni czy odporność na aquaplaning. Poniżej zamieszczono przykładowe wyniki badań obrazujące wpływ zużycia opony na wartość współczynnika oporu toczenia (Rysunek 10).



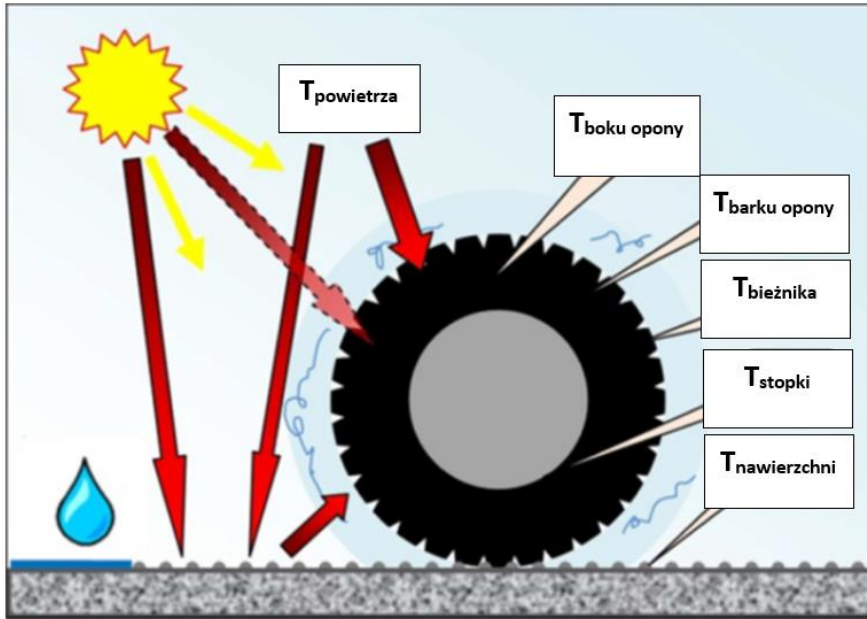
Rysunek 10. Zależność siły i współczynnika oporu toczenia od prędkości dla opony stosowanej w samochodach osobowych o rozmiarze 145R13 w różnym stopniu zużycia [2]

2.2.4 Wpływ temperatury

Opisanie temperatury opony za pomocą jednej wartości jest niemożliwe, ponieważ każdy jej element składowy nagrzewa się w różnym stopniu. W celu uproszczenia opisu wyznacza się wartości średnie temperatur na różnych strefach opony: pasie bieżnika, barku, boku czy stopce (Rysunek 11). Temperatura opony jest zależna od wielu czynników, do których zaliczyć możemy straty energii wewnątrz opony, chłodzące działanie strumienia powietrza wokół niej, promieniowanie słoneczne, wpływ temperatury nawierzchni drogowej oraz wychłodzenie pod wpływem śniegu i deszczu (Rysunek 12) [27]. Wzrost temperatury wywołuje spadek tłumienia wewnętrznego w oponie, co prowadzi do zmniejszenia strat histerezy, a przez to zmniejszenia oporu toczenia opony [2,9,11].

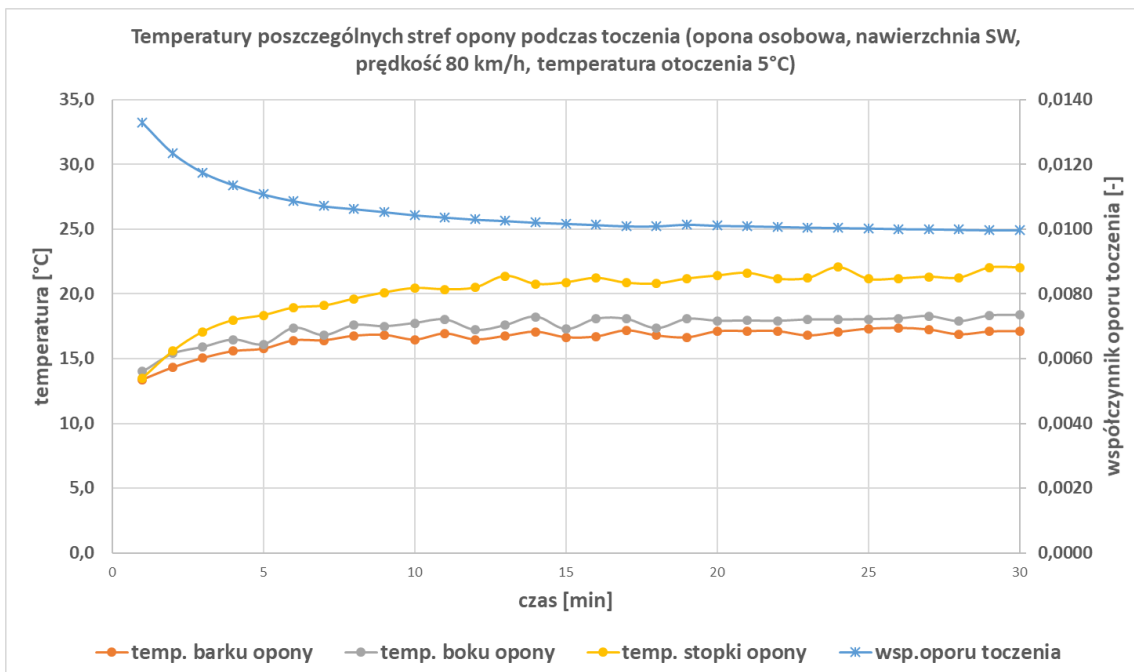


Rysunek 11. Termogram przedstawiający różnice temperatur w różnych obszarach opony (materiał własny)



Rysunek 12. Wpływ czynników zewnętrznych na temperaturę opony [27]

Pomiar oporu toczenia powinien być wykonywany po około 30 minutach, w trakcie których opona toczy się z zadaną prędkością. Jest to czas potrzebny do ustabilizowania się temperatury opony (Rysunek 13). W przypadku opon do samochodów ciężarowych czas ten jest dłuższy i może dochodzić nawet do 60 minut.



Rysunek 13. Temperatury poszczególnych stref opony podczas toczenia (materiał własny)

W przypadku laboratoryjnych badań oporu toczenia utrzymanie określonej temperatury jest stosunkowo proste i uzyskiwane przy pomocy klimatyzatorów bądź wymienników ciepła (Rysunek 15, Rysunek 16). Standardową temperaturą pomiaru dla większości metod jest 25°C, a w przypadku odchylenia od tej wartości należy w wyznaczaniu współczynnika oporu toczenia uwzględnić tzw. temperaturowy współczynnik korekcyjny K_t zgodnie z poniższą zależnością:

$$F_{r25} = F_r [1 + K_t (t_{amb} - 25)] \quad (2.1)$$

Gdzie:

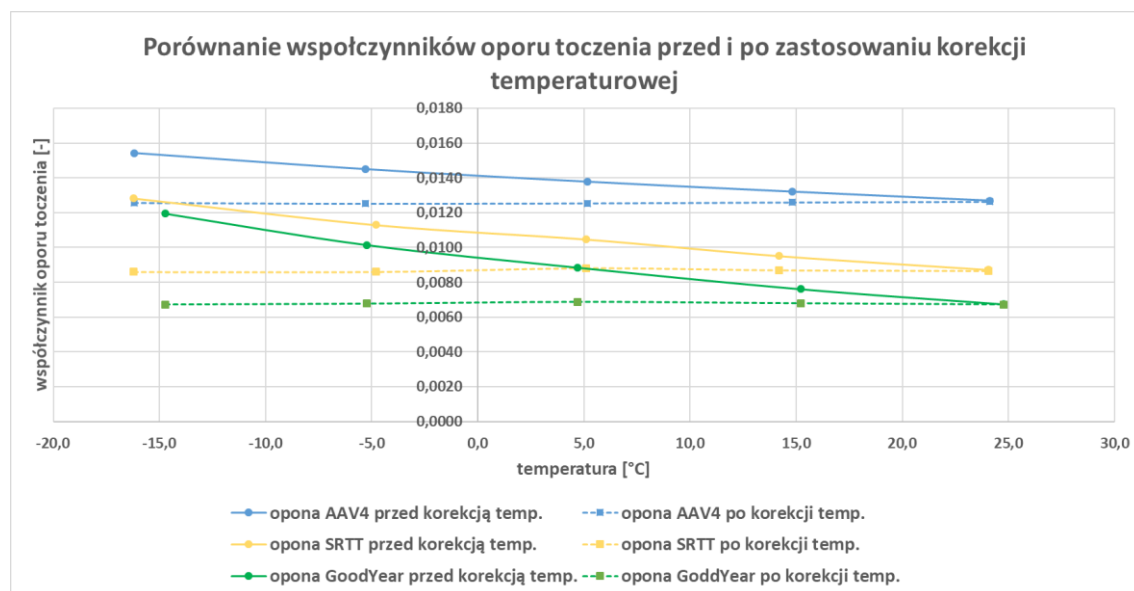
F_{r25} - wsp. oporu toczenia obliczony dla temp. otoczenia 25°C [-]

F_r - wsp. oporu toczenia zmierzony w temp. otoczenia [-]

K_t - temperaturowy współczynnik korekcyjny, zależny od badanej opony i nawierzchni [-]

t_{amb} - temperatura otoczenia [°C]

Sam współczynnik K_t przyjmuje różną wartość zależną od opony i nawierzchni, po której ta się porusza. Wzór ten ma zastosowanie dla zakresu temperatur $25 \pm 10^\circ\text{C}$, gdzie błąd korekcji nie przekracza zazwyczaj 3% (Rysunek 14) [27].



Rysunek 14. Porównanie wyników przed i po zastosowaniu korekcji temperaturowej (materiał własny)

W przypadku badań drogowych np. z użyciem przyczepy dynamometrycznej, ze względu na ciągle manewry, takie jak zmiana pasa ruchu, zatrzymywanie czy ruszanie praktycznie nie ma

możliwości utrzymania przez 30 min stałej prędkości i toru jazdy, a co za tym idzie ustabilizowania temperatury opony (wyjątkiem są zamknięte dla ruchu toru testowe).



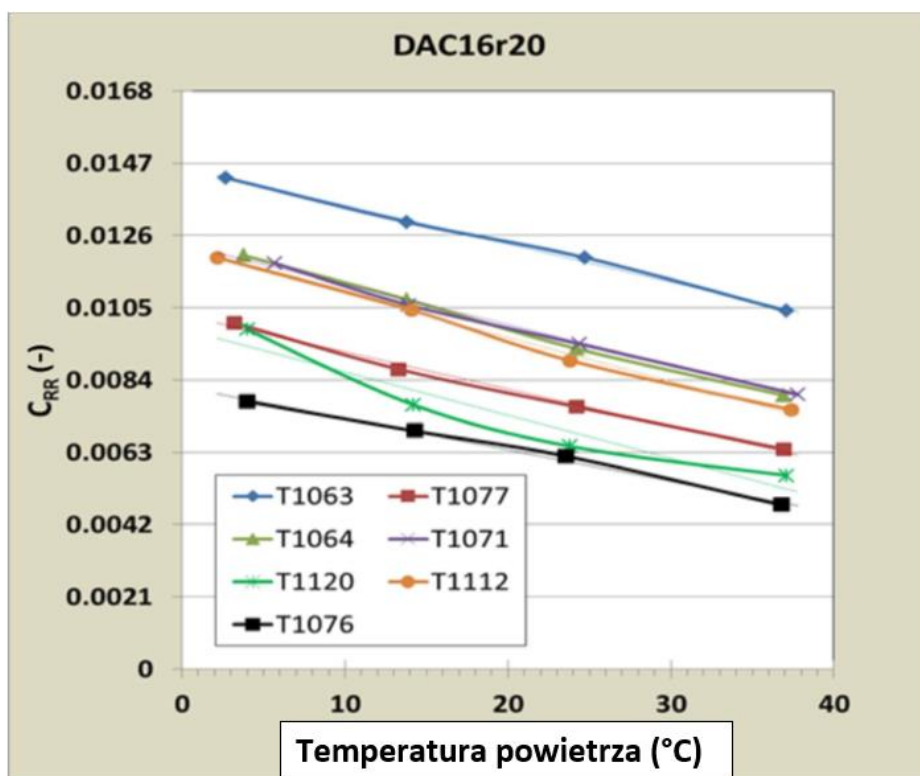
Rysunek 15. Komora termostatyczna stosowana w laboratorium Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej (materiał własny)



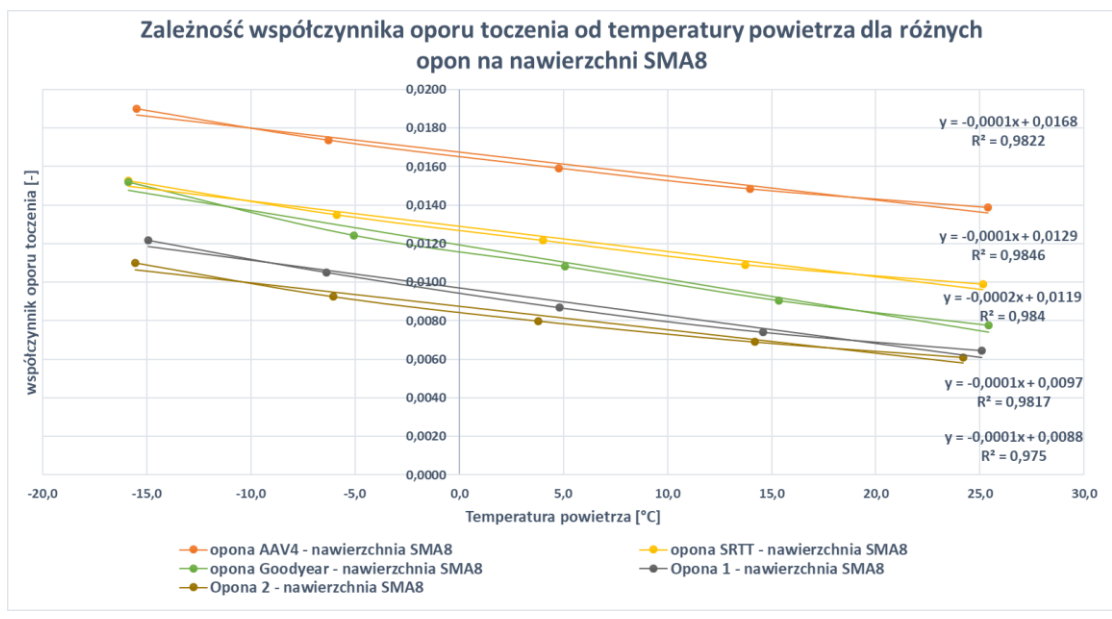
Rysunek 16. Wymiennik ciepła stosowany w laboratorium Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej (materiał własny)

Poniżej przedstawiono wyniki badań nad wartością współczynnika oporu toczenia w zależności od temperatury powietrza uzyskane na maszynie bieżnej. W przypadku gdy

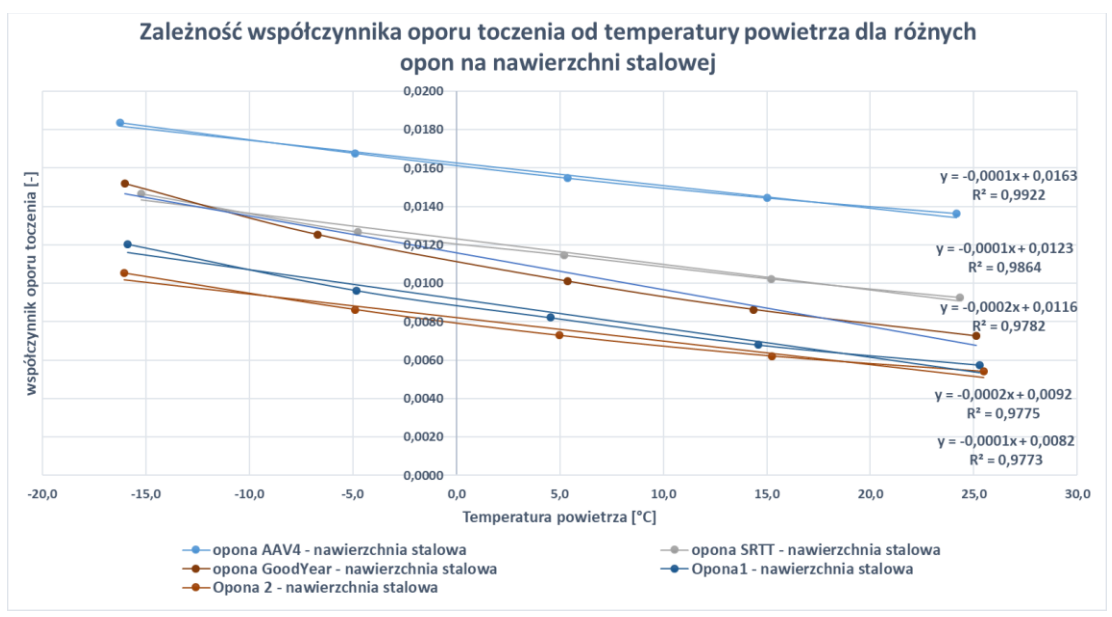
porównujemy wyniki w odniesieniu do jednej nawierzchni, w tym przypadku nawierzchni DAC16 (betonu asfaltowego o maksymalnym uziarnieniu 16 mm), SMA8 (mieszanka mastykso-grysowa) oraz stalowej to zauważamy podobny wpływ temperatury na wszystkie przebadane opony (Rysunek 17, Rysunek 18, Rysunek 19). Jeśli jednak rozpatrujemy wyniki otrzymane dla konkretnej opony na różnych nawierzchniach (Rysunek 20) to zauważamy wyraźne różnice wpływu temperatury na otrzymane współczynniki oporu toczenia (różnice nachylenia regresji liniowej sięgają w tym przypadku do 40%, Rysunek 21). Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że przedstawione na Rys. 18 i 19 wyniki badań wykonanych przez autora mają unikatowy charakter, gdyż obejmują bardzo szeroki zakres temperatur od -15°C do $+25^{\circ}\text{C}$.



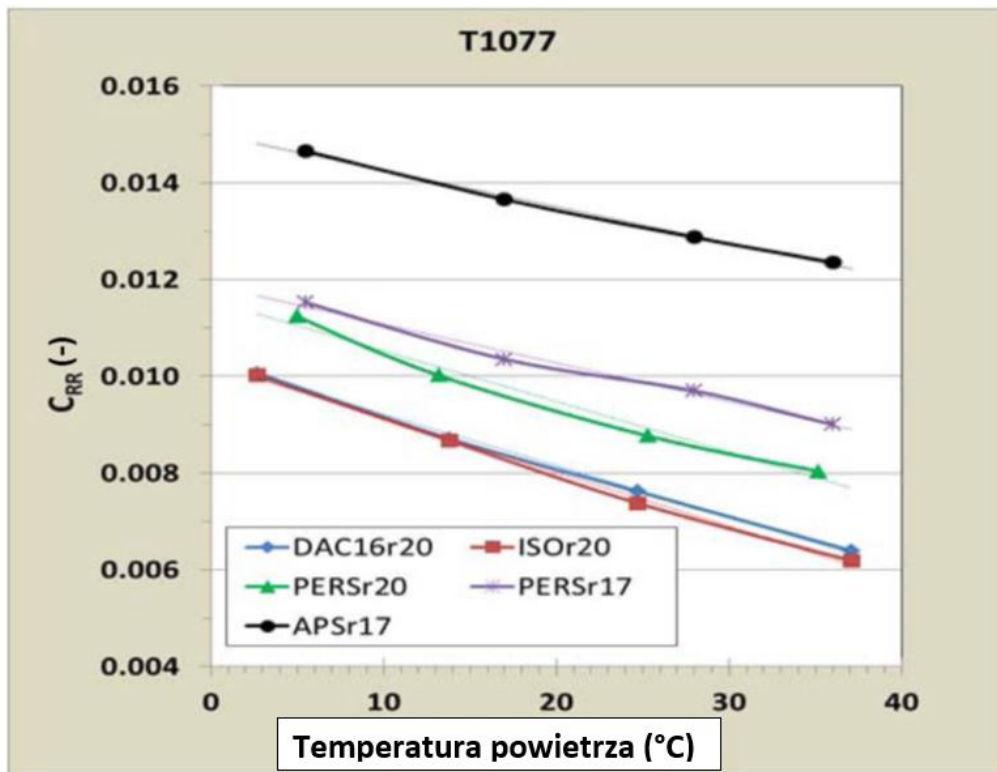
Rysunek 17. Zależność współczynnika oporu toczenia od temperatury powietrza dla różnych opon na nawierzchni DAC16 [27]



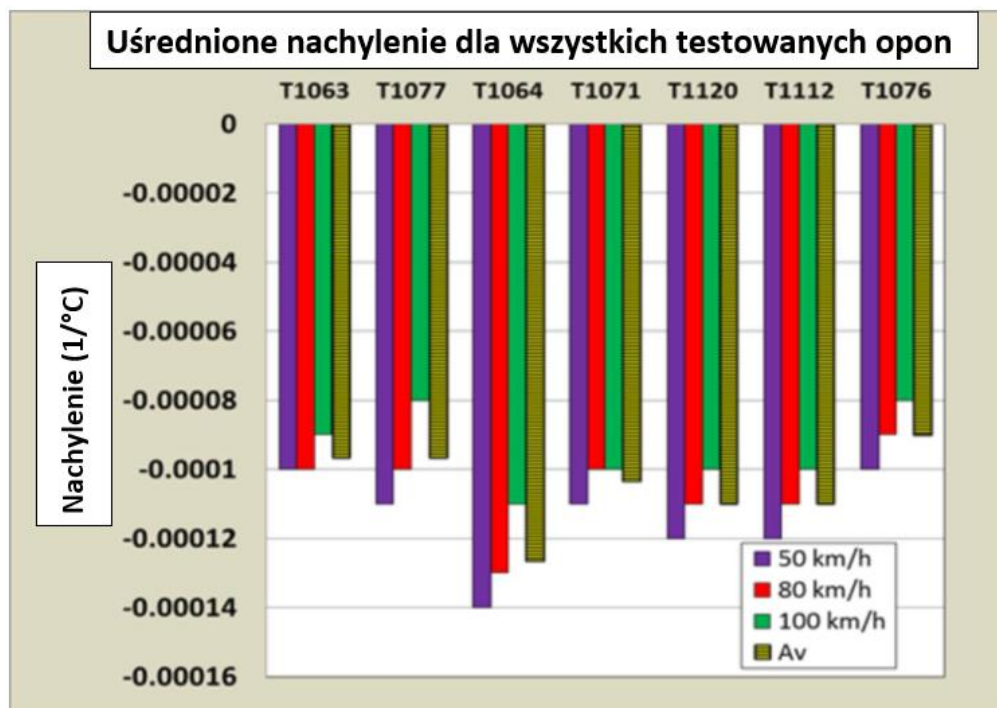
Rysunek 18. Zależność współczynnika oporu toczenia od temperatury powietrza dla różnych opon na nawierzchni SMA8 (materiał własny)



Rysunek 19. Zależność współczynnika oporu toczenia od temperatury powietrza dla różnych opon na nawierzchni stalowej (materiał własny)



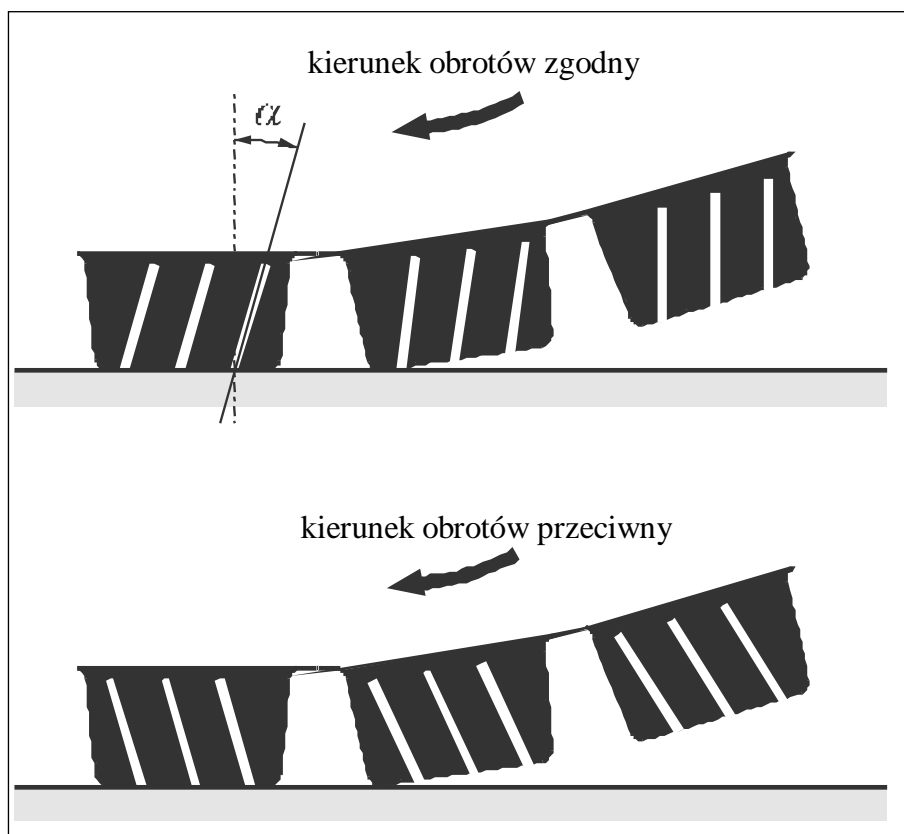
Rysunek 20. Wpływ temperatury powietrza na współczynnik oporu toczenia dla opony T1077 na różnych nawierzchniach przy prędkości 80 km/h [27]



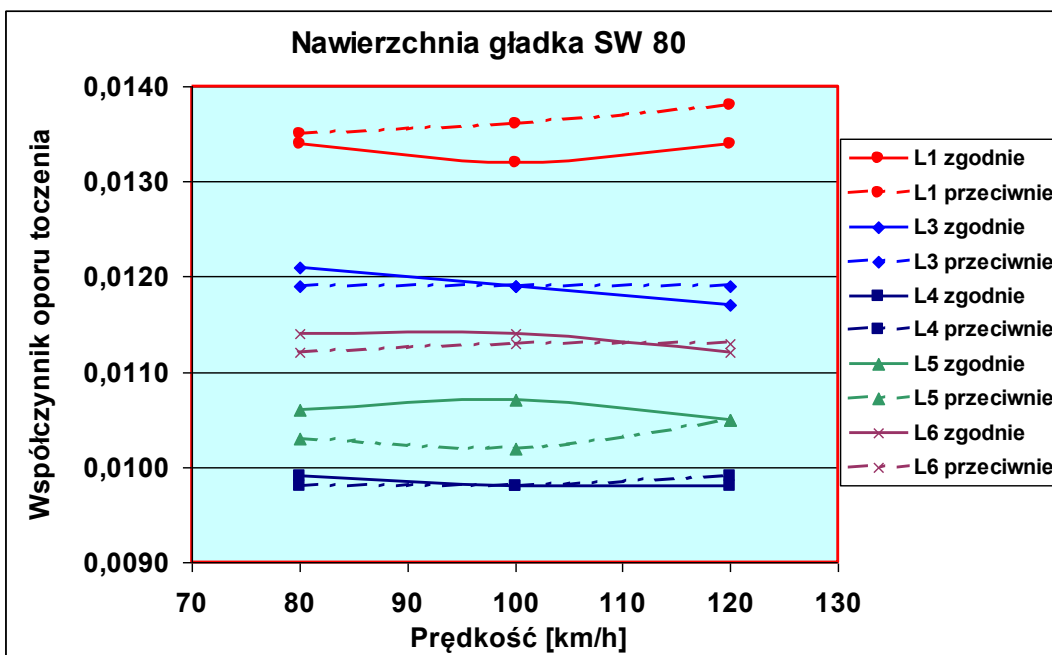
Rysunek 21. Uśrednione wartości nachylenia regresji liniowej na wszystkich nawierzchniach [27]

2.2.5 Wpływ kierunku toczenia opon z kierunkową rzeźbą bieżnika

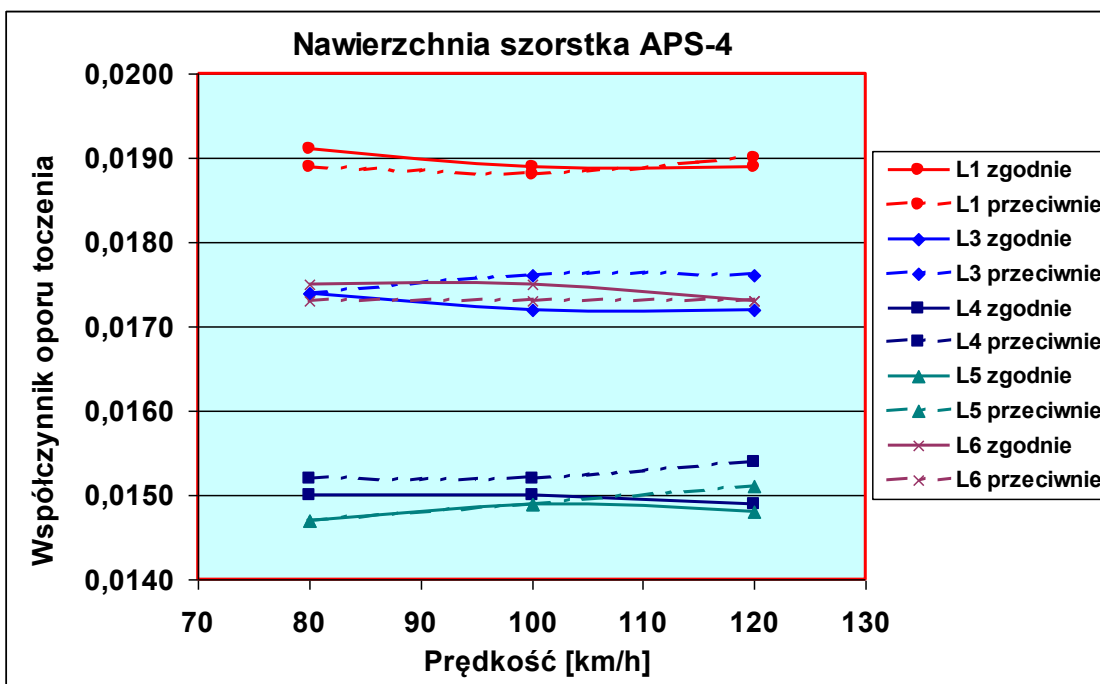
Kierunkowa rzeźba bieżnika stosowana jest w celu zwiększenia przyczepności kół podczas przenoszenia sił napędowych. Samochód wyposażony w takie opony odznacza się dobrą kierunkową statecznością ruchu w trakcie hamownia. Patrząc na wyniki badań nad wpływem kierunku toczenia opon o kierunkowej rzeźbie bieżnika na wartość oporu toczenia można stwierdzić, iż jest on niewielki (rzędu 1,5%, w skrajnych przypadkach do 5%). W przypadkach, gdy mamy do czynienia z nacięciem lametek pod pewnym kątem α do promienia koła (Rysunek 22), korzystnym ze względu na opór toczenia jest montowanie opon w kierunku przeciwnym, niż wskazywałaby na to rzeźba bieżnika. Taki sposób nacięcia lametek powoduje, iż straty tarcia w obszarze styku opony z jezdnią są mniejsze. Jest to spowodowane tym, że kierunek nacięcia ułatwia przeslizgi klocków bieżnika w przedniej części śladu styku, gdzie naciski jednostkowe bieżnika na jezdnię są największe [2,9,12]. Poniżej przedstawiono wykresy przedstawiające wyniki badań opisywanego zjawiska na nawierzchni gładkiej SW-80 (Rysunek 23) oraz szorstkiej APS-4 (Rysunek 24) [2].



Rysunek 22. Bieżnik opony z lamelkami naciętymi pod kątem α w stosunku do promienia koła [2]



Rysunek 23. Opór toczenia opon kierunkowych z drogową rzeźbą bieżnika, toczonej zgodnie i przeciwnie do kierunku oznaczonego na oponie na nawierzchni SW-80 [2]

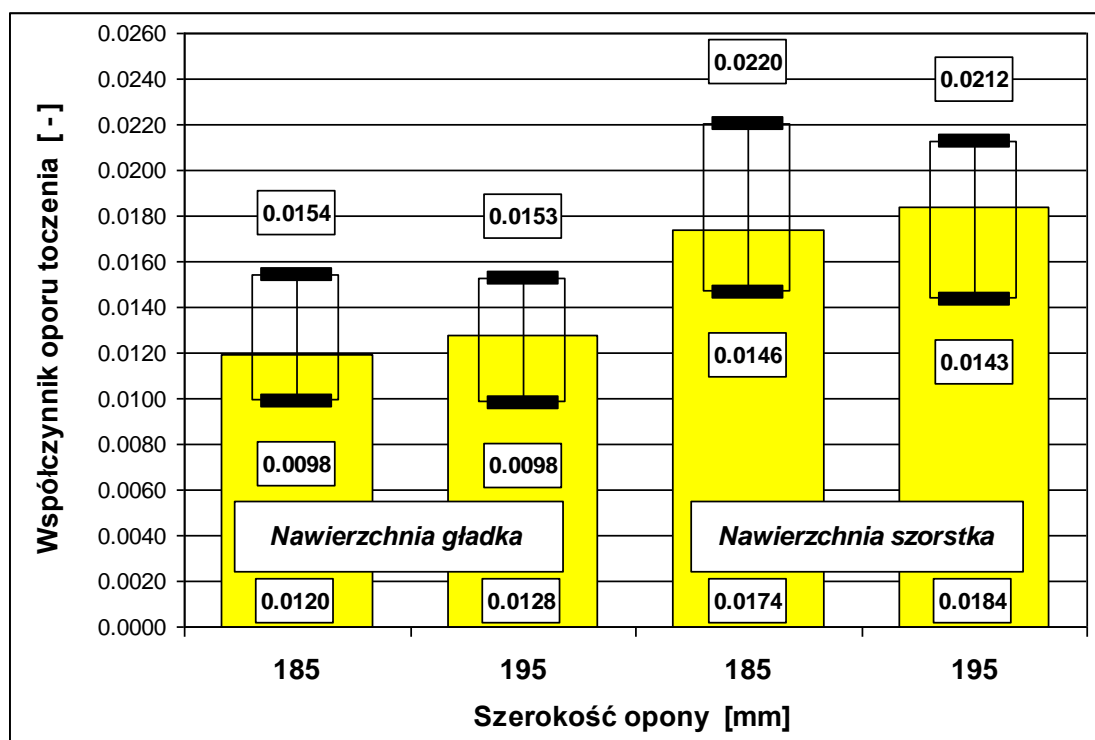


Rysunek 24. Opór toczenia opon kierunkowych z drogową rzeźbą bieżnika, toczonej zgodnie i przeciwnie do kierunku oznaczonego na oponie na nawierzchni APS-4 [2]

2.3 Czynniki konstrukcyjne opony

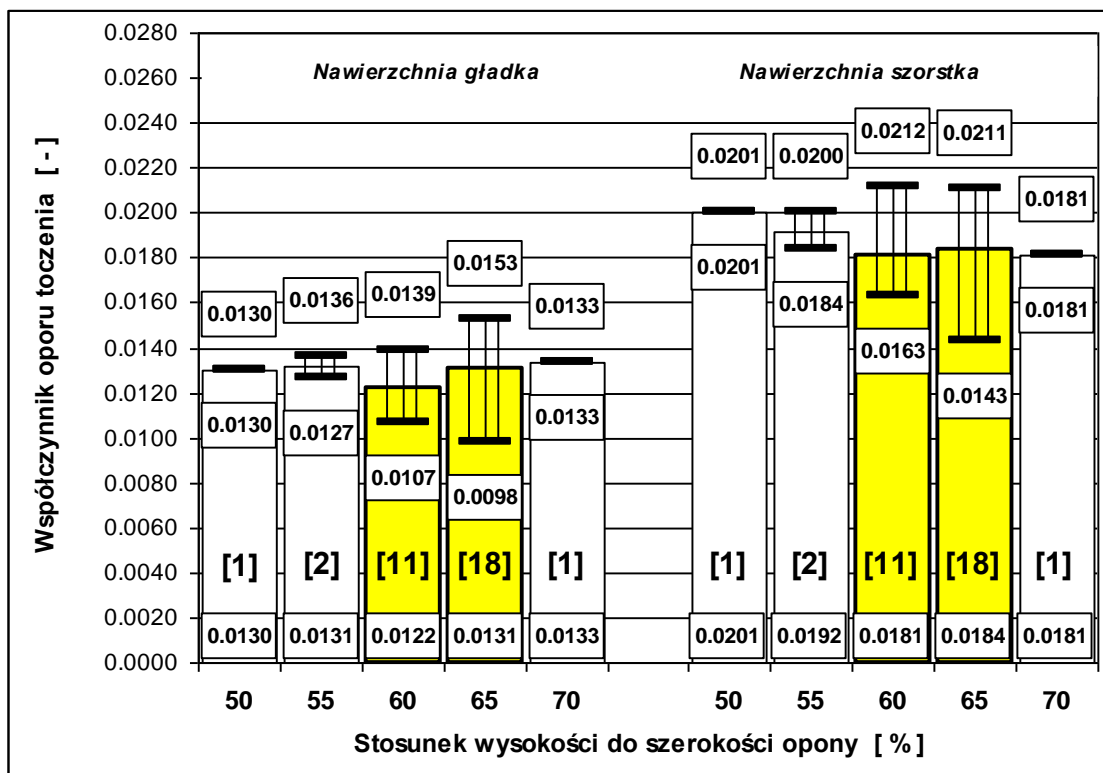
2.3.1. Wpływ wymiarów opony

Poniżej przedstawiono wyniki badań zależności współczynnika oporu toczenia od wymiarów opony wykonane na maszynach bieżnych Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej (Rysunek 25, Rysunek 26). Jak widać na Rysunku 25 na obu nawierzchniach wraz ze wzrostem szerokości opony w niewielkim stopniu rośnie również współczynnik oporu toczenia. Warto nadmienić, że są to wyniki uśrednione dla 49 opon o szerokości 185mm i 33 opon o szerokości 195mm wraz z podanymi wartościami minimalnymi i maksymalnymi [13].



Rysunek 25. Zależność współczynnika oporu toczenia od szerokości opony [13]

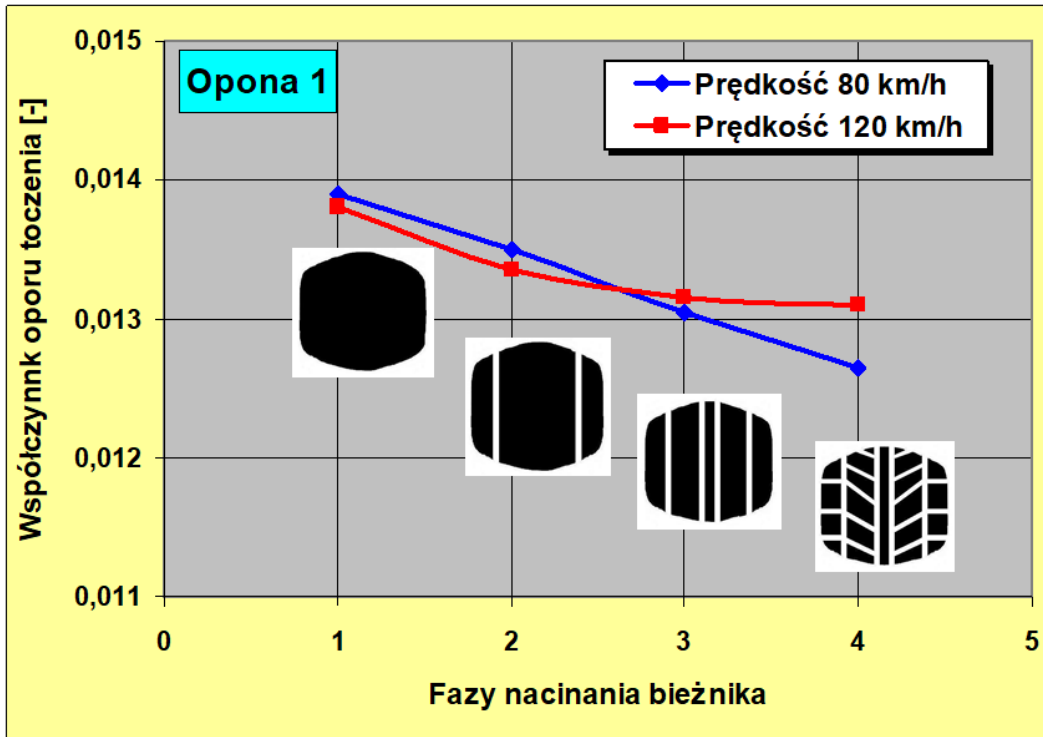
Również profil opony ma wpływ na wartość oporu toczenia. Poniżej przedstawiono wykres obrazujący wyniki badań nad tym zagadnieniem (Rysunek 26). Wyniki uzyskane dla serii 60% i 65% (stosunek wysokości do szerokości) są miarodajne, natomiast pozostałe zaprezentowane serie mają jedynie charakter orientacyjny ze względu na zbyt małą ilość przebadanych opon. Wykres pokazuje, iż wraz ze zmniejszaniem się stosunku wysokości do szerokości opony maleje współczynnik oporu toczenia.



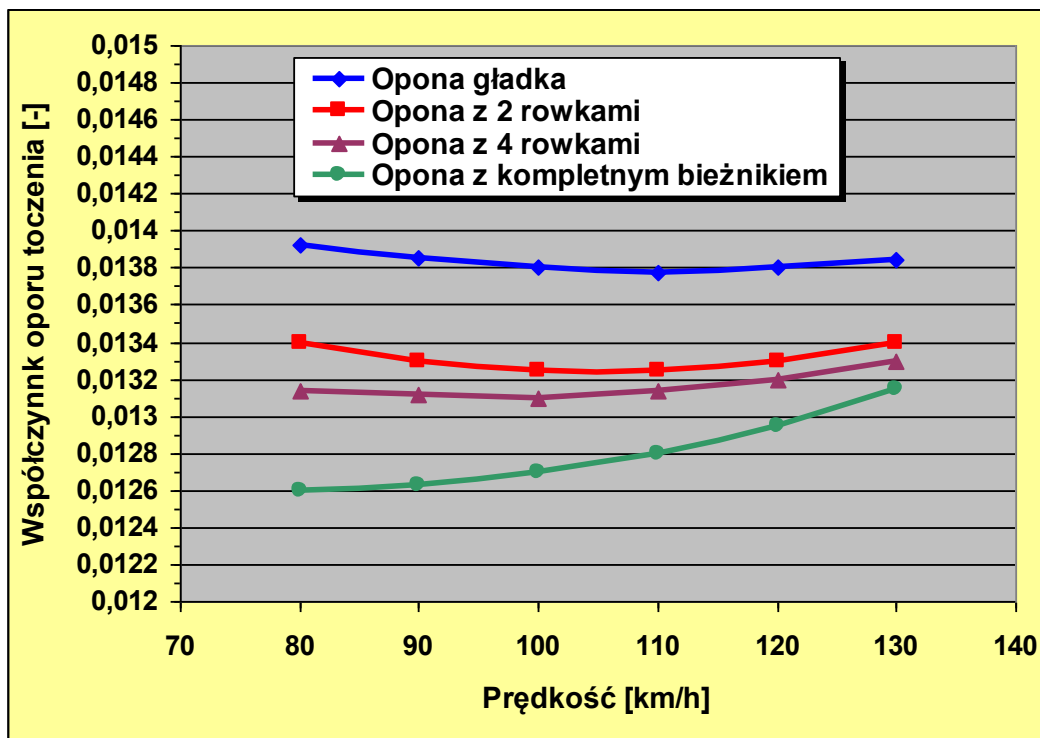
Rysunek 26. Zależność współczynnika oporu toczenia od stosunku wysokości do szerokości opony [13]

2.3.2 Wpływ rzeźby bieżnika opony

Opór toczenia maleje wraz z pojawianiem się kolejnych rowków na pasie bieżnika. Ma to bezpośredni związek ze spadkiem masy opony oraz zmianą sztywności bieżnika. Co więcej jego elementy posiadają swobodniejszą możliwość przemieszczania się na śladzie styku opony z nawierzchnią drogową (Rysunek 27). W miarę pojawiania się kolejnych elementów wzoru bieżnika, zmienia się przebieg współczynnika oporu toczenia w funkcji prędkości [14]. Przedstawione jest to na wykresie poniżej (Rysunek 28) [2].



Rysunek 27. Zmiana współczynnika oporu toczenia w zależności od kolejnych faz nacinania wzoru bieżnika [14]



Rysunek 28. Zależność współczynnika oporu toczenia od prędkości [14]

2.3.3 Wpływ składu mieszanki gumowej

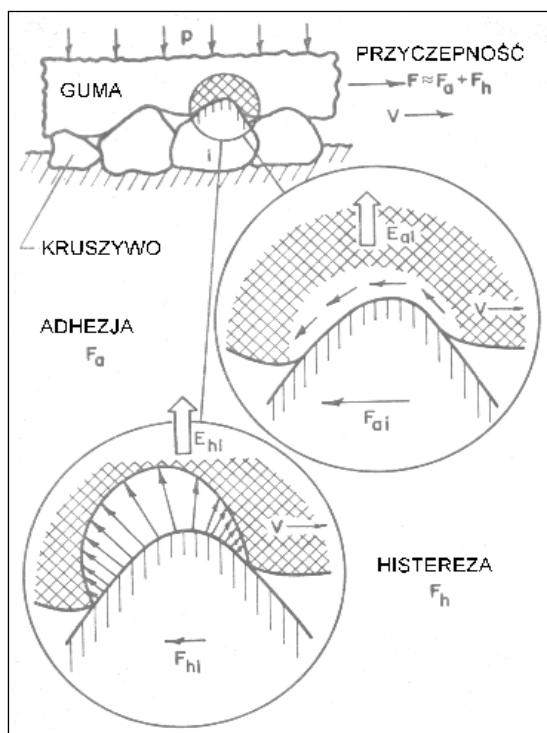
Na Rysunek 29 pokazano wycinek bieżnika opony obciążony naciskami p i ślizgający się z prędkością v . Siła przyczepności F tego elementu do nawierzchni jezdni jest sumą składowych: adhezji F_a i histerezy F_h [28].

$$F = F_a + F_h \quad (2.2)$$

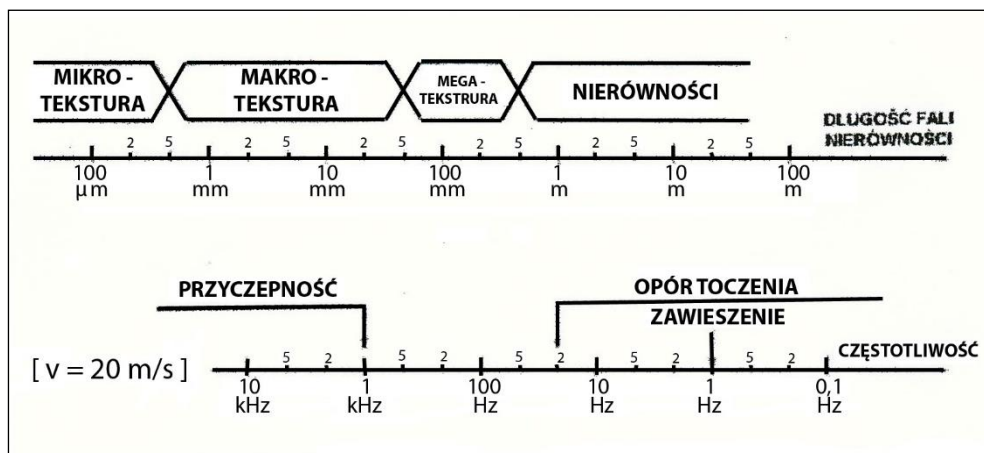
Po obustronnym podzieleniu równania (2) przez pionowe obciążenie Q , otrzymamy zależność na współczynnik przyczepności:

$$\mu = \mu_a + \mu_h \quad (2.3)$$

Dla zapewnienia wysokiej przyczepności opony do nawierzchni, najlepsza jest mieszanka gumowa o dużej histerezie (składowa μ_h jest duża, co wpływa na wzrost całkowitego współczynnika przyczepności μ). Z drugiej strony jest to sprzeczne z wymaganiami niskiego oporu toczenia, dla którego najkorzystniejsza jest niska histereza. Aby znaleźć kompromis pomiędzy sprzecznymi wymaganiami dotyczącymi oporu toczenia i przyczepności, w trakcie dobierania właściwości mieszanki gumowej bieżnika należy przeanalizować częstotliwości odkształceń powłoki opony i elementów bieżnika w styku toczonej opony z jezdnią (Rysunek 30). Na górnej osi przedstawiono długości fali nierówności nawierzchni drogowej, natomiast na dolnej osi zaprezentowano odpowiadające im częstotliwości dla prędkości jazdy $V = 20$ m/s. Częstotliwości związane z obrotami koła $f = V/2\pi r$ są rzędu około 20 Hz (w zależności od promienia tocznego r). Jest to częstotliwość, z jaką odkształca się powłoka opony generując opór toczenia. Nierówności o długości fali mniejszej od około 20 mm wpływają na przyczepność opony do nawierzchni (częstotliwości odkształceń gumy bieżnika wywołane tymi nierównościami w styku opony z jezdnią dla prędkości jazdy 20 m/s są rzędu powyżej 1 kHz) [28].



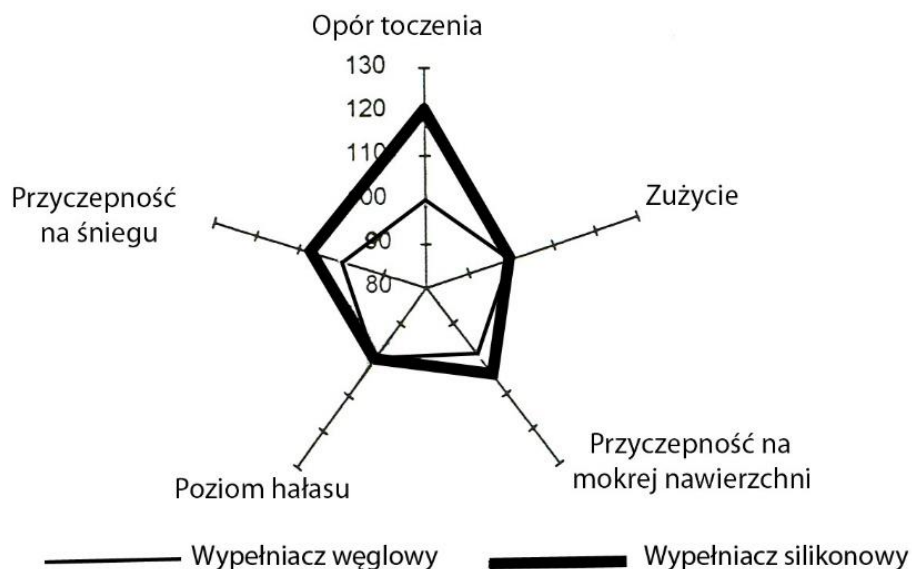
Rysunek 29. Główne składowe przyczepności gumy: adhezja i histereza [28]



Rysunek 30. Częstotliwości odkształceń bieżnika opony w funkcji długości fali nierówności dla prędkości jazdy $V=20\text{m/s}$ [28]

Używając wykresu częstotliwości można określić wymagania dla idealnej mieszanki gumowej (Rysunek 30). Niskie wartości tłumienia mieszanki gumowej (niska histereza przy niskich częstotliwościach odkształceń do 20 Hz) zapewniają niski opór toczenia gotowej opony, zaś wysokie wartości tłumienia (duża histereza dla wysokich częstotliwości powyżej 1 kHz) determinują dużą przyczepność opony. Takie właściwości mieszanki gumowej bieżnika zapewniają opony z wypełniaczem silikonowym, które wyparły z rynku opony z tradycyjnym

wypełniaczem węglowym. Poniżej przedstawiono porównanie właściwości opon z dwoma wypełniaczami (Rysunek 31).

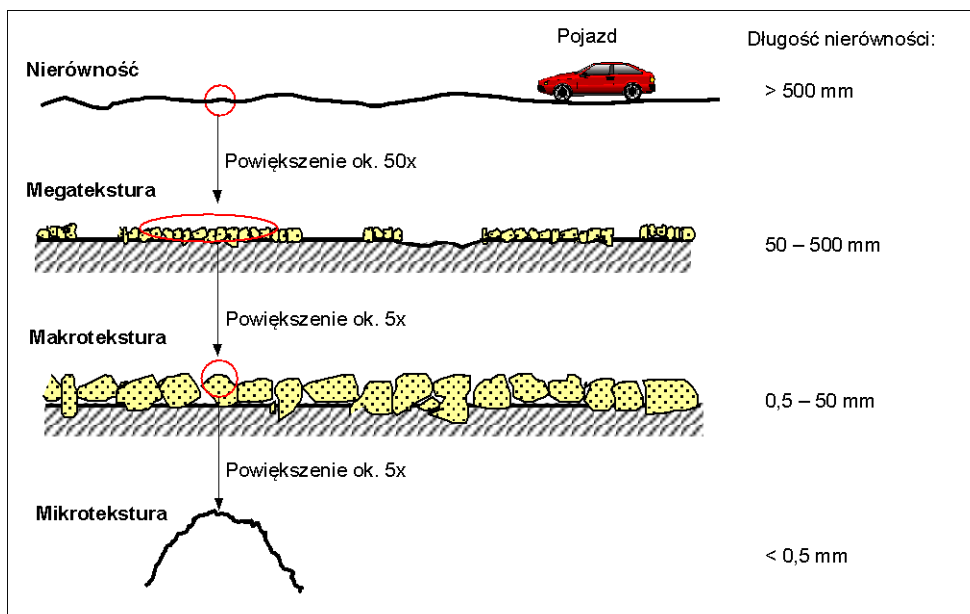


Rysunek 31. Porównanie właściwości opon z silikonową mieszanką gumową z właściwościami opon z tradycyjną mieszanką gumową bieżnika [28]

2.4 Wpływ nawierzchni na opór toczenia

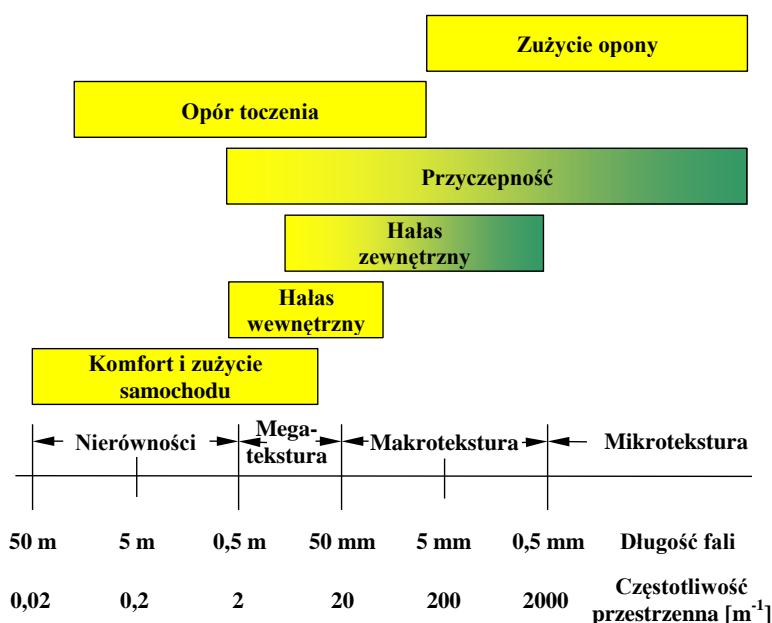
Najważniejszymi parametrami opisującymi nawierzchnię drogową z punktu widzenia jej współpracy z oponą samochodową są: tekstura, równość, sztywność i porowatość warstwy ścieralnej [19]. Teksturą nawierzchni nazywamy odchyłkę rzeczywistej powierzchni nawierzchni drogowej od powierzchni idealnie płaskiej o długości fali mniejszej niż 0,5 m [15]. W zależności od długości fali wyróżnia się (Rysunek 32) [15]:

- nierówności: długość fali powyżej 500 mm,
- megatekstura: długość fali od 50 do 500 mm, amplituda dla typowych nawierzchni pomiędzy wartością minimalną i maksymalną wynosi 0,1 – 50 mm,
- makrotekstura: długość fali od 0,5 do 50 mm, amplituda dla typowych nawierzchni pomiędzy wartością minimalną i maksymalną wynosi 0,1 – 20 mm,
- mikrotekstura: długość fali poniżej 0,5 mm, amplituda dla typowych nawierzchni pomiędzy wartością minimalną i maksymalną wynosi 0,001 – 0,5 mm



Rysunek 32. Ilustracja poszczególnych zakresów tekstury nawierzchni drogowej [16]

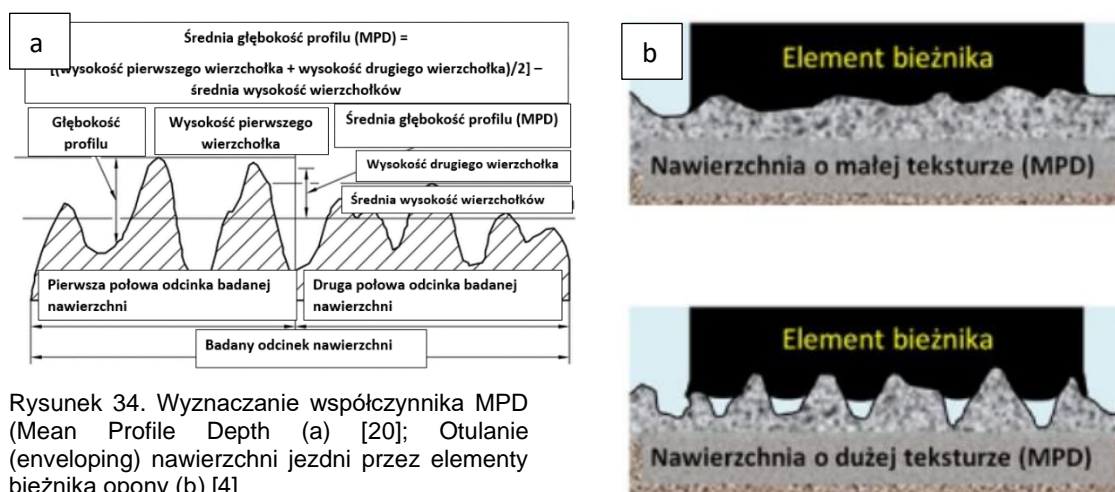
Na rysunku poniżej przedstawiono podzakresy tekstury wraz z ich wpływem na współpracę opony z nawierzchnią (Rysunek 33).



Rysunek 33. Zakresy tekstury i ich wpływ na współpracę opony z nawierzchnią [17]

Tekstura nawierzchni drogowej w znaczący sposób wpływa na odkształcenia elementów bieżnika opony, a co za tym idzie przyczynia się do wzrostu oporu toczenia. Odkształcenia występują również po stronie nawierzchni, jednak ze względu na to, że impedancja mechaniczna nawierzchni jest znacznie większa niż opony, odkształcenia tej pierwszej są znacznie mniejsze. To stwierdzenie obowiązuje dla klasycznych nawierzchni sztywnych. Innowacyjne nawierzchnie

poroelastyczne mają tak małą sztywność, że zaczyna ona mieć istotny wpływ na opory toczenia, szczególnie w przypadku opon do samochodów ciężarowych. Dla większości sztywnych nawierzchni drogowych dynamiczny moduł Younga mieści się w zakresie 10-45 GPa, a dla opon samochodowych wynosi 0,3-1 MPa. W oponach samochodowych typowe ugięcie struktury nośnej zależne od ciśnienia pompowania i sztywności ścianek bocznych wynosi 15-20 mm, natomiast elementów bieżnika poprzez kontakt z teksturą nawierzchni 2-3 mm. Dla porównania ugięcie nawierzchni wynosi kilka setnych części milimetra [4]. Powszechnie stosowanym współczynnikiem opisującym teksturę nawierzchni jest MPD (*Mean Profile Depth*), którego zasada wyznaczania została przedstawiona poniżej (Rysunek 34a). Jest to suma wysokości dwóch najwyższych wierzchołków (każdy z innej połówki rozpatrywanej próbki), od której odejmuje się średnią wartość wysokości wierzchołków na badanym odcinku nawierzchni. Wynik wyrażony jest w mm [20,21].

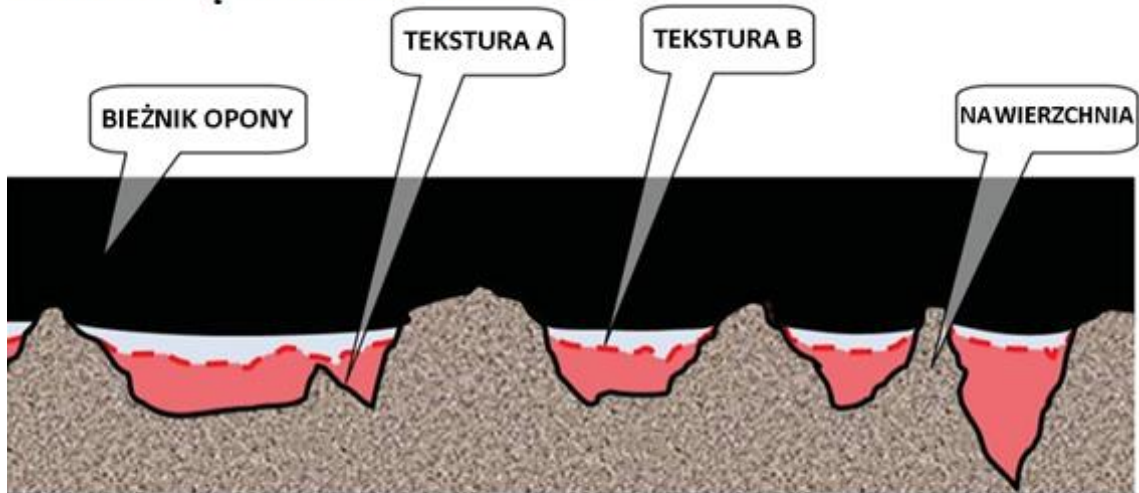


Rysunek 34. Wyznaczanie współczynnika MPD (Mean Profile Depth) (a) [20]; Otulanie (enveloping) nawierzchni jezdni przez elementy bieżnika opony (b) [4]

Stosowany do tej pory współczynnik MPD nie uwzględnia jednak zjawiska envelopingu. Opisywany przez niego kontakt opony z nawierzchnią nie przedstawia stanu faktycznego, przez co nie jest dobrym deskryptorem zależności pomiędzy oporem toczenia, a teksturą nawierzchni (zwłaszcza w przypadku bardzo szorstkich nawierzchni). Zbyt mała elastyczność elementów bieżnika nie pozwala na ich odkształcenie, które dokładnie odwzorowywałoby kształt nawierzchni (Rysunek 34b). Kontakt z nawierzchnią jest ograniczony tylko do najwyższych fragmentów nawierzchni (wierzchołków kruszywa). Bieżnik opony jest dociskany i uginany przez najwyższe punkty nawierzchni, jednak ze względu na sztywność mieszanki gumowej oraz opasania jego elementy nie wnikają wewnątrz wgłębienia tekstury nawierzchni, a tworzą „mosty” pomiędzy sąsiadującymi szczytami. W wyniku tego na śladzie styku opony z nawierzchnią tworzą się kieszenie powietrzne i kanały. Zjawisko to zostało zobrazowane poniżej (Rysunek 35). Dwa różne profile tekstury A i B uginają oponę w ten sam sposób, jednak kieszenie powietrzne i kanały różnią się w znacznym stopniu. Wartość MPD dla tekstury A byłaby wyższa, niż dla tekstury B. Analizując powyższą sytuację pod kątem oporu toczenia widzimy, że odkształcenia bieżnika

opony są jednakowe w obu przypadkach. Prowadzi to do wniosku, że straty energetyczne są identyczne (tylko w przypadku suchej nawierzchni). Rzecz jasna w przypadku mokrej nawierzchni film wodny będzie inny dla tekstury A i B, co przyczyni się do różnic w wartości oporu toczenia [21].

ZJAWISKO CZĘŚCIOWEGO ENVELOPINGU



ZJAWISKO PEŁNEGO ENVELOPINGU



Rysunek 35. Powierzchnia styku pomiędzy oponą, a nawierzchnią drogową o różnej teksturze [21]

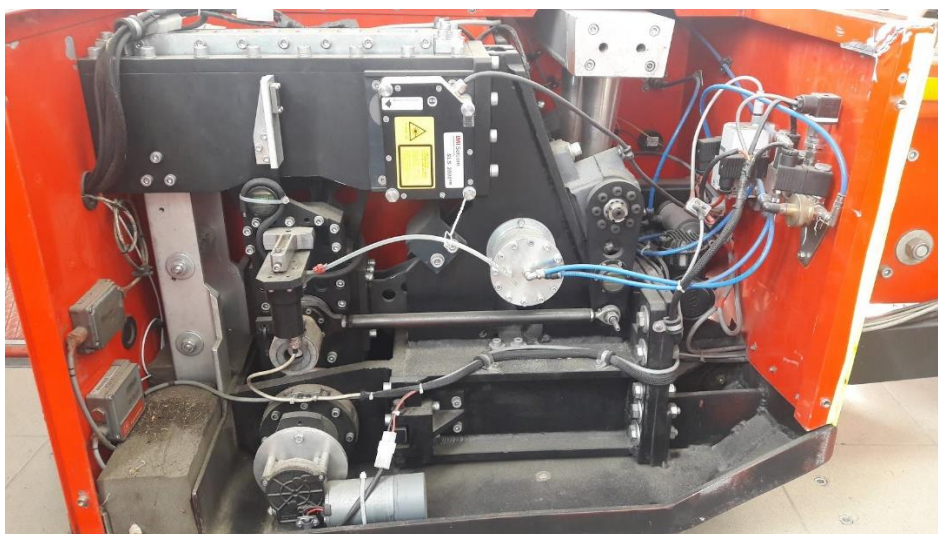
2.5 Dotychczasowe metody pomiaru oporu toczenia

2.5.1 Metoda przyczepowa – na przykładzie przyczepy badawczej R²Mk.2

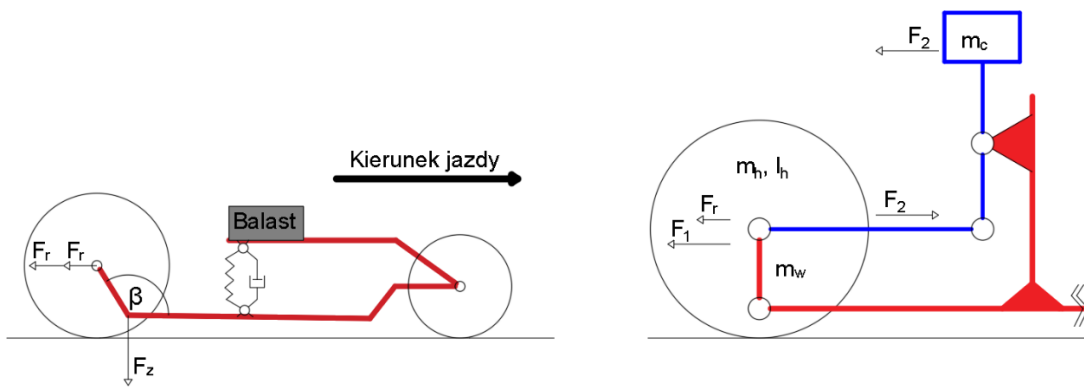
Metoda przyczepowa polega na zastosowaniu specjalnej przyczepy badawczej, która jest holowana przez samochód osobowy lub dostawczy. Jako przykład posłuży tutaj przyczepa R²Mk.2 zaprojektowana oraz zbudowana przez Zespół Pojazdów Politechniki Gdańskiej, która jest uważana za najbardziej zaawansowaną technologicznie przyczepę do badania współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni drogowych na świecie (Rysunek 36, Rysunek 37). Jest to przyczepa dwuosiowa, trójkołowa. Tylne pojedyncze koło, zawieszone na uchylnym pionowym wahaczu, pełni jednocześnie rolę koła badanego. Poniżej zamieszczono schemat przedstawiający zasadę działania przyczepy do badania siły oporu toczenia (Rysunek 38).



Rysunek 36. Przyczepa R² Mk.2 do pomiaru współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni (materiał własny)



Rysunek 37. Ustrój pomiarowy przyczepy R² Mk.2 (materiał własny)



Rysunek 38. Metoda pomiaru współczynnika oporu toczenia (C_{RR}) przy wykorzystaniu odchylanego wahacza pomiarowego (a) oraz schemat ustroju pomiarowego przyczepy R² Mk.2 (b) [22]

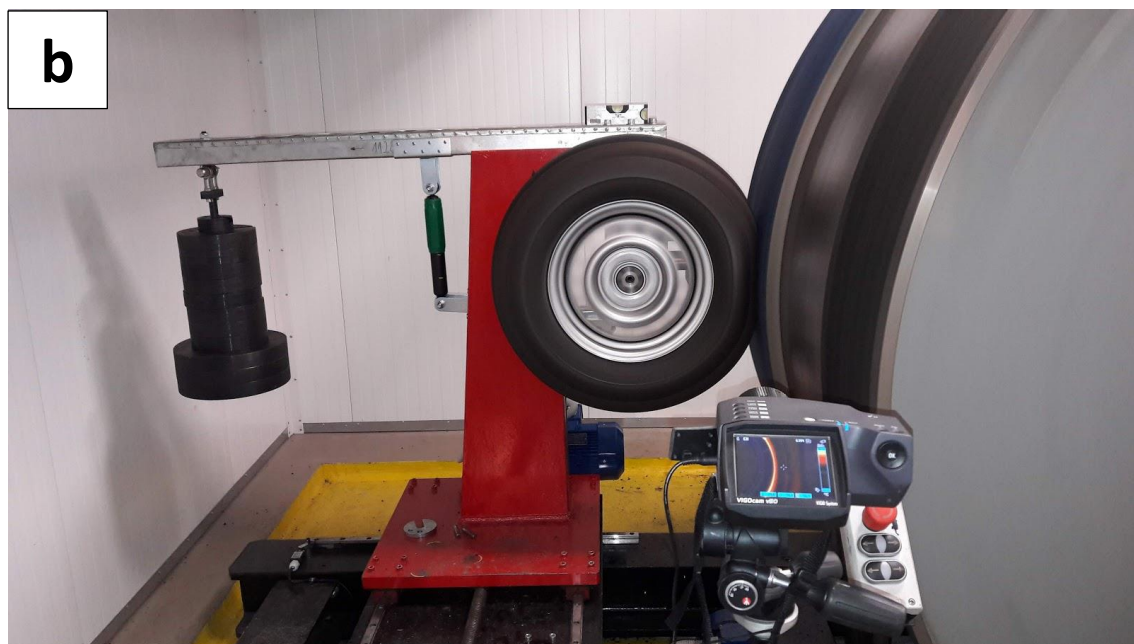
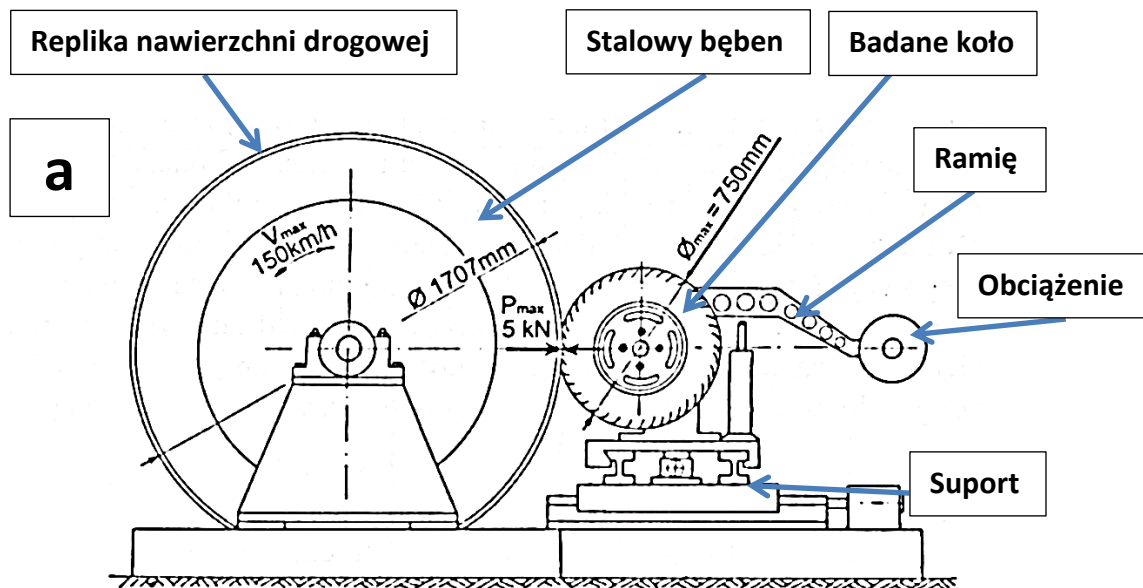
W trakcie jazdy siła oporu toczenia oddziałująca na badane koło wychyla wahacz pionowy z położenia równowagi o kąt β . Wielkość tego kąta jest miarą siły oporu toczenia występującej w śladzie styku opona/nawierzchnia [23,24]. Podczas prowadzenia badań pojawiają się komplikacje w postaci działania sił innych, niż siła oporu toczenia. Są to siły związane z bezwładnością wahacza oraz badanego koła (w przypadku gdy prędkość jazdy nie jest stała) oraz siły wynikające z jazdy po wzniesieniu. Aby zniwelować ich wpływ należałoby prowadzić badania tylko przy jeździe ze stałą prędkością i tylko na poziomych nawierzchniach, co oznaczałoby znaczne ograniczenie możliwości badawczych tylko do specjalnie przygotowanych odcinków testowych. W celu rozwiązania tego problemu stworzono specjalny układ mechaniczny do kompensacji wpływu wzniesienia oraz przyspieszenia.

Przyczepa pozwala na prowadzenie pomiarów praktycznie na dowolnych odcinkach testowych. Odcinek badawczy powinien być dobrany w taki sposób, aby jego długość była wystarczająca do rozpędzenia samochodu z przyczepą do żądanej prędkości pomiarowej, a po jego przejechaniu, do wyhamowania pojazdu z przyczepą. Odcinki badawcze powinny być również prostoliniowe, aby nie wystąpiła siła poprzeczna oddziałująca na badane koło. Przyczepa R² Mk.2 umożliwia prowadzenie badań w zwykłym ruchu miejskim, jak i z prędkościami do 130 km/h.

2.5.2 Metoda momentowa z wykorzystaniem maszyn bieżnych

Metoda momentowa opiera się na wykorzystaniu maszyn bieżnych, gdzie opór toczenia mierzony jest poprzez pomiar momentu siły na wale napędowym bębna. Przy wyznaczaniu oporu toczenia uwzględniane są opory własne maszyny bieżnej, które określa się poprzez pomiar momentu siły napędzającego bęben, po którym toczy się koło dociśnięte siłą wynoszącą jedynie 50 N (opór toczenia w trakcie takiego badania jest znikomy i wynosi mniej niż 0,5 N) [25]. Zaletą tej metody jest dokładność oraz mała czułość na odchylenia lub przesunięcia linii działania siły promieniowej obciążającej koło od prostej normalnej do powierzchni bębna i przechodzącej przez

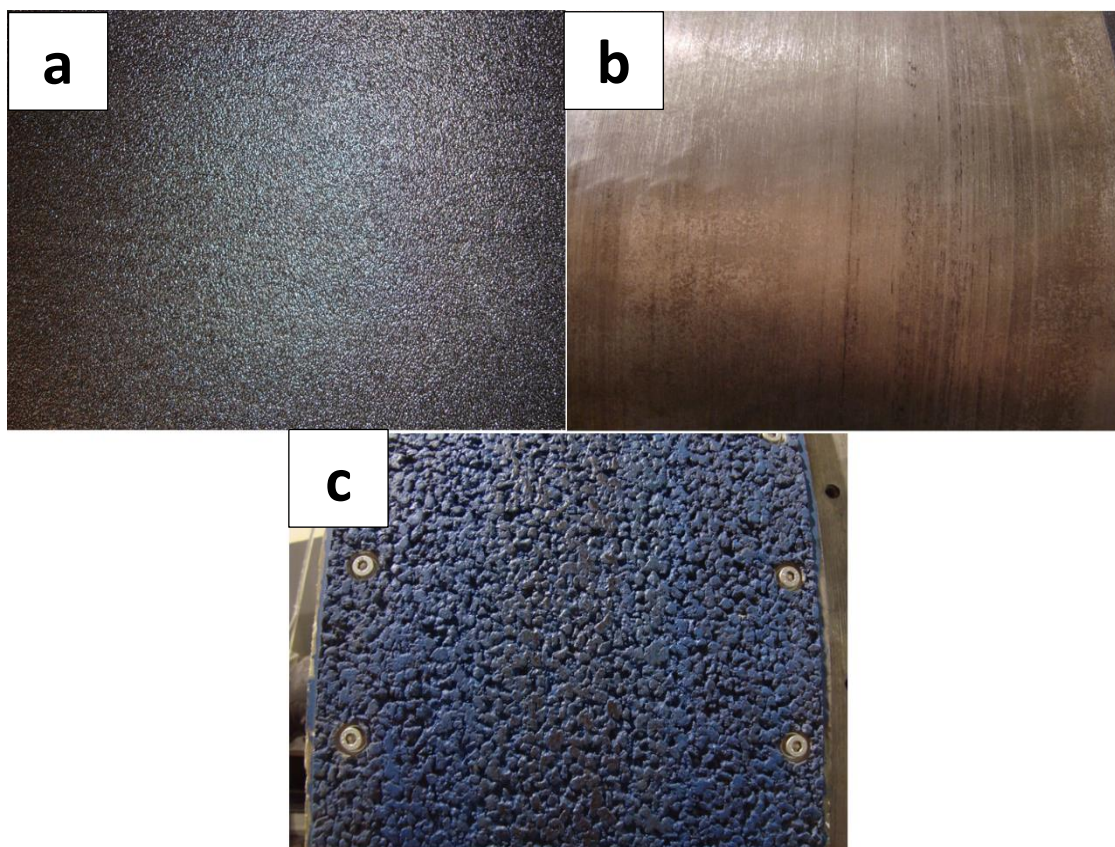
środek badanego koła. Przykład maszyn bieżnych zbudowanych i wykorzystywanych na Politechnice Gdańskiej przedstawia poniższy rysunek (Rysunek 39).





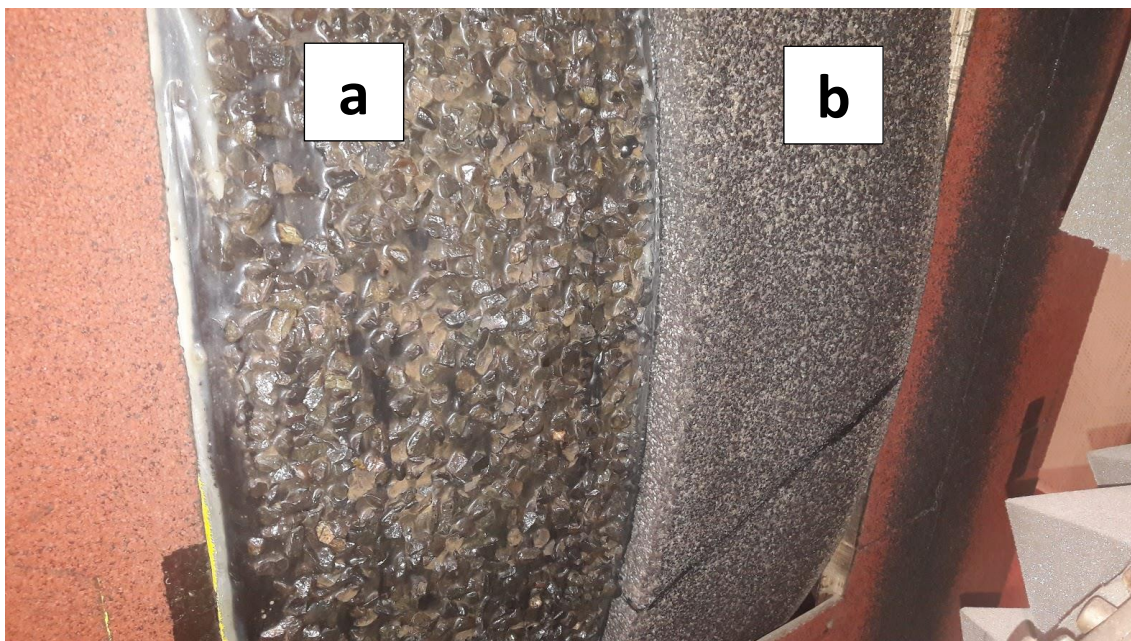
Rysunek 39. Schemat budowy maszyny bieżnej do badania oporu toczenia opon samochodowych (a) [2], maszyny bieżne będące na wyposażeniu Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej: bęben o średnicy 2 m (b), bęben o średnicy 1,7 m (c) (materiał własny)

Na bębnie o średnicy 2 m wykonywane są badania na nawierzchni stalowej, Safety Walk oraz SMA8 (Rysunek 40). Nawierzchnia stalowa oraz Safety Walk są nawierzchniami przewidzianymi w normie ISO 18164:2005 *Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres -- Methods of measuring rolling resistance*, natomiast ostatnia z wymienionych jest repliką nawierzchni drogowej SMA8, czyli nawierzchni będącej mieszanką mineralno-asfaltową o dużej zawartości grysów, zawierającej stabilizator mastyksu.



Rysunek 40. Nawierzchnie Safety Walk (a), stalowa (b) oraz SMA8 (c) (materiał własny)

Drugi bęben posiada średnicę 1,7 m i szerokość 0,5 m. Pokryty jest dwoma replikami nawierzchni drogowych: APS4 oraz PERS (Rysunek 41). Pierwsza z wymienionych to nawierzchnia bardzo szorstka o podłożu z poliestru, w którym wklejony jest grys o średnicy ziaren około 8-10 mm. Druga nawierzchnia jest poroelastyczna, wykonana z granulatu ze zużytych opon samochodowych połączonych spoiwem poliuretanowym. Do szczególnych właściwości nawierzchni należą zdolność do redukcji hałasu (dzięki porowatej i elastycznej budowie) oraz właściwości samoczyszczące.

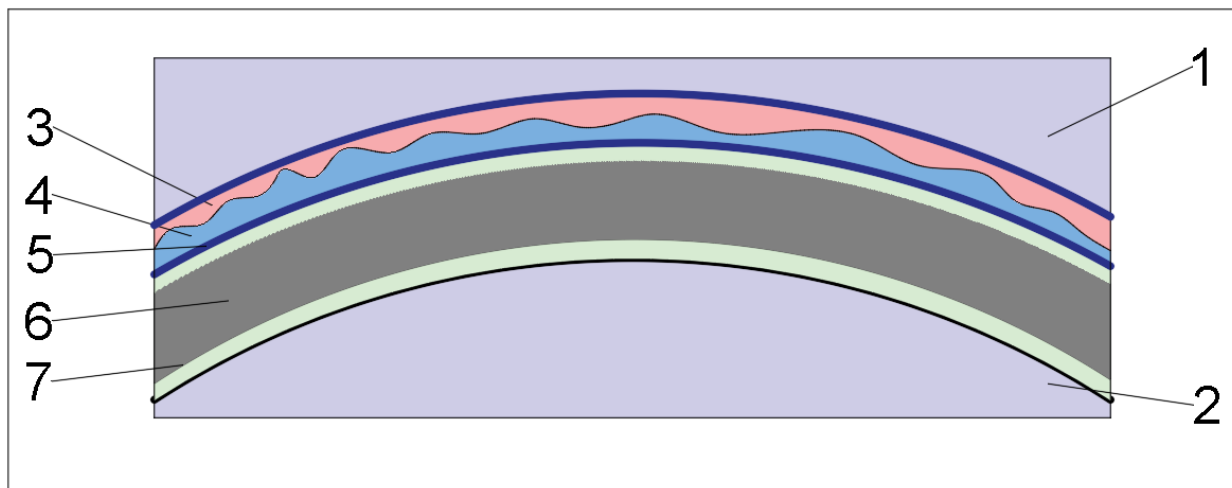


Rysunek 41. Nawierzchnie APS4 (a) oraz PERS (b) (materiał własny)

Etapy procesu tworzenia repliki nawierzchni drogowej wyglądają następująco:

- W pierwszej kolejności na oryginalną nawierzchnię wylewana jest warstwa kauczuku silikonowego, która po utwardzeniu stanowić będzie negatywowe odwzorowanie nawierzchni drogowej (Rysunek 43). Warstwa ta dodatkowo wzmacniania jest matą z włókna szklanego.
- Tak otrzymaną powłokę elastyczną umieszcza się we wklęsłej połówce formy (Rysunek 42). W tej samej części formy nakładane są kolejno warstwy żelkotu (zewnątrzna warstwa repliki Rysunek 44a) oraz warstwy wyrównawcze z żywicy epoksydowej.
- W drugiej części formy nakładane są warstwy włókna szklanego zatopionego w żywicy epoksydowej.
- W ostatniej fazie obie części formy są łączone, a pusta przestrzeń pomiędzy nimi wypełniana jest epoksydową żywicą odlewniczą. Gotowa replika w postaci łuski stanowi oczywiście tylko część całości nawierzchni, po której toczy się badane koło samochodowe (Rysunek 44b). Na bieżnię bębna mocuje się zazwyczaj od 3 do 8 łusek.

Sposób wytwarzania form do replik oraz samych replik nawierzchni, w którego opracowaniu brał udział autor niniejszej rozprawy, został zgłoszony do nadania prawa wyłącznego (numer zgłoszenia 413355 oraz 413356) [29, 30].



Rysunek 42 Schemat przedstawiający sposób formowania repliki nawierzchni drogowej do maszyn bieżnych z bębniem zewnętrznym

1,2 - połówki formy

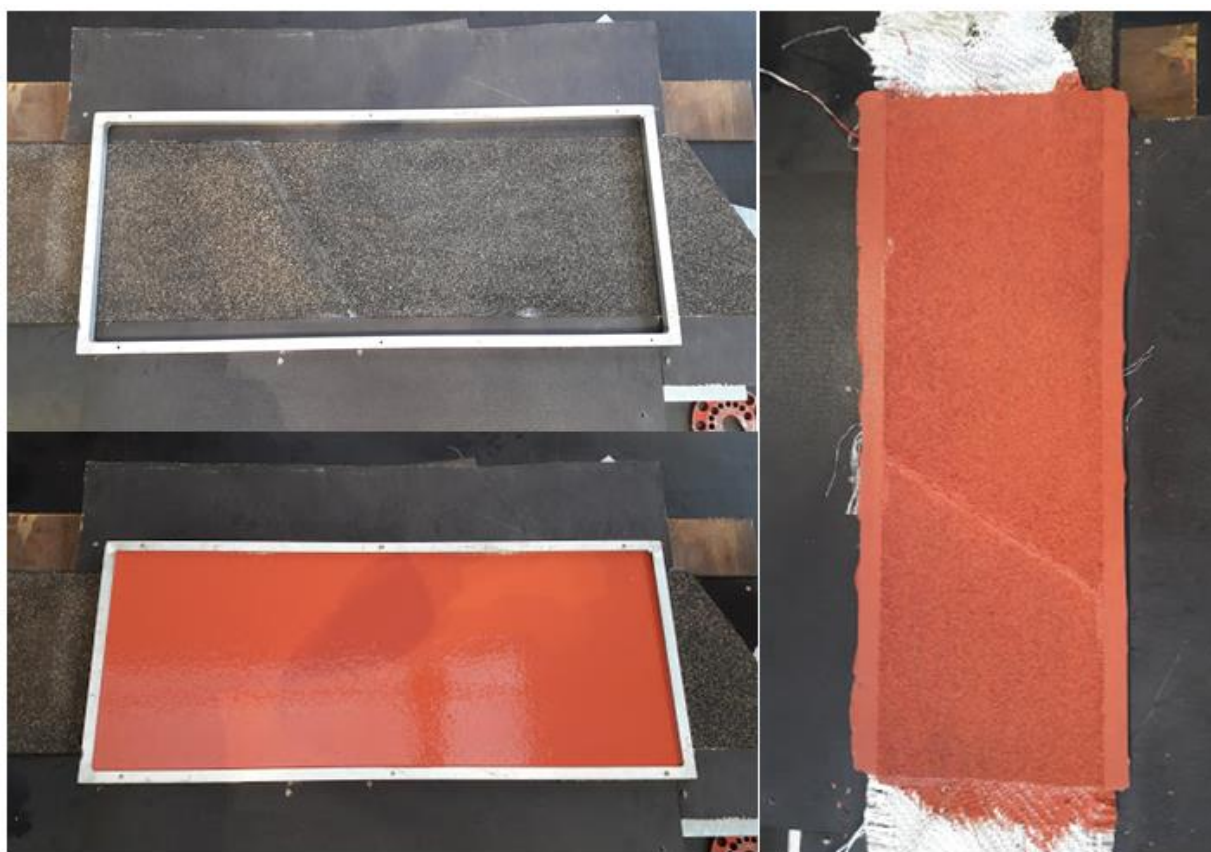
3 - powłoka elastyczna stanowiąca negatywowe odwzorowanie nawierzchni drogowej

4 - wierzchnia warstwa repliki (warstwa żelkotu wymieszanego z drobno ciętym włóknem szklanym)

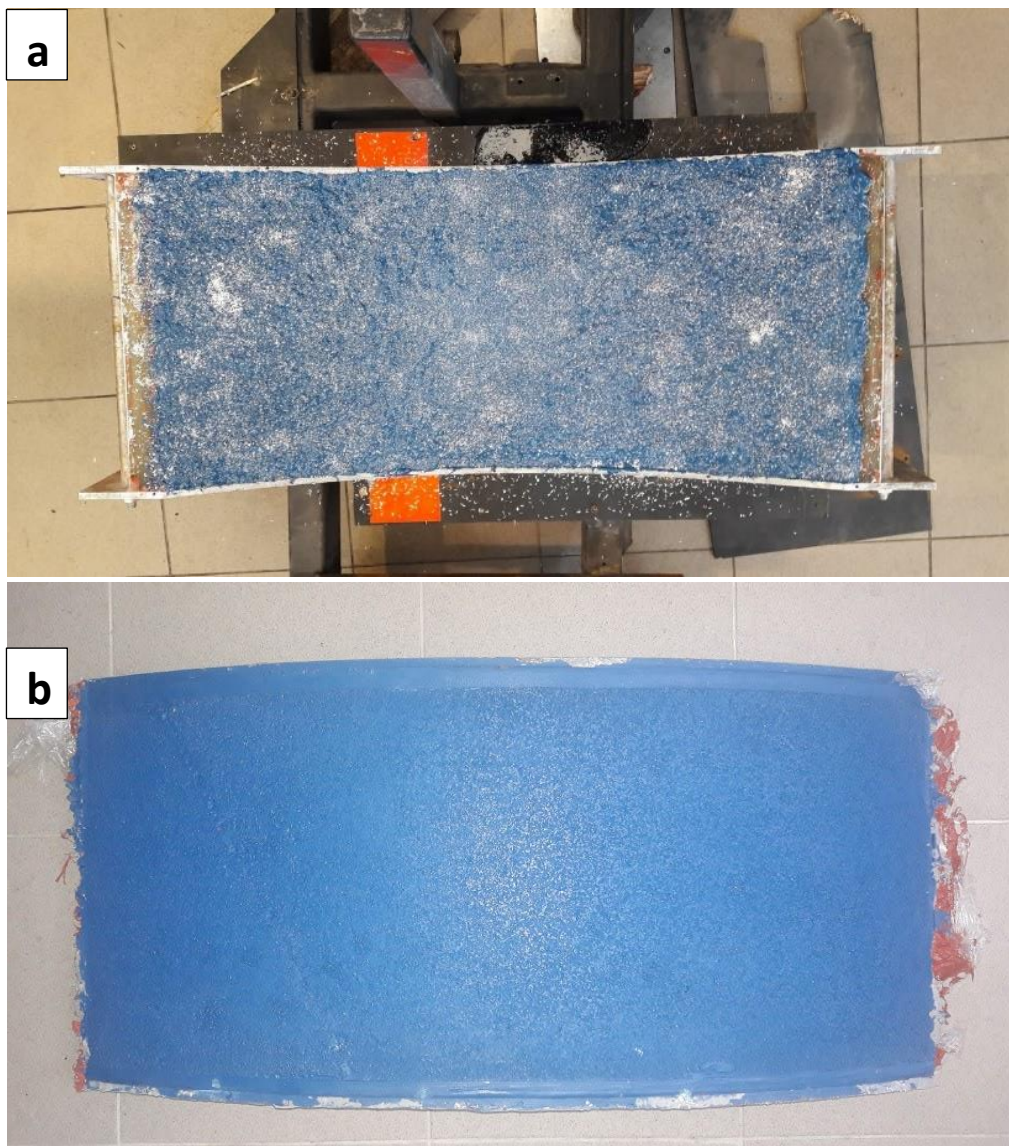
5 - wyrównawcza warstwa żywicy epoksydowej

6 - warstwa epoksydowej żywicy odlewniczej

7 - warstwa składająca się z mat z włókna szklanego zatopionego w żywicy epoksydowej



Rysunek 43. Proces tworzenia warstwy elastycznej stanowiącej negatywowe odwzorowanie nawierzchni drogowej



Rysunek 44. Wierzchnia warstwa repliki składająca się z żelkotu wymieszanego z drobno pociętym włóknem szklanym (a); gotowa replika (b)

Stanowisko posiada zespół prowadnic umożliwiających przesuwanie badanego koła w kierunku poprzecznym, jak i w kierunku badanej nawierzchni. Bęben napędzany jest silnikiem trójfazowym poprzez przekładnię pasową. Za regulację obrotów bębna odpowiada falownik. Do pomiaru prędkości badanego koła służy enkoder impulsowy. Pomiar momentu odbywa się poprzez wykorzystanie tensometrów tworzących układ mostkowy, który przez konwerter napięcie-częstotliwość jest połączony ze wzmacniaczem i nadajnikiem. Wirujący nadajnik optoelektryczny przy wykorzystaniu diody IRED przesyła sygnał do odbiornika optoelektronicznego. Sygnał w postaci napięcia przesyłany jest dalej do kasety pomiarowej, a ta następnie przekazuje informację do programu sterującego pracą bębna [2]. Siła oporu toczenia oraz współczynnik oporu toczenia wyznaczany jest na podstawie poniższej zależności [2]:

$$f_t = \frac{\frac{M - M_{SKIM}}{R_b} \cdot [1 + k(T - T_0)] \cdot \left(1 + \frac{r}{R_b}\right)}{N} \quad (2.4)$$

gdzie:

- M – moment siły mierzony na wale bębna maszyny bieżnej [Nm]
- M_{SKIM} – moment siły oporów własnych maszyny bieżnej [Nm]
- R_b – promień bębna maszyny bieżnej [m]
- r – promień badanego koła [m]
- k – współczynnik empiryczny
- T – temperatura otoczenia podczas badań oporu toczenia [°C]
- T_0 – temperatura odniesienia 25°C
- N – siła normalna do powierzchni bębna [N]

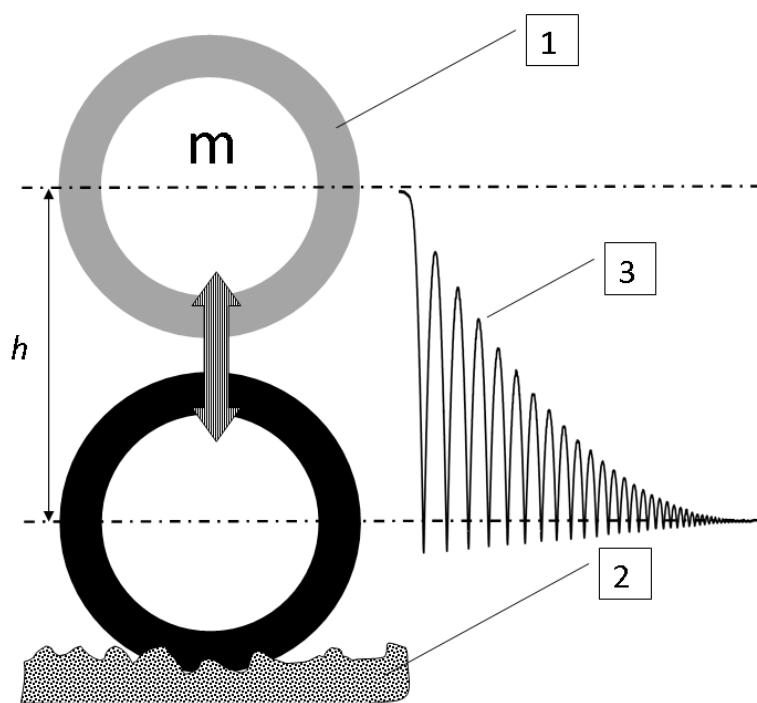
3 METODYKA BADAŃ

3.1 Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności

3.1.1 Opis metody badawczej

Metoda zaproponowana w ramach niniejszej pracy doktorskiej oparta jest na pośrednim pomiarze strat energetycznych, występujących w trakcie cyklicznego dociskania opony do próbki nawierzchni, wymuszonego swobodnym spadaniem. Powoduje to oscylacje układu zawierającego masę, sprężystość i tłumienie. Zastąpienie ruchu obrotowego koła przez ruch posuwisty albo wahliwy znacznie upraszcza budowę urządzenia i systemu pomiarowego. Umożliwia to wykorzystanie do badań nawet niewielkich próbek nawierzchni drogowych, łatwych do wykonania w warunkach laboratoryjnych. Podczas oscylacji rejestrowany jest przebieg amplitudy drgań, który następnie jest analizowany poprzez obliczenie pola powierzchni pomiędzy obwiedniami górną i dolną amplitudy drgań.

Odpowiednie obciążenie opony masą bezwładną i regulacja wysokości zrzucania umożliwiają uzyskanie nacisków w śladzie styku adekwatnych do tych, jakie występują podczas normalnej eksploatacji opony. Metoda zapewnia bardzo zbliżone do rzeczywistych warunki współpracy z nawierzchnią (odkształcenia struktury opony i elementów bieżnika, dynamiczne naciski). Zasada pomiaru została przedstawiona na schemacie poniżej (Rysunek 45).



Rysunek 45. Schemat przedstawiający ideę działania metody oscylacyjnej

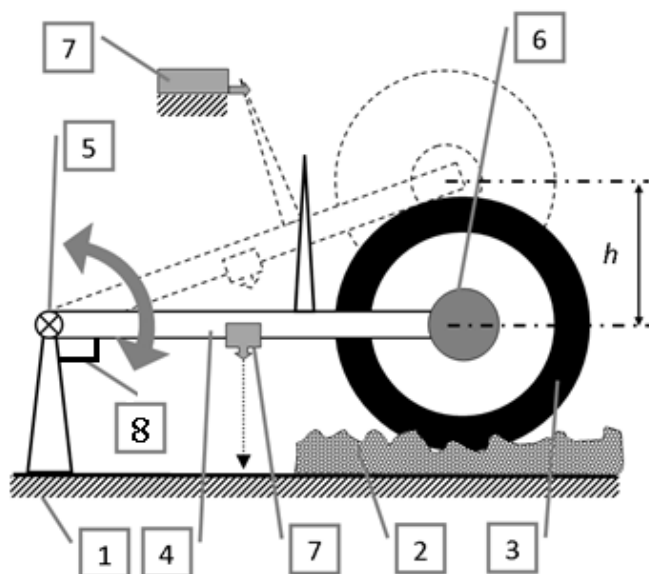
Badane koło o masie m (1) zawieszono jest na wysokości h w stosunku do próbki nawierzchni (2). Po zwolnieniu zaczepu koło opada na próbkę nawierzchni i wielokrotnie się od niej odbija. W trakcie oscylacji układ pomiarowy rejestruje położenie środka koła w stosunku do pozycji jaką przyjmuje koło w położeniu statycznym. Zmniejszanie się amplitudy drgań wynika ze strat energetycznych jakie występują w oponie i nawierzchni. W celu wyznaczenia warunków pomiarowych dających najlepszą korelację z metodą bębnową dla proponowanej metody, wykonano serię próbnych zrzutów mających na celu wyznaczenie wpływu:

- obciążenia
- ciśnienia pompowania badanej opony
- temperatury otoczenia

Metoda oraz urządzenie pomiarowe zostały objęte prawem wyłącznym nr 229187 [31].

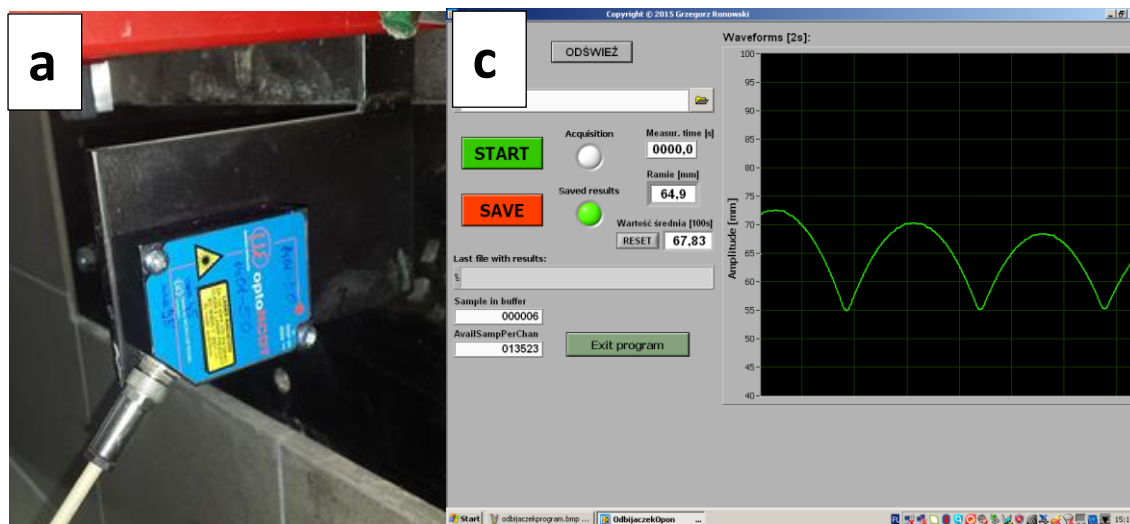
3.1.2 Stanowisko badawcze

Schemat urządzenia zbudowanego w ramach realizacji pracy doktorskiej umożliwiającego prowadzenie badań w oparciu o opisaną wcześniej metodę przedstawiono poniżej (Rysunek 46). Na sztywnej i ciężkiej podstawie (1) zamocowana jest próbka badanej nawierzchni drogowej (2), na której w położeniu spoczynkowym oparte jest badane koło (3), te zaś prowadzone jest za pomocą wahacza (4) mającego poziomą oś obrotu (5). Koło dociążone masą bezwładną (6), która jest tak dobrana, aby po zrzuceniu koła z wysokości h dynamiczne ugięcie opony odpowiadało ugięciu opony występującemu podczas toczenia koła w pojeździe. Elektromagnes (7) umożliwia utrzymanie koła w pozycji podniesionej, a następnie gwałtowne upuszczenie go na próbkę nawierzchni. Oscylacje układu od chwili spuszczenia koła do jego zatrzymania rejestrowane są przez laserowy czujnik położenia (8). Rzeczywisty wygląd urządzenia przedstawiono na Rysunek 47 i Rysunek 48.



Rysunek 46. Schemat urządzenia do pomiaru oporu toczenia metodą oscylacyjną

W skład aparatury pomiarowej wchodzi wcześniej wspomniany laserowy czujnik odległości, model ILD 1401-50 firmy Micro-Epsilon (Rysunek 47a). Czujnik ten opiera się na półprzewodnikowym laserze o długości fali 670 nm. Działa w trybie impulsowym o częstotliwości próbkowania 1 kHz. Kolejnym elementem zestawu pomiarowego jest kasetka pomiarowa firmy National Instruments model NI USB-6216 BNC (Rysunek 47b).



Rysunek 47. Laserowy czujnik położenia ILD 1401-50 przymocowany do stanowiska (a); kasetka pomiarowa NI USB-6216 BNC wraz z komputerem obsługującym program rejestrujący przebieg odbicia badanej opony (b); zrzut z ekranu komputera przedstawiający interfejs programu (program napisany przez dr hab. inż. Grzegorza Ronowskiego prof. nadzw. PG)(c)

Zmiana położenia ramienia mierzona przez czujnik laserowy interpretowana jest przez program o nazwie roboczej „Odbijak”. Jest to program napisany za pomocą LabVIEW w graficznym języku programowania „G”. Tworzy funkcję wysokości odbicia opony w czasie, przedstawiając ją w formie wykresu (Rysunek 47c).



Rysunek 48. Widok urządzenia do wykonywania pomiarów metodą oscylacyjną

Wstępną wysokość zrzutu oraz obciążenie badanej opony wyznaczono posługując się poniższymi założeniami.

W laboratoryjnych i drogowych metodach badania oporu tocznia, obciążenie opony osobowej mieści się w zakresie od 2000 N do ponad 9000 N w zależności od zastosowanych warunków pomiarowych. W proponowanej metodzie oscylacyjnej siły uderzenia opony o nawierzchnię podczas trwania oscylacji powinny mieścić się właśnie w tym zakresie.

Siłę pierwszego uderzenia opony o badaną nawierzchnię wyznaczono z zależności:

$$F = ma \quad (2.5)$$

Gdzie:

F – siła uderzenia opony o nawierzchnię [N]

m – masa badanego koła wraz z masą bezwładną [kg]

a – wartość opóźnienia w czasie między pierwszym zetknięciem opony z nawierzchnią, a końcowym ugięciem [m/s]

Średnie opóźnienie wyznaczamy z zależności:

$$a = \frac{V_p - V_k}{t_z} \quad (2.6)$$

Gdzie:

V_p - prędkość badanego koła w momencie pierwszego kontaktu z nawierzchnią [m/s]

V_k - prędkość badanego koła w momencie pełnego ugięcia opony [m/s]

t_z – czas pomiędzy pierwszym kontaktem opony z nawierzchnią, a jej pełnym ugięciem [s]

Czas pomiędzy pierwszym kontaktem opony z nawierzchnią, a jej pełnym ugięciem jest wartością silnie zależną od ciśnienia wewnątrz opony, jej budowy, wymiarów, sztywności i tekstury badanej nawierzchni drogowej. Na potrzeby opisywanej metody czas ten został wyznaczony eksperymentalnie na podstawie kilkunastu zrzutów i wyniósł średnio $t_z = 0,023s$ – patrz Tab. 1.

Tabela 1. Czas trwania ugięcia wybranych opon

OPONA	CZAS TRWANIA UGIĘCIA
AAV4 APS4 52kg 150kPa	0,026
AAV4 stal 52kg 150kPa	0,025
SRTT APS4 52kg 150kPa	0,025
SRTT stal 52kg 150kPa	0,025
BLUEco APS4 52kg 150kPa	0,028
BLUEco stal 52kg 150kPa	0,027
AAV4 APS4 52kg 210kPa	0,023
AAV4 stal 52kg 210kPa	0,023
SRTT APS4 52kg 210kPa	0,023
SRTT stal 52kg 210kPa	0,023
BLUEco APS4 52kg 210kPa	0,024
BLUEco stal 52kg 210kPa	0,024
AAV4 APS4 52kg 270kPa	0,020
AAV4 stal 52kg 270kPa	0,021
SRTT APS4 52kg 270kPa	0,020
SRTT stal 52kg 270kPa	0,021
BLUEco APS4 52kg 270kPa	0,022
BLUEco stal 52kg 270kPa	0,022
ŚREDNIA	0,023
odchylenie standardowe	0,002

Przy założeniu wysokości zrzutu wynoszącej **0,5m** czas opadania jest równy:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,5m}{9,81 \frac{m}{s^2}}} = 0,319s \quad (2.7)$$

Prędkość koła w momencie uderzenia o nawierzchnię wynosi:

$$V_p = gt = 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,319s = 3,13 \frac{m}{s} \quad (2.8)$$

Opóźnienie wynosi:

$$a = \frac{V_p - V_k}{t_z} = \frac{3,13 \frac{m}{s} - 0 \frac{m}{s}}{0,023 s} = 136,1 \frac{m}{s^2} \quad (2.9)$$

Siła uderzenia opony o badaną nawierzchnię przy założonej masie **m=50kg** wynosi średnio (pierwsze uderzenie):

$$F = ma = 50kg \cdot 136,1 \frac{m}{s^2} = 6805 N \quad (2.10)$$

Wyznaczona powyżej wartość siły uderzenia opony o nawierzchnię mieści się w opisanym na początku zakresie. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki pomiarów

mających na celu określenie wartości obciążenia dających najlepszą korelację z metodą bębnową.

Częstotliwość odkształceń opony w trakcie oscylacji rośnie i mieści się przedziale od około 1Hz (początek pomiaru) do 15 Hz (koniec pomiaru). Powyższy przedział jest uzależniony, od ciśnienia pompowania opony, temperatury opony, badanej nawierzchni oraz obciążenia. Aby określić jakie prędkości jazdy odpowiadają opisywanemu przedziałowi częstotliwości posłużono się poniższymi zależnościami.

Jeżeli przyjmimy, że częstotliwość 1Hz oznacza to, że wybrany element opony odkształca się raz na 1 sekundę to w trakcie tego czasu opona przebędzie drogę równą jej obwodowi. Przy założeniu, że promień opony jest równy 30cm to droga wynosi:

$$s = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,3m \approx 1,9m \quad (2.11)$$

Stąd wynika, że prędkość toczenia się koła jest równa:

$$V = \frac{s}{t} = \frac{1,9m}{1s} = 1,9 \frac{m}{s} = 6,8 \frac{km}{h} \quad (2.12)$$

W przypadku częstotliwości równej 15Hz droga przebyta przez oponę jest równa:

$$s = 15 \cdot 2\pi r = 30 \cdot 3,14 \cdot 0,3m \approx 28,3m \quad (2.13)$$

Stąd wynika, że prędkość toczenia się koła jest równa:

$$V = \frac{s}{t} = \frac{28,3m}{1s} = 28,3 \frac{m}{s} = 101,9 \frac{km}{h} \quad (2.14)$$

Otrzymany powyżej zakres prędkości odpowiada prędkościom jazdy dla samochodów osobowych w przeciętnych warunkach eksploatacji. Dla dalszej weryfikacji metody bardzo ważne jest to, że powyższy przedział zawiera prędkość stosowaną w trakcie badań oporu toczenia opon na stanowiskach bębnowych (zgodnie z normą ISO 28580:2018 prędkość badania opon osobowych wynosi 80km/h) [5]

3.1.3 Badane opony

Do zweryfikowania metody oscylacyjnej wybrano grupę ośmiu opon o zróżnicowanej konstrukcji i przeznaczeniu. Znalazły się wśród nich opony zimowe, wielosezonowe, letnie, przeznaczone do samochodów z napędem elektrycznym i hybrydowym oraz referencyjne. W poniższej tabeli umieszczono ich specyfikację (Tabela 2):

Tabela 2. Zestawienie badanych opon

	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	UNIROYAL TIGER PAW M+S P225/60R16 730 240 2015 Opona referencyjna
	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	AVON AAV4 SUPERVAN AV4 195R14C 950/900 450 0912 Opona referencyjna
	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO 205/55R16 615 350 4315 Opona przeznaczona dla samochodów z napędem elektrycznym oraz hybrydowym

	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	MICHELIN ALPIN5 205/55R16 615 1116 Opona z bieżnikiem zimowym
	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	MICHELIN CrossClimate 205/55R16 670 0316 Opona z bieżnikiem wielosezonowym
	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	MICHELIN EnergySaver 205/55R16 670 0216 Opona z bieżnikiem letnim
materiał poufny	Producent Nazwa Rozmiar Nośność Maks. Ciśnienie Data produkcji	XXX xxx(prototyp I) 195/55R20 690 0816 Opona prototypowa (mieszanka gumowa I) Jest to jedna z dwóch opon prototypowych różniących się wyłącznie mieszanką gumową.

materiał poufny	Producent	XXX
	Nazwa	xxx (prototyp II)
	Rozmiar	195/55R20
	Nośność	690
	Maks. Ciśnienie	
	Data produkcji	0816
		Jest to jedna z dwóch opon prototypowych, różniących się wyłącznie mieszanką gumową.

3.1.4 Badane nawierzchnie drogowe

Do zweryfikowania metody oscylacyjnej użyto 14 próbek nawierzchni o różnej teksturze i sztywności (Tabela 3):

Tabela 3. Zestawienie badanych nawierzchni drogowych

	<p>Nawierzchnia stalowa</p> <p>Gładka nawierzchnia stalowa, standardowa do badań oporu toczenia.</p>
	<p>Nawierzchnia Safety Walk</p> <p>Nawierzchnia szorstka o głębokości nierówności 180 μm. Standardowa nawierzchnia do badania oporu toczenia.</p>



Nawierzchnia APS4

Nawierzchnia bardzo szorstka o podłożu poliuretanowym z walcowanym grysem o średnicy ziarna około 12 mm.



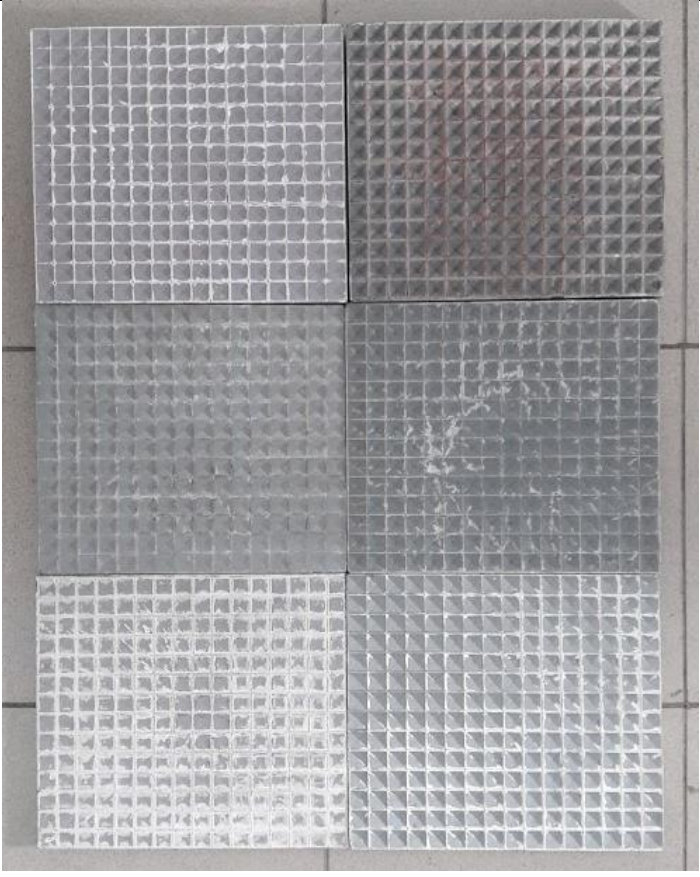
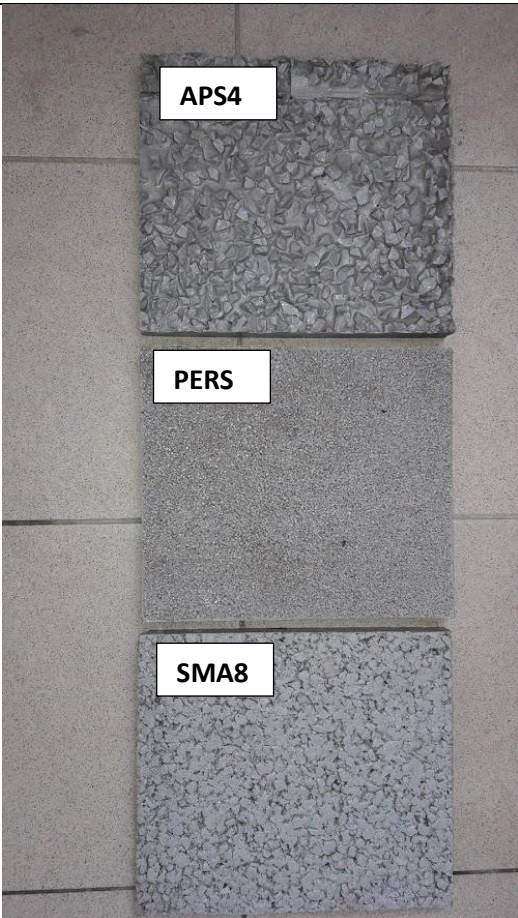
Nawierzchnia PERS

Nawierzchnia poroelastyczna, prototypowa, powstała z granulatu ze zużytych opon samochodowych oraz kruszywa mineralnego ze spoiwem poliuretanowym. Charakteryzuje się zdolnością do redukcji hałasu opon oraz posiada dobre właściwości samoczyszczące.



Nawierzchnia SMA8

Mieszanka mineralno-asfaltowa o nieciąglym uziarnieniu, z dużą zawartością gryków, z większą zawartością lepiszcza oraz włóknami celulozowymi.

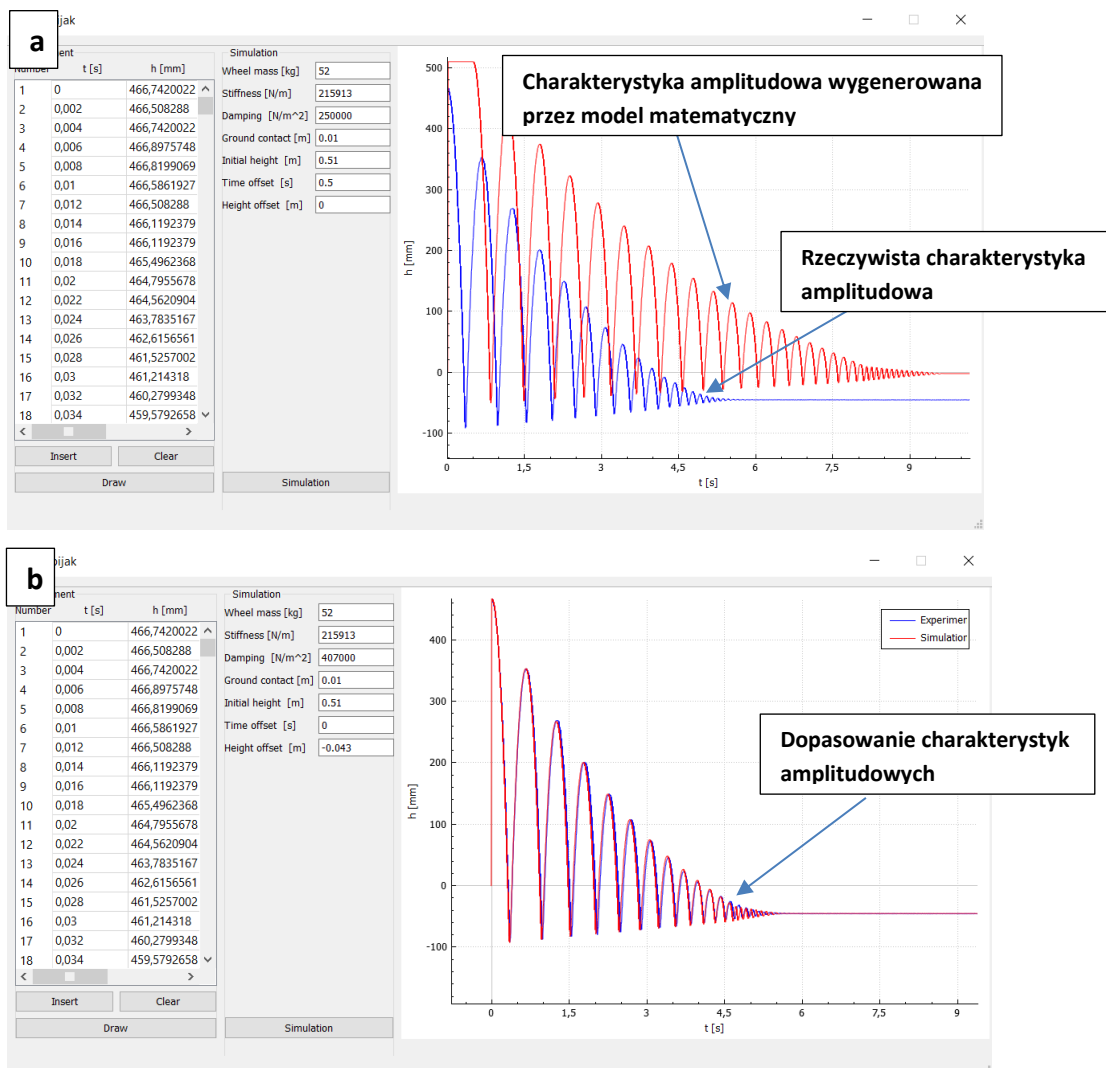
	<p>Nawierzchnie o zagłębieniu w kształcie ostrosłupa Nawierzchnie różniące się głębokością profilu (od 1 mm do 9 mm głębokości).</p>
	<p>Repliki nawierzchni APS4, PERS oraz SMA8 Repliki zostały wykonane z żywicy epoksydowej.</p>

3.1.5 Wybór metody służącej do analizy otrzymanych wyników

Otrzymane wyniki badań w postaci charakterystyk amplitudowych zostały zanalizowane za pomocą dwóch metod, które porównano ze sobą pod kątem korelacji z innymi metodami badania oporu toczenia.

a) Metoda nr 1

Pierwsza metoda oparta była na porównywaniu rzeczywistych przebiegów amplitudowych z przebiegami teoretycznymi, obliczonymi w oparciu o model matematyczny zawierający takie zmienne jak: masa, sztywność opony, współczynnik tłumienia drgań oraz wysokość zrzutu. Analiza polegała na jak najdokładniejszym dopasowaniu do siebie wcześniej wymienionych przebiegów (rzeczywistego oraz wygenerowanego przez model matematyczny) poprzez wprowadzanie kolejnych wartości współczynnika tłumienia drgań (wartości pozostałych zmiennych zostały ustalone przed analizą). Jako wynik badania przyjęto współczynnik tłumienia drgań, dla którego uzyskano najdokładniejsze dopasowanie (Rysunek 49).



Rysunek 49. Zrzut ekranu przedstawiający program służący do wyznaczania współczynnika tłumienia drgań (program napisany przez dr inż. Michała Mazura). a - charakterystyki amplitudowe przed dopasowaniem (niebieska przedstawia przebieg rzeczywisty, czerwona wygenerowany przez model matematyczny); b - charakterystyki amplitudowe po dopasowaniu

Model matematyczny oparty był o równanie: (3.1)

$$a = \begin{cases} \frac{1}{m}(-kx - c^4(h-x)^2 - g), & v > 0 \\ \frac{1}{m}(-kx + c^4(h-x)^2 - g), & v < 0 \\ \frac{1}{m}(-kx - g) \\ a = -g \end{cases}$$

Równanie opisujące ruch opony przed odbiciem

Równanie opisujące ruch opony po odbiciu

Równanie opisujące ruch opony w czasie pomiędzy pierwszym kontaktem z badaną nawierzchnią, a jej pełnym ugięciem

- Gdzie: m – masa [kg]
 k – sztywność opony [N/m]
 x – wychylenie ze stanu równowagi [m]
 h – wysokość zrzutu [m]
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s²]
 c^4 – współczynnik tłumienia drgań [N/m²]
 v – prędkość opadającego koła [m/s]

W modelu matematycznym za sztywność opony przyjęto jej statyczną sztywność promieniową, wyznaczaną jako zależność ugięcia promieniowego od siły pionowej. Pomiaru dokonano na maszynie bieżnej. W pierwszej kolejności mierzone było ugięcie badanej opony poprzez stopniowe zwiększanie obciążenia, aż do osiągnięcia obciążenia maksymalnego (przy stałym ciśnieniu). W drugiej części badania zmniejszano obciążenie, mierząc jednocześnie wzrost promienia opony. Następnie dokonano aproksymacji wszystkich otrzymanych punktów funkcją wielomianową drugiego rzędu, dzięki czemu uzyskano krzywą środkową (na Rysunek 50 linia w kolorze czarnym). W dalszej kolejności wyznaczono obciążenie nominalne F_{nom} będące 75% obciążenia maksymalnego danej opony, które zrzutowano na wcześniej wspomnianą krzywą środkową, otrzymując punkt **A** (F_{nom} , f). W punkcie **A** wystawiono styczną do krzywej środkowej, która przecina oś odciętych w punkcie f . Sztywność obliczono zgodnie ze wzorem:

$$C_{statA} = \frac{F_{nom}}{(f-f')} \quad \left[\frac{N}{m} \right] \quad (3.2)$$

Gdzie:

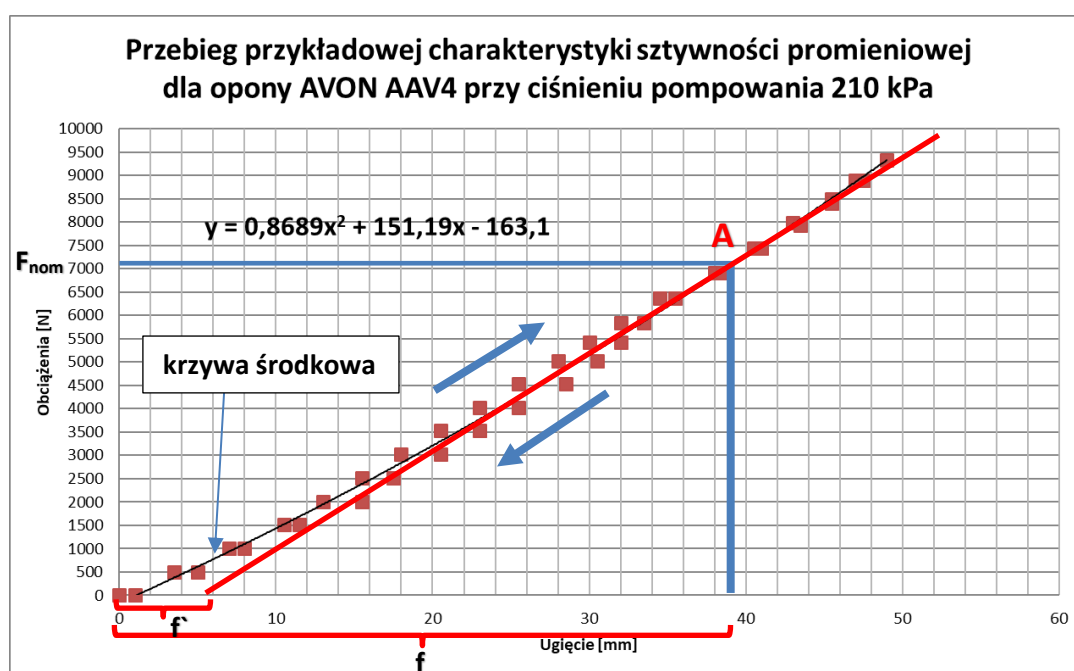
C_{statA} – sztywność promieniowa opony [N/m]

F_{nom} – obciążenie nominalne [N]

f – ugięcie opony przy obciążeniu nominalnym [mm]

f' – ugięcie opony wyznaczone przez styczną do krzywej środkowej (Rysunek 50) [mm]

Poniżej przedstawiono sposób obliczania sztywności promieniowej na przykładzie opony AVON AAV4 przy ciśnieniu pompowania 210 kPa (Rysunek 50).



Rysunek 50. Przebieg przykładowej charakterystyki sztywności promieniowej dla opony AVON AAV4 przy ciśnieniu pompowania 210kPa; F_{nom} – 75% obciążenia maksymalnego, f – ugięcie opony

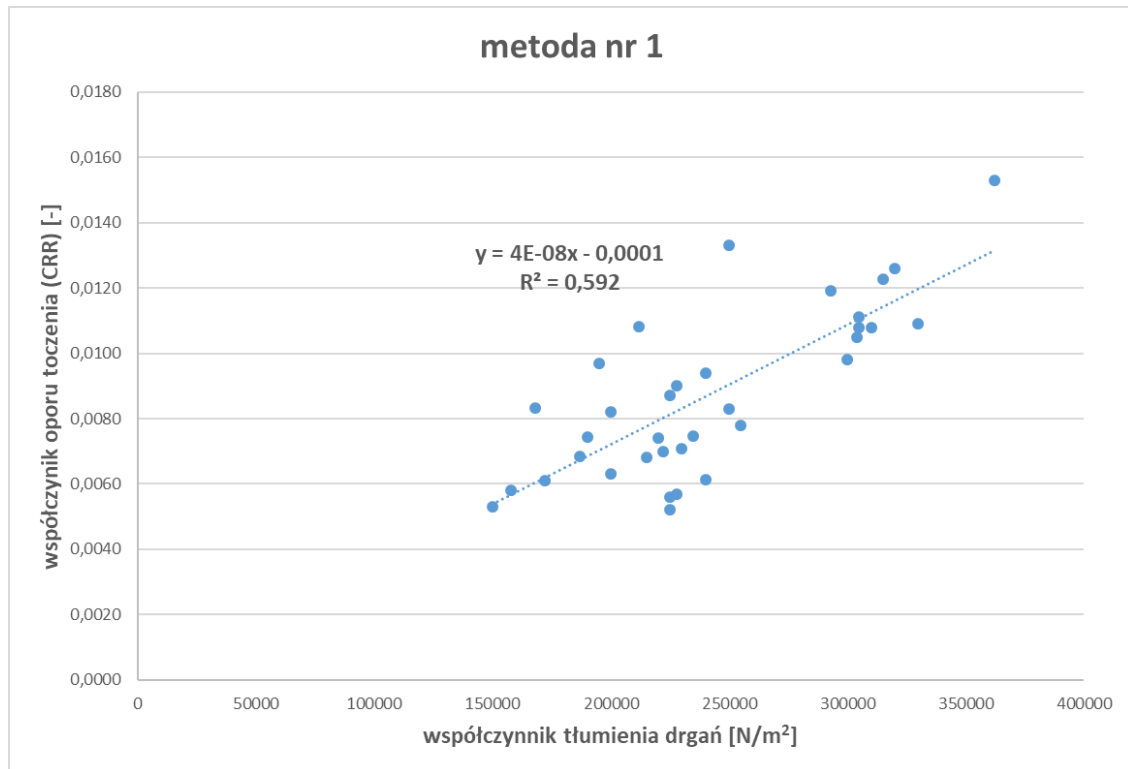
W celu weryfikacji metody wykonano kilka serii pomiarowych wybranych opon, które zostały przedstawione poniżej. Pomiary zostały wykonane na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8, Safety Walk oraz stalowej, przy ciśnieniu pompowania 210 kPa oraz masie koła z obciążnikiem wynoszącej 52 kg.

Badane opony:

- Opona CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO
- Opona Uniroyal TigerPaw M+S SRTT
- Opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4
- Opona Michelin Alpin5

- Opona Michelin CrossClimate
- Opona Michelin EnergySaver
- Opony prototypowe (2 sztuki, różniące się mieszanką gumową)

Na rysunku przedstawiono zestawienie otrzymanych wyników obliczonych wyżej opisaną metodą, skorelowanych z wynikami otrzymanymi przy pomocy metody bębnowej (w analogicznych warunkach badań) (Rysunek 51).



Rysunek 51. Korelacja między wynikami uzyskanymi przy pomocy metody nr 1

Jako kryterium oceny metody posłużył współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Korelacja pomiędzy wynikami otrzymanymi metodą nr 1, a wynikami uzyskanymi za pomocą metody bębnowej wyniosła 0,77 co wskazuje na dość silną zależność między obiema metodami. Współczynnik determinacji R^2 wyniósł w tym przypadku 0,59 co świadczy o słabym dopasowaniu do zależności liniowej.

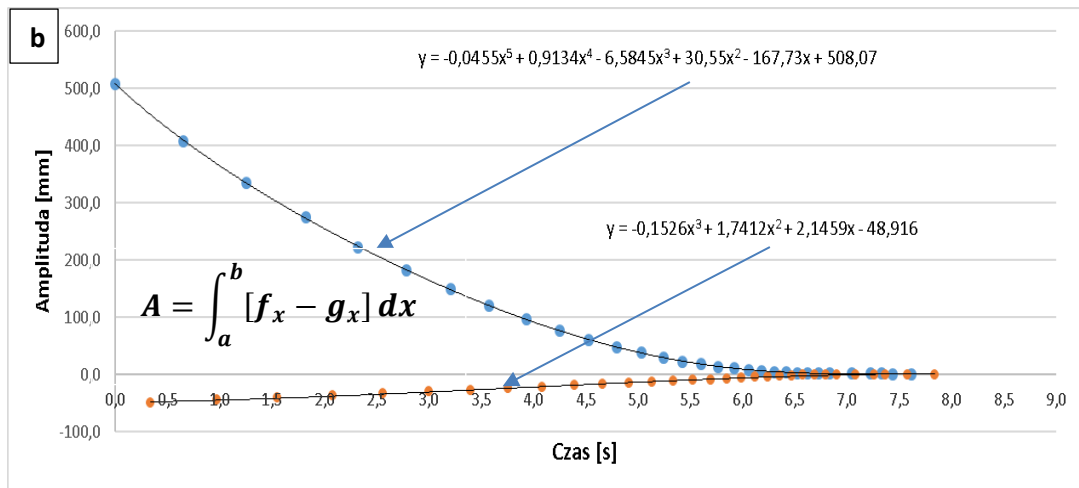
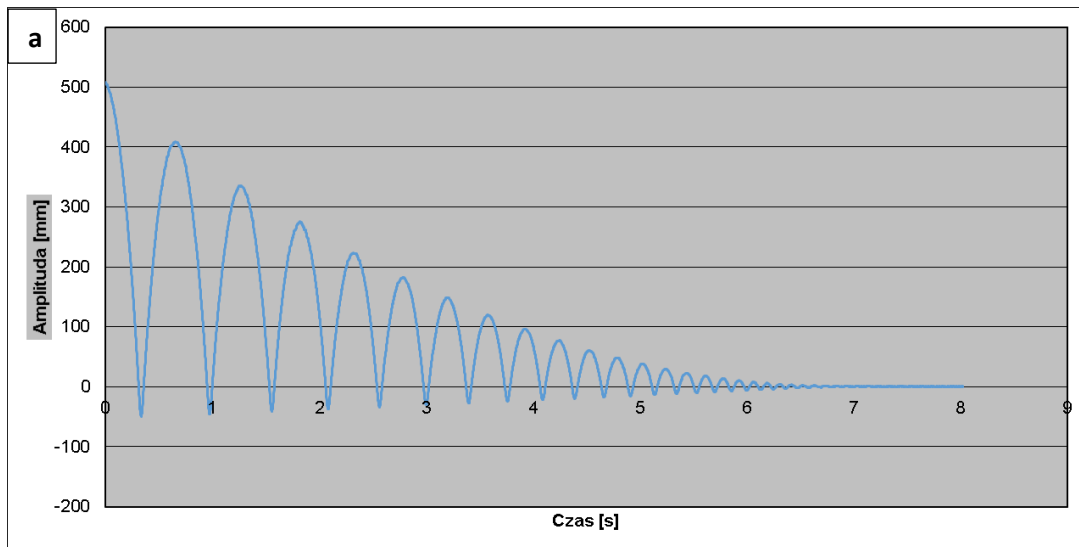
b) Metoda nr 2

Metoda ta polegała na wyznaczeniu obwiedni górnych i dolnych otrzymanej w wyniku zrzutu opony charakterystyki amplitudowej, a następnie obliczeniu pola obszaru między nimi. Obwiednie w większości wypadków były funkcjami wielomianowymi 2-6 stopnia (Rysunek 52b), które wyznaczono poprzez aproksymacje funkcji przechodzących przez lokalne maksima i minima charakterystyki amplitudowej. Pole obszaru między krzywymi wyznaczono za pomocą całki oznaczonej:



$$A = \int_a^b [f_x - g_x] dx \quad (3.3)$$

Gdzie: A – pole obszaru pomiędzy obwiedniami
 a – początek pomiaru, moment opuszczenia koła
 b – wygaszenie oscylacji
 f_x – obwiednia górna
 g_x – obwiednia dolna



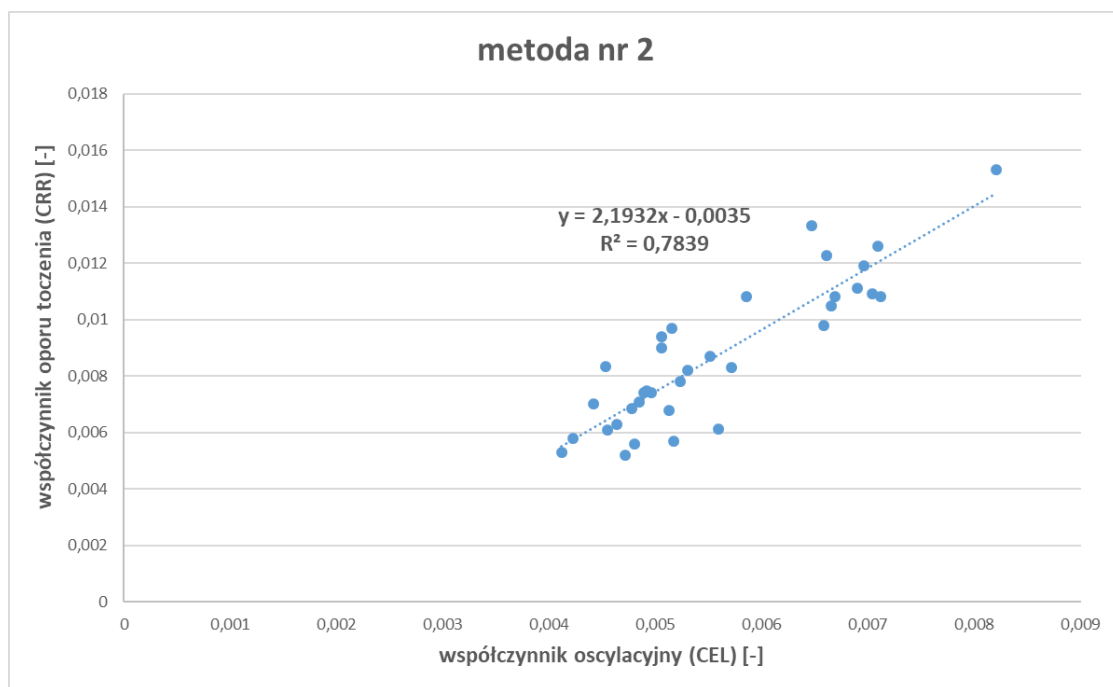
Rysunek 52. Przykład otrzymanej charakterystyki amplitudowej (a); wyznaczone obwiednie (b)

Następnie wyniki otrzymane przy pomocy wyżej wspomnianej metody, w celu określenia korelacji ze współczynnikiem oporu toczenia, zostały porównane z tymi otrzymanymi na maszynach bieżnych. W celu łatwiejszej analizy wyniki przedstawiono w postaci x^{-1} , gdzie x jest polem pomiędzy obwiedniami otrzymanej charakterystyki amplitudowej (im większa wartość pola, a co za tym idzie niższa wartość tłumienia drgań, tym otrzymany współczynnik ma niższą wartość, co ułatwia jego korelację ze współczynnikiem oporu toczenia).

$$C_{EL} = \frac{1}{A} = \frac{1}{\int_a^b [f_x - g_x] dx} \quad (3.4)$$

C_{EL} – zaproponowany przez autora współczynnik metody oscylacyjnej (Coefficient of Energy Losses)

Poniżej przedstawiono zestawienie otrzymanych wyników obliczonych wyżej opisaną metodą, skorelowanych z wynikami otrzymanymi przy pomocy metody bębnowej (analogiczne warunki badań jak w metodzie nr 1) (Rysunek 53).



Rysunek 53. Korelacja między wynikami uzyskanymi przy pomocy metody nr 2

Współczynnik korelacji liniowej Pearsona pomiędzy wynikami otrzymanymi metodą nr 2, a tymi uzyskanymi za pomocą metody bębnowej wyniósł **0,89** co wskazuje na dość silną zależność między obiema metodami (oraz wyższą niż w przypadku metody nr 1). Współczynnik determinacji R^2 wyniósł **0,78**, co świadczy o jedynie zadowalającym dopasowaniu do zależności liniowej.

Do dalszej weryfikacji wybrano metodę nr 2. Za wyborem tym przemawia fakt, iż metoda jest obciążona mniejszym błędem oraz uzyskano dla niej silniejszą zależność z metodą bębnową. Punkty służące do ustalenia przebiegu obwiedni górnej i dolnej są jednoznaczne. To samo tyczy się punktu przecięcia obu obwiedni, będącego dolną granicą całkowania w trakcie wyznaczania pola powierzchni (w odróżnieniu od metody nr 1, gdzie dopasowanie charakterystyk wykonywane jest poprzez ocenę wizualną pokrycia obu krzywych, a wykres uzyskany za pomocą modelu matematycznego nie jest idealnym

odzwierciedleniem uzyskanego w rzeczywistości przebiegu odbicia opony). Kolejną wadą metody nr 1 jest konieczność wyznaczenia sztywności badanej opony, co znacząco wydłuża czas badania i zwiększa koszty, co jest sprzeczne ze wstępnymi założeniami o prostocie i szybkości pomiaru.

4 WERYFIKACJA METODY OSCYLACYJNEJ I ANALIZA WYNIKÓW

4.1 Powtarzalność uzyskanych wyników

Przed przystąpieniem do analizy wpływu czynników eksploatacyjnych (np. ciśnienia pompowania opony), konstrukcyjnych (składu mieszanki gumowej), czy też wpływu nawierzchni drogowej (jej sztywności i głębokości profilu) na wyniki otrzymywane przy pomocy proponowanej metody oscylacyjnej, określono rozproszenie uzyskiwanych współczynników metody oscylacyjnej C_{EL} . Jako kryterium porównawczym posłużono się współczynnikiem zmienności, który opisuje miarę zróżnicowania otrzymanego zbioru wyników:

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Gdzie:

s – odchylenie standardowe

\bar{X} – średnia arytmetyczna

W tym celu posłużono się seriami pomiarowymi otrzymanymi podczas:

- Badania różnic w otrzymanych wartościach współczynnika C_{EL} na próbkach nawierzchni o identycznej teksturze, ale innej sztywności (porównanie oryginalnej nawierzchni z jej repliką wykonaną z żywicy epoksydowej).
- Badania wpływu głębokości profilu nawierzchni na wartość współczynnika C_{EL} . Pomiaru wykonane były na nawierzchniach z zagłębieniami w kształcie ostrosłupa, które różniły się głębokością (od 1mm do 9mm).

Wyżej wymienione pomiary zostały omówione szerzej w rozdziale 4.4 „Analiza wpływu tekstury nawierzchni oraz jej sztywności”. Tutaj posłużono się nimi jedynie w celu określenia powtarzalności uzyskiwanych wyników.

Serie pomiarowe wykonano w różnych dniach (serie 1. i 2. pierwszego, serie 3. i 4. drugiego dnia). Badaniu poddano trzy opony różniące się wartościami współczynnika oporu toczenia:

- AVON AAV4 SUPERVAN AV4 o wysokiej wartości współczynnika oporu toczenia.
- CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO o niskiej wartości współczynnika oporu toczenia.
- Uniroyal Tiger Paw M+S SRTT o pośredniej wartości współczynnika toczenia.

Ciśnienie pompowania opon we wszystkich przypadkach wynosiło 210 kPa, wysokość zrzutu 50cm, a masa koła wraz z obciążeniem 52kg. Temperatura boku opony mieściła się w przedziale 20°C - 23°C.

1) AVON AAV4 SUPERVAN AV4

W przypadku serii pomiarowych uzyskanych podczas badania wpływu sztywności próbki nawierzchni drogowej (porównano wyniki uzyskane na nawierzchniach o identycznej teksturze, które różniły się materiałem z jakiego zostały wykonane), współczynniki zmienności mieściły się w zakresie 1,33%-3,18 % (

Tabela 4). Świadczy to o bardzo niskiej zmienności otrzymywanych wyników. We wszystkich przypadkach wyższe wartości współczynnika zmienności uzyskano dla replik nawierzchni. Dodatkowo zauważyć można wpływ temperatury opony na zbieżność otrzymanych rezultatów badań. Im temperatury opony są do siebie bardziej zbliżone (seria 1 i 2; seria 3 i 4), tym zbieżność uzyskiwanych wyników jest wyższa.

Tabela 4. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 oraz ich replikach dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4; (r) - replika nawierzchni wykonana z żywicy

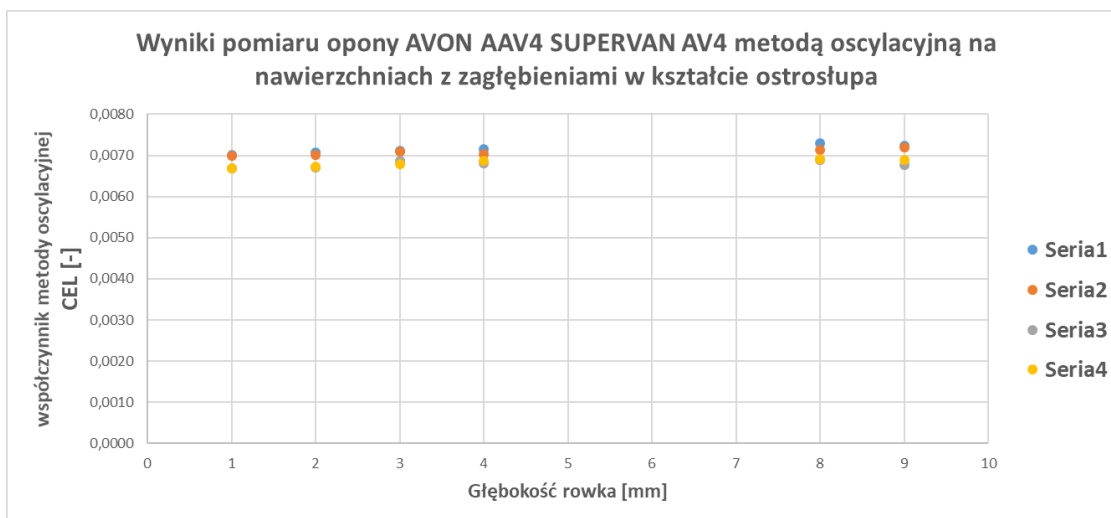
AVON AAV4 SUPERVAN AV4							temperatura boku opony
nawierzchnia	PERS(r)	PERS	APS4 (r)	APS4	SMA8 (r)	SMA8	
seria1	0,0069	0,0071	0,0082	0,0085	0,0071	0,0071	20°C
seria2	0,0069	0,0072	0,0082	0,0086	0,0072	0,0069	20°C
seria3	0,0066	0,0070	0,0077	0,0081	0,0068	0,0073	22°C
seria4	0,0066	0,0071	0,0078	0,0082	0,0067	0,0072	22°C
odchylenie standardowe	0,00016	0,00009	0,00025	0,00018	0,00022	0,00014	
średnia arytmetyczna	0,0068	0,0071	0,0080	0,0083	0,0070	0,0071	
współczynnik zmienności [%]	2,38	1,33	3,18	2,17	3,18	1,94	

Wartości współczynnika zmienności dla wyników badań wpływu głębokości profilu nawierzchni na wartość współczynnika C_{EL} zawierają się w przedziale 1,94%-2,74%, co stanowi węższy przedział niż w poprzednim przypadku (

Tabela 5, Rysunek 54). Mogło to wynikać z faktu, iż użyte próbki nawierzchni były do siebie bardziej zbliżone pod względem tekstury. Tutaj również widoczny jest wpływ temperatury opony na zmienność uzyskiwanych wyników. Im temperatury są do siebie bardziej zbliżone, tym wyniki mniej się od siebie różnią (seria 1 i 2; seria 3 i 4).

Tabela 5. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach różniących się głębokością profilu nawierzchni dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4

AVON AAV4 SUPERVAN AV4							temperatura boku opony
głębokość [mm]	1	2	3	4	8	9	
seria 1	0,0070	0,0071	0,0071	0,0072	0,0073	0,0072	20°C
seria 2	0,0070	0,0070	0,0071	0,0070	0,0071	0,0072	20°C
seria3	0,0067	0,0067	0,0069	0,0068	0,0069	0,0068	22°C
seria4	0,0067	0,0067	0,0068	0,0069	0,0069	0,0069	22°C
Odchylenie standardowe	0,00016	0,00017	0,00014	0,00014	0,00016	0,00019	
Średnia arytmetyczna	0,0068	0,0069	0,0070	0,0070	0,0071	0,0070	
Wsp. zmienności [%]	2,29	2,40	1,94	2,00	2,33	2,74	



Rysunek 54. Wpływ zagłębienia profilu nawierzchni na wyniki otrzymane dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4 przy pomocy metody oscylacyjnej

2) CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO

W Tabeli 6 przedstawiono wyniki porównania oryginalnych nawierzchni z ich replikami. Współczynniki zmienności mieszczą się w przedziale 0,63%-2,49%, lecz nie da się określić dla których typów nawierzchni przyjmują wyższą wartość. W tym przypadku temperatury boku opony w poszczególnych seriach pomiarowych były do siebie bardziej zbliżone (różnica 1°C), co miało wpływ na niższe wartości współczynników zmienności.

Tabela 6. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 oraz ich replikach dla opony ONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO; (r) - replika nawierzchni odlana z żywicy

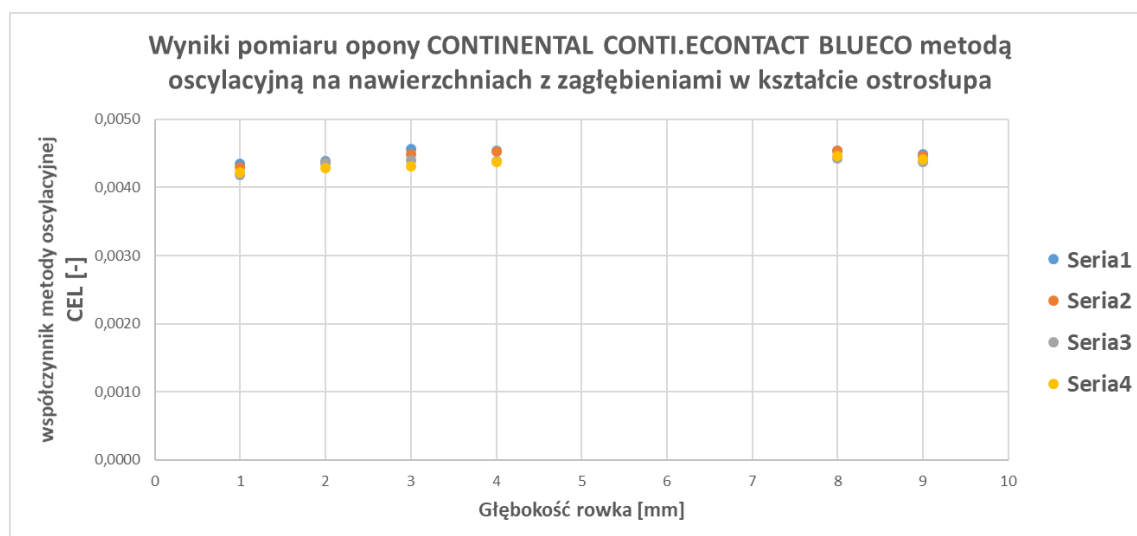
CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO							temperatura boku opony
nawierzchnia	PERS(r)	PERS	APS4 (r)	APS4	SMA8 (r)	SMA8	
seria 1	0,0043	0,0043	0,0055	0,0058	0,0044	0,0045	22°C
seria 2	0,0043	0,0043	0,0057	0,0055	0,0045	0,0045	22°C
seria3	0,0042	0,0044	0,0054	0,0055	0,0045	0,0045	23°C
seria4	0,0044	0,0042	0,0056	0,0054	0,0046	0,0046	23°C
odchylenie standardowe	0,00008	0,00005	0,00011	0,00014	0,00007	0,00003	
średnia arytmetyczna	0,0043	0,0043	0,0056	0,0056	0,0045	0,0045	
współczynnik zmienności [%]	1,78	1,05	1,96	2,49	1,47	0,63	

Wyniki uzyskane dla badania wpływu głębokości profilu nawierzchni przedstawione w Tabeli 7 oraz Rysunku 55, również charakteryzują się mniejszymi wartościami współczynnika zmienności niż miało to miejsce w przypadku poprzedniej opony (przedział 0,84%-2,16%).



Tabela 7. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach różniących się głębokością profilu nawierzchni dla opony CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO

CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO							temperatura boku opony
głębokość [mm]	1	2	3	4	8	9	
seria 1	0,0043	0,0044	0,0046	0,0045	0,0045	0,0045	22°C
seria 2	0,0043	0,0044	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	22°C
seria3	0,0042	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	23°C
seria4	0,0042	0,0043	0,0043	0,0044	0,0045	0,0044	23°C
odchylenie standardowe	0,00006	0,00004	0,00010	0,00007	0,00005	0,00004	
średnia arytmetyczna	0,0043	0,0043	0,0044	0,0045	0,0045	0,0044	
współczynnik zmienności [%]	1,48	0,84	2,16	1,65	1,13	0,99	



Rysunek 55. Wpływ zagłębienia profilu nawierzchni na wyniki otrzymane dla opony Continental Conti.Econtact BLUECO przy pomocy metody oscylacyjnej

3) Uniroyal Tiger Paw M+S SRTT

Wyniki uzyskane dla ostatniej z przebadanych opon UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT przedstawiono w Tabeli 8, Tabeli 9 oraz na Rysunek 56. W tym przypadku wartości współczynników zmienności były najniższe spośród wszystkich 3 opon i mieściły się w zakresie 0,42%-1,93 %, na co mogły mieć wpływ niewielkie różnice temperatury boku opony (1°C).

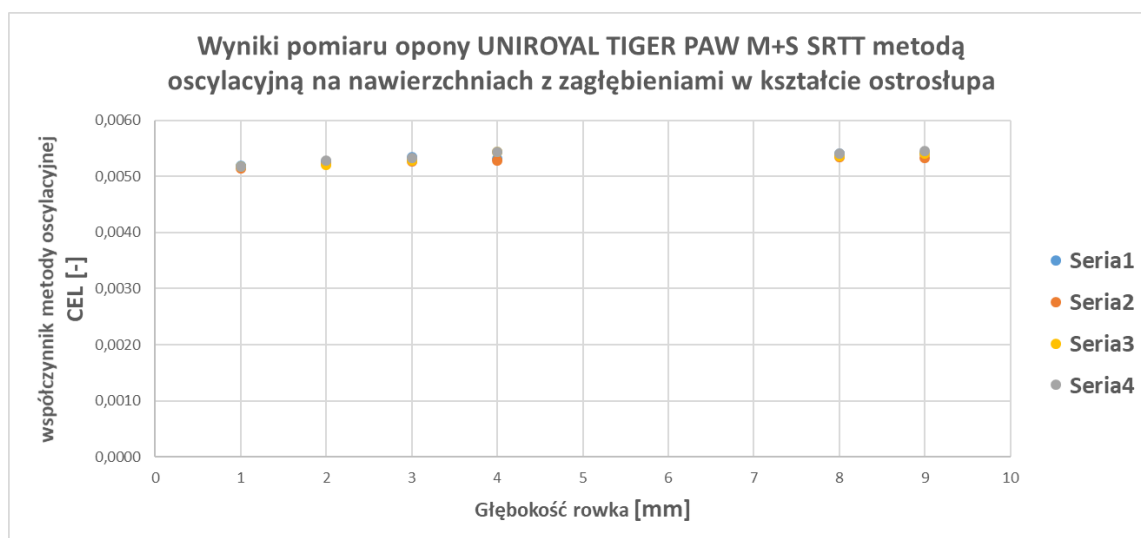


Tabela 8. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 oraz ich replikach dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT; (r) - replika nawierzchni wykonana z żywicy

UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT							temperatura boku opony
nawierzchnia	PERS(r)	PERS	APS4 (r)	APS4	SMA8 (r)	SMA8	
seria 1	0,0052	0,0051	0,0066	0,0066	0,0055	0,0055	22C
seria 2	0,0050	0,0052	0,0066	0,0065	0,0054	0,0054	22C
seria3	0,0052	0,0053	0,0065	0,0065	0,0054	0,0055	21C
seria4	0,0053	0,0051	0,0066	0,0066	0,0057	0,0055	21C
odchylenie standardowe	0,00010	0,00007	0,00004	0,00005	0,00010	0,00006	
średnia arytmetyczna	0,0052	0,0052	0,0066	0,0066	0,0055	0,0055	
współczynnik zmienności [%]	1,93	1,35	0,56	0,75	1,86	1,12	

Tabela 9. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach różniących się głębokością profilu nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT

UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT							temperatura boku opony
głębokość [mm]	1	2	3	4	8	9	
seria 1	0,0052	0,0053	0,0053	0,0053	0,0054	0,0054	22C
seria 2	0,0051	0,0052	0,0053	0,0053	0,0053	0,0053	22C
seria3	0,0052	0,0052	0,0053	0,0054	0,0054	0,0054	21C
seria4	0,0052	0,0053	0,0053	0,0054	0,0054	0,0055	21C
odchylenie standardowe	0,00002	0,00003	0,00003	0,00007	0,00002	0,00004	
średnia arytmetyczna	0,0052	0,0052	0,0053	0,0054	0,0054	0,0054	
współczynnik zmienności [%]	0,3627	0,6548	0,6234	1,3362	0,4550	0,8086	



Rysunek 56. Wpływ zagłębienia profilu nawierzchni na wyniki otrzymane dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT przy pomocy metody oscylacyjnej

Proponowana metoda odznacza się niską wartością współczynnika zmienności, maksymalna wartość jaką uzyskano wyniosła 2,74%. Wydaje się, że główny wpływ na rozrzut wyników ma temperatura opony, co zostało dokładniej zweryfikowane w dalszej części pracy

(rozd. 4.5). Wyniki przedstawione w tym rozdziale wskazują również jednoznacznie, że głębokość profilu („rowków”) ma marginalny wpływ na straty energetyczne co zdaniem autora wskazuje na decydujący wpływ envelopingu. Opona współpracuje jedynie z wierzchołkami nierówności i „nie czuje” głębokości rowków.

4.2 Porównanie wyników otrzymanych przy różnych ciśnieniach pompowania

W celu wyznaczenia wpływu ciśnienia pompowania opony na wartość współczynnika metody oscylacyjnej (C_{EL}) wykonano pomiary dla trzech opon posiadających względem siebie skrajne wartości współczynnika oporu toczenia (C_{RR}):

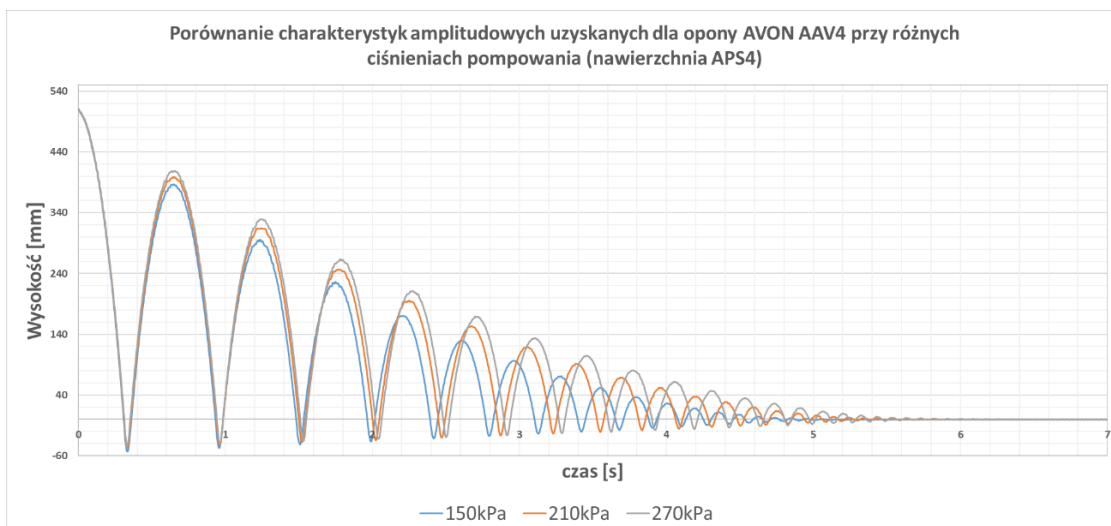
- AVON AAV4 o wysokiej wartości C_{RR} .
- UNIROYAL TIGER PAW M+S o pośredniej wartości C_{RR} .
- Continental BLUECO o bardzo niskiej wartości C_{RR} .

Badanie przeprowadzono na nawierzchniach różniących się teksturą i parametrem MPD oznaczonymi jako: APS4, PERS, SMA8, Safety Walk oraz na nawierzchni stalowej. Zastosowane wartości ciśnień pompowania opon wynosiły kolejno 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa. Wysokość z jakiej dokonywano zrzutu kół wynosiła 50 cm, a masa kół (wraz z masą dociążającą) wynosiła 52 kg.

W dalszej kolejności dokonano pomiarów przy pomocy maszyn bieżnych. Zastosowana została metodyka TUG (obciążenie 4000N, ciśnienie wewnątrz opony regulowane do zadanej wartości: 150 kPa, 210 kPa lub 270 kPa, prędkość toczenia się opony wynosiła 80 km/h). Badanie wykonano na tych samych nawierzchniach co w przypadku metody oscylacyjnej (za wyjątkiem nawierzchni SMA8, gdzie posłużono się repliką, o identycznej teksturze co oryginalna nawierzchnia, lecz wykonanej z innego materiału).

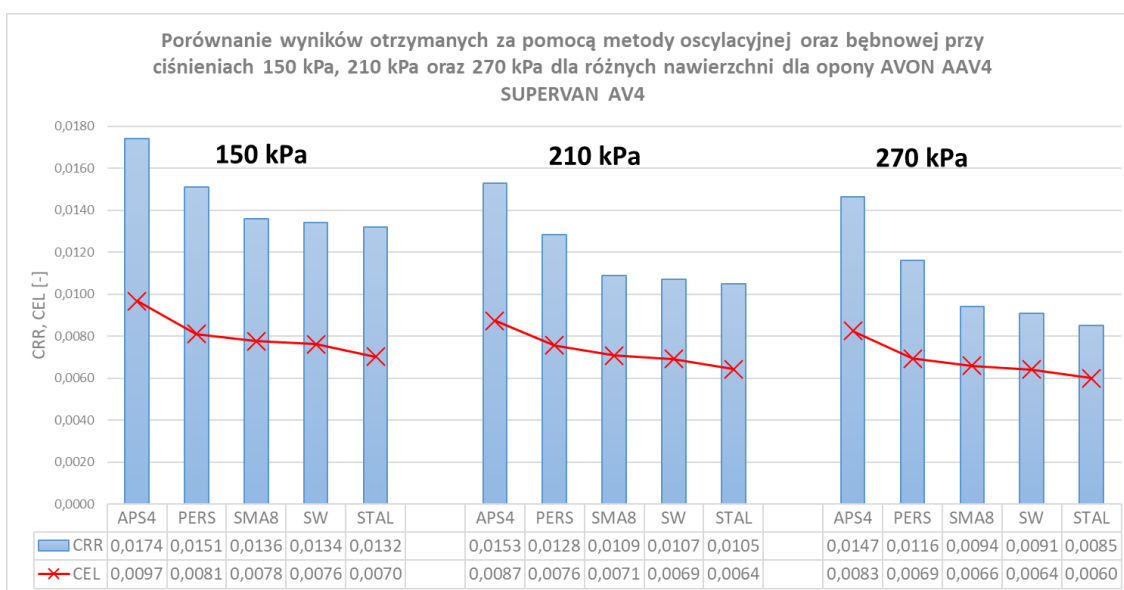
1) OPONA AVON AAV4 SUPERVAN AV4

Na Rysunku 57 przedstawiono przykładowe charakterystyki amplitudowe uzyskane dla opony AVON AAV4, przy zastosowaniu trzech ciśnień pompowania: 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa na nawierzchni APS4. W miarę wzrostu ciśnienia wewnątrz badanej opony zwiększa się jej amplituda odbicia. Przekłada się to bezpośrednio na wzrost pola powierzchni pomiędzy obwiedniami przechodzącymi przez maksima i minima zaprezentowanych charakterystyk, a przez to zmniejszanie się wartości współczynnika metody oscylacyjnej (C_{EL}). Analogiczne wyniki uzyskano dla pozostałych nawierzchni.



Rysunek 57. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony AVON AAV4 przy różnych ciśnieniach pompowania na nawierzchni APS4

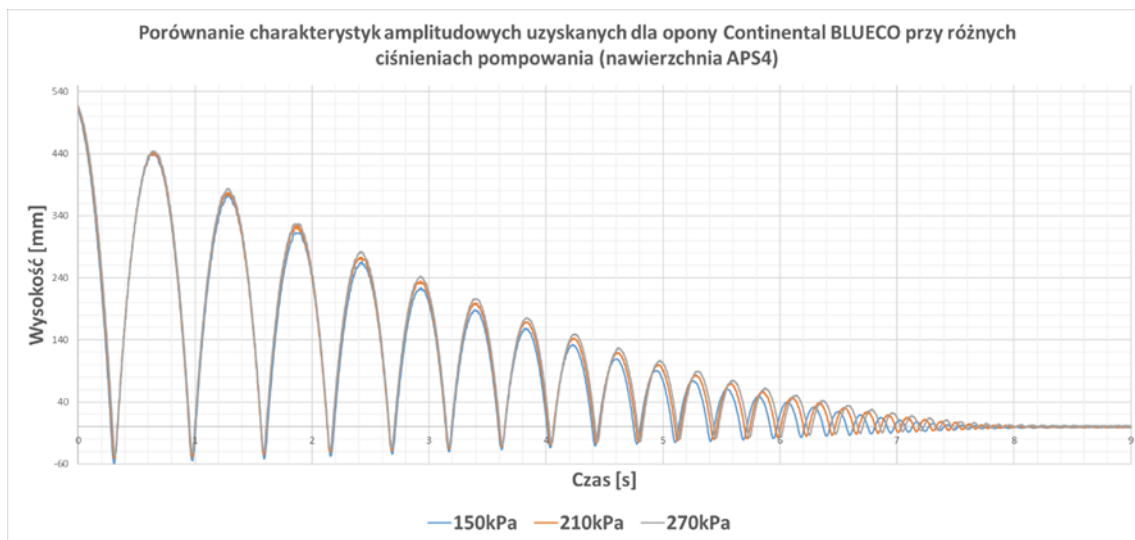
W dalszej kolejności dokonano porównania wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej oraz bębnowej, gdzie zaobserwowano zbieżność na poszczególnych nawierzchniach. Dla wszystkich ciśnień najwyższe wartości obu współczynników otrzymano dla nawierzchni APS4, następnie PERS, SMA8, Safety Walk oraz najmniejsze dla nawierzchni stalowej (Rysunek 58). Wyniki uzyskane na nawierzchni PERS wydają się zbyt niskie co może się wiązać z jej dużą odkształcalnością i sprężystością. Część energii towarzysząca uderzeniu opony mogła zostać przez nią skumulowana i oddana w fazie odbicia co spowodowało zwiększenie amplitudy, a przez to zmniejszenie wartości współczynnika C_{EL} .



Rysunek 58. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (C_{EL}) oraz bębnowej (C_{RR}) przy ciśnieniach 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa dla różnych nawierzchni dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4

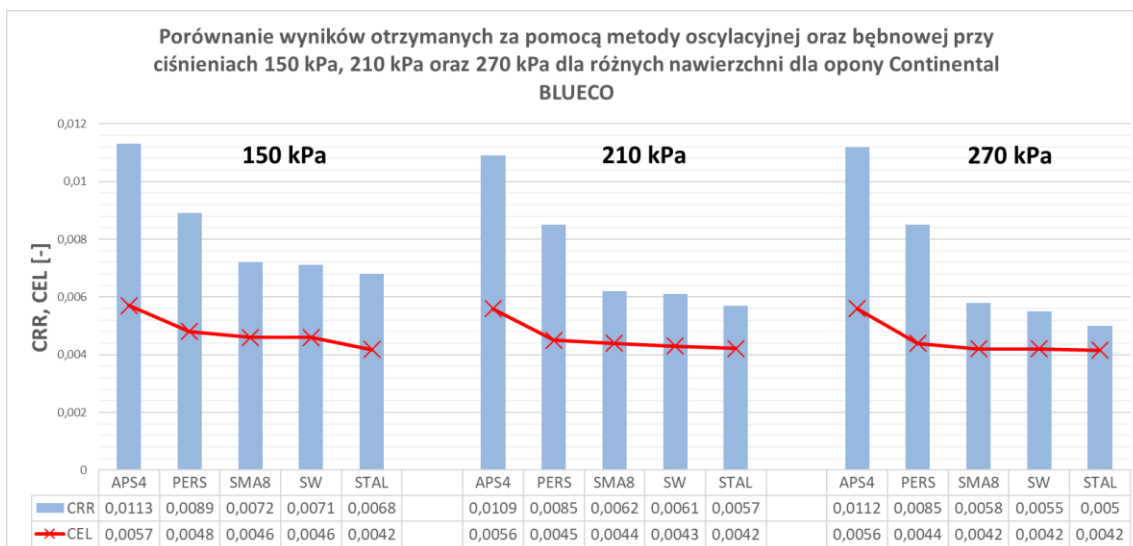
2) OPONA Continental CONTI.ECOCONTACT BLUECO

Na Rysunek 59 przedstawiono przykładową charakterystykę amplitudową otrzymaną dla opony Continental BLUECO na nawierzchni APS4 przy zastosowaniu trzech ciśnień pompowania: 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa. Analogicznie jak w przypadku poprzedniej opony AVON AAV4 na wszystkich badanych nawierzchniach, zaobserwowano zmniejszanie się wartości współczynnika metody oscylacyjnej (C_{EL}) wraz ze wzrostem zastosowanego ciśnienia wewnątrz opony.



Rysunek 59. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony Continental BLUECO przy różnych ciśnieniach pompowania na nawierzchni APS4

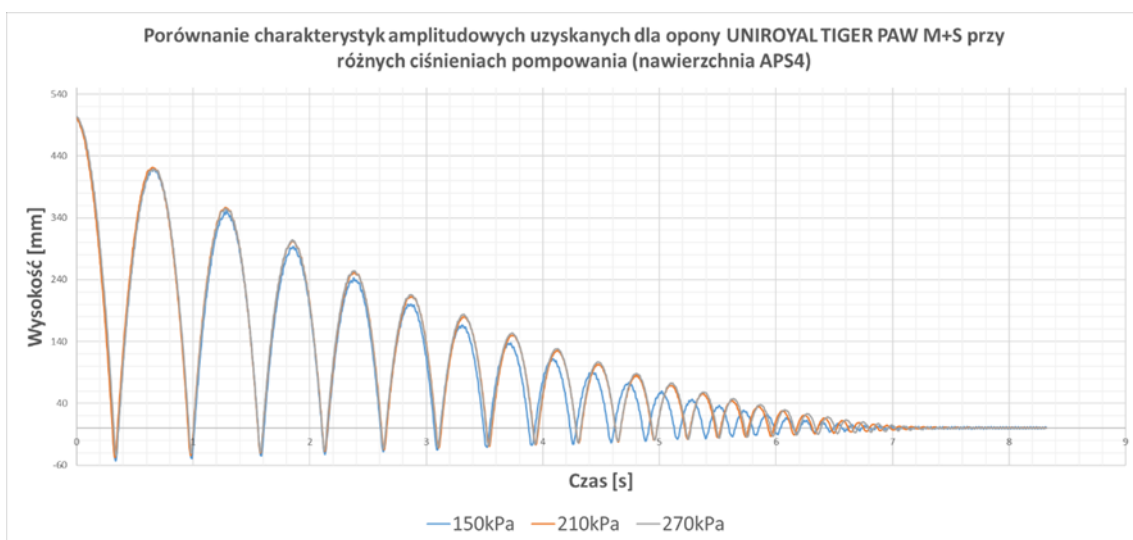
Podobnie jak w przypadku poprzedniej opony AVON AAV4, dokonano zestawienia wyników uzyskanych za pomocą metody oscylacyjnej i bębnowej (Rysunek 60). Odnotowano identyczną kolejność uszeregowania nawierzchni pod względem malejącego współczynnika oporu toczenia (C_{RR}) oraz współczynnika oscylacyjnego (C_{EL}). Najwyższe wartości uzyskano dla nawierzchni APS4, a w dalszej kolejności PERS, SMA8, SafetyWalk oraz nawierzchni stalowej. I w tym przypadku zaobserwowano zbyt niskie wartości C_{EL} dla nawierzchni PERS.



Rysunek 60. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (C_{EL}) i bębnowej (C_{RR}) przy ciśnieniach 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa dla różnych nawierzchni dla opony Continental BLUECO

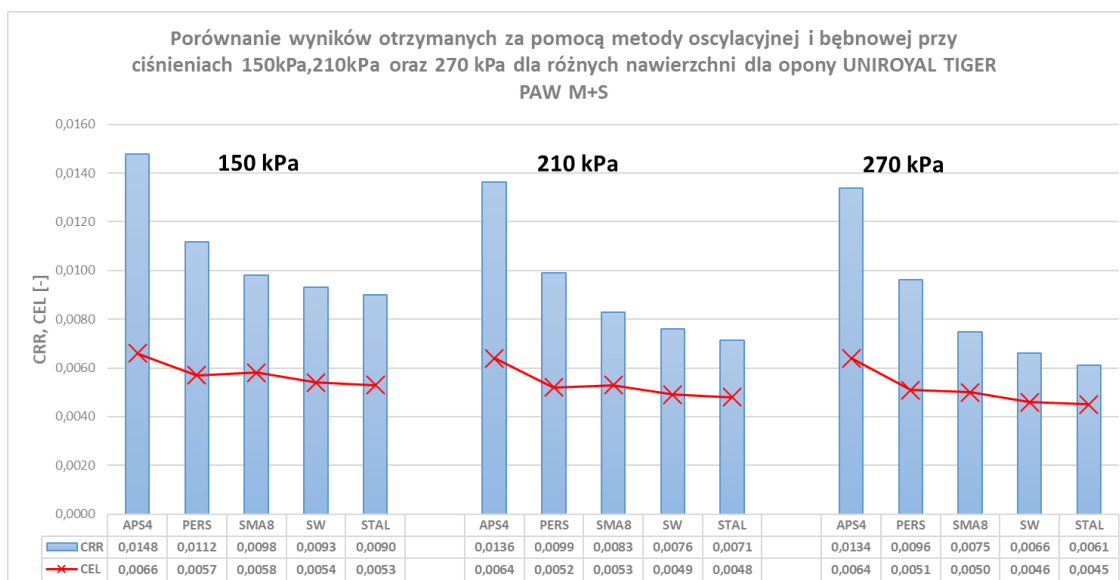
3) OPONA UNIROYAL TIGER PAW M+S

Na Rysunku 61 przedstawiono charakterystykę amplitudową otrzymaną dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S na nawierzchni APS4 przy zastosowaniu trzech ciśnień pompowania: 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa. Identycznie jak w poprzednich przypadkach, na wszystkich badanych nawierzchniach zaobserwowano zmniejszanie się wartości współczynnika metody oscylacyjnej (C_{EL}) wraz ze wzrostem ciśnienia wewnątrz opony.



Rysunek 61. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S przy różnych ciśnieniach pompowania na nawierzchni APS4

Kolejność uszeregowania nawierzchni pod względem malejącego oporu toczenia i współczynnika oscylacyjnego jest niemal identyczna jak dla dwóch poprzednich opon (Rysunek 62). Wyjątkiem są tu nawierzchnie PERS oraz SMA8, gdzie dla metody oscylacyjnej otrzymano wyższe wartości współczynnika C_{EL} dla nawierzchni SMA8, jednak są one do siebie bardzo zbliżone (różnice poniżej 2%). I w tym przypadku wyniki uzyskane na nawierzchni PERS wydają się zaniżone.



Rysunek 62. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (C_{EL}) i bębnowej (C_{RR}) przy ciśnieniach 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa dla różnych nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S

Wszystkie omówione w tym rozdziale wyniki przedstawiono w Tabeli 10:

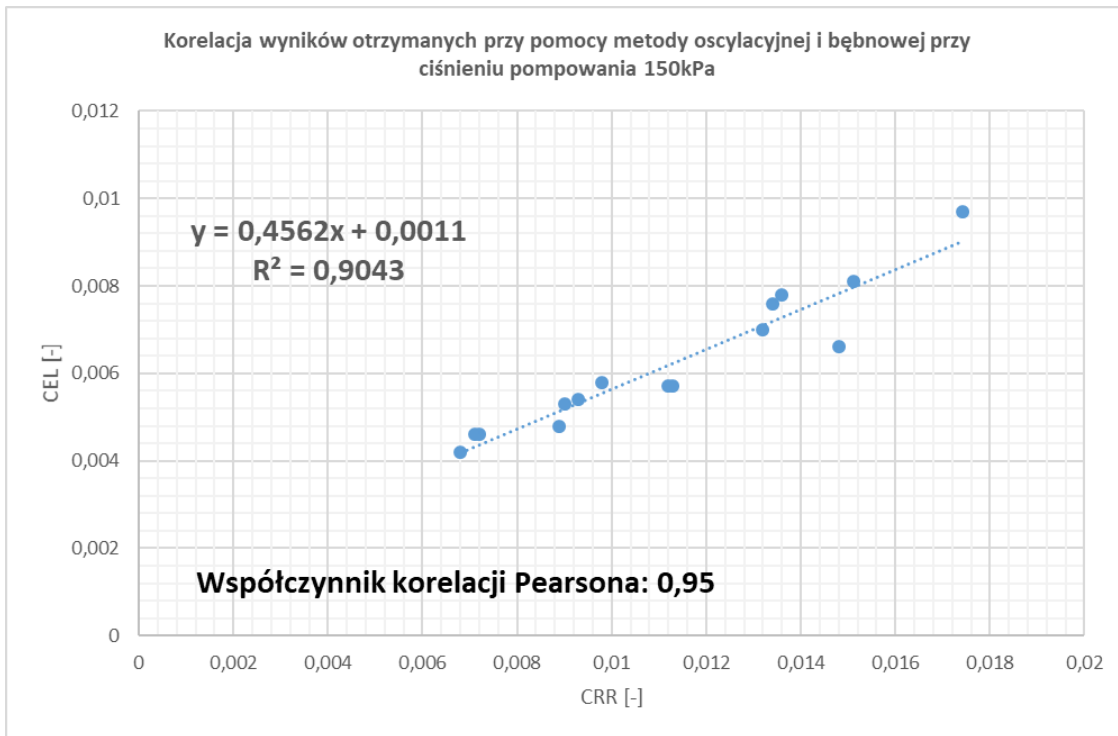
Tabela 10. Zestawienie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej oraz bębnowej przy ciśnieniu pompowania 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa

		wsp. oporu toczenia	wsp. metody oscylacyjnej
SRTT 150kPa	APS4	0,0148	0,0066
	PERS	0,0112	0,0057
	STAL	0,0090	0,0053
	SW	0,0093	0,0054
	SMA8	0,0098	0,0058
SRTT 210kPa	APS4	0,0136	0,0064
	PERS	0,0099	0,0052
	STAL	0,0071	0,0048
	SW	0,0076	0,0049
	SMA8	0,0083	0,0053
SRTT 270kPa	APS4	0,0134	0,0064
	PERS	0,0096	0,0051
	STAL	0,0061	0,0045
	SW	0,0066	0,0046
	SMA8	0,0075	0,0050

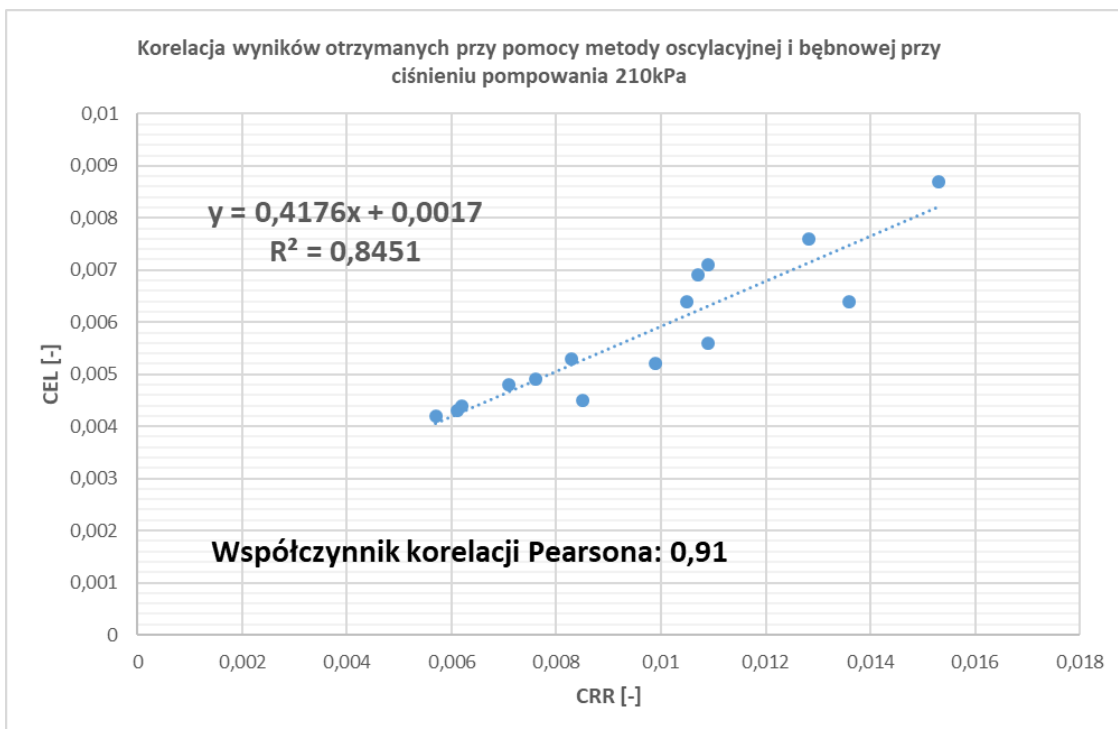
AAV4 150kPa	APS4	0,0174	0,0097
	PERS	0,0151	0,0081
	SMA8	0,0136	0,0078
	SW	0,0134	0,0076
	STAL	0,0132	0,007
AAV4 210kPa	APS4	0,0153	0,0087
	PERS	0,0128	0,0076
	SMA8	0,0109	0,0071
	SW	0,0107	0,0069
	STAL	0,0105	0,0064
AAV4 270kPa	APS4	0,0147	0,0083
	PERS	0,0116	0,0069
	SMA8	0,0094	0,0066
	SW	0,0091	0,0064
	STAL	0,0085	0,006
BLUEco 150kPa	APS4	0,0113	0,0057
	PERS	0,0089	0,0048
	SMA8	0,0072	0,0046
	SW	0,0071	0,0046
	STAL	0,0068	0,0042
BLUEco 210kPa	APS4	0,0109	0,0056
	PERS	0,0085	0,0045
	SMA8	0,0062	0,0044
	SW	0,0061	0,0043
	STAL	0,0057	0,0042
BLUEco 270kPa	APS4	0,0112	0,0056
	PERS	0,0085	0,0044
	SMA8	0,0058	0,0042
	SW	0,0055	0,0042
	STAL	0,0050	0,0042

Po zestawieniu wyników otrzymanych metodą oscylacyjną oraz bębnową, otrzymano poniższe korelacje (Rysunek 63, Rysunek 64, Rysunek 65). Najwyższy stopień korelacji (współczynnik korelacji Pearsona równy 0,95) otrzymano dla ciśnienia pompowania 150kPa, który obniżał się dla kolejnych wartości ciśnienia (dla 210 kPa wyniósł 0,91, a dla 270 kPa stanowił 0,87). Metoda oscylacyjna wykazuje dużą czułość na zastosowane ciśnienie pompowania badanej opony. Dla pomiarów uzyskanych przy ciśnieniu pompowania 150 kPa (Rysunek 63) widać duże skupienie punktów pomiarowych wokół linii regresji. Dla wyższych ciśnień skupienie to maleje (Rysunek 64, Rysunek 65), zwłaszcza punktów odpowiadających za pomiary na nawierzchniach PERS i APS4. Jak już wcześniej wspomniano nawierzchnia PERS posiada dużą sprężystość i odkształcalność, a przez to część energii towarzysząca uderzeniu opony mogła zostać przez nią skumulowana i oddana w fazie odbicia, tym samym zaniżając wartość współczynnika C_{EL} . W przypadku nawierzchni APS4, przetaczanie się opony po wysokich ziarnach kruszywa prawdopodobnie wywołuje większe odkształcenia opony, a co za tym idzie straty energii, niż ma to miejsce w trakcie odbicia od niej.

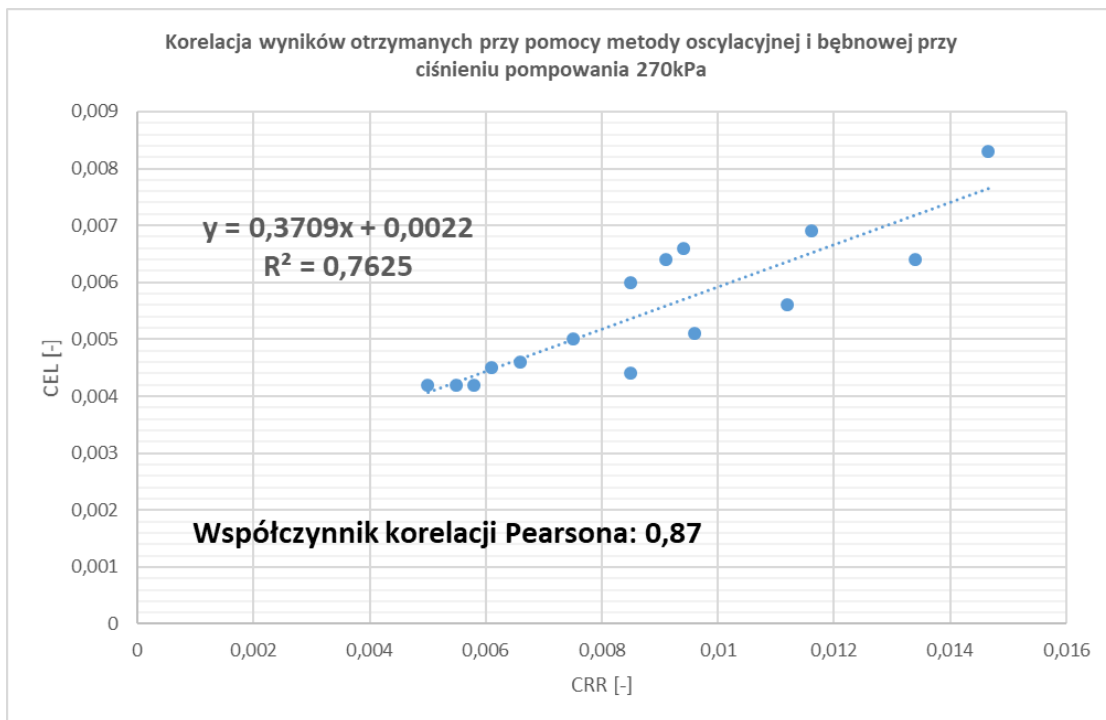




Rysunek 63. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej przy ciśnieniu pompowania 150kPa



Rysunek 64. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej przy ciśnieniu pompowania 210kPa



Rysunek 65. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej przy ciśnieniu pompowania 270kPa

4.3 Porównanie wyników otrzymanych przy zastosowaniu różnych obciążeń

W celu wyznaczenia wpływu obciążenia koła na wartość współczynnika metody oscylacyjnej (C_{EL}) wykonano tak samo jak w przypadku badania wpływu ciśnienia pompowania, pomiary dla trzech opon posiadających względem siebie skrajne wartości współczynnika oporu toczenia (C_{RR}):

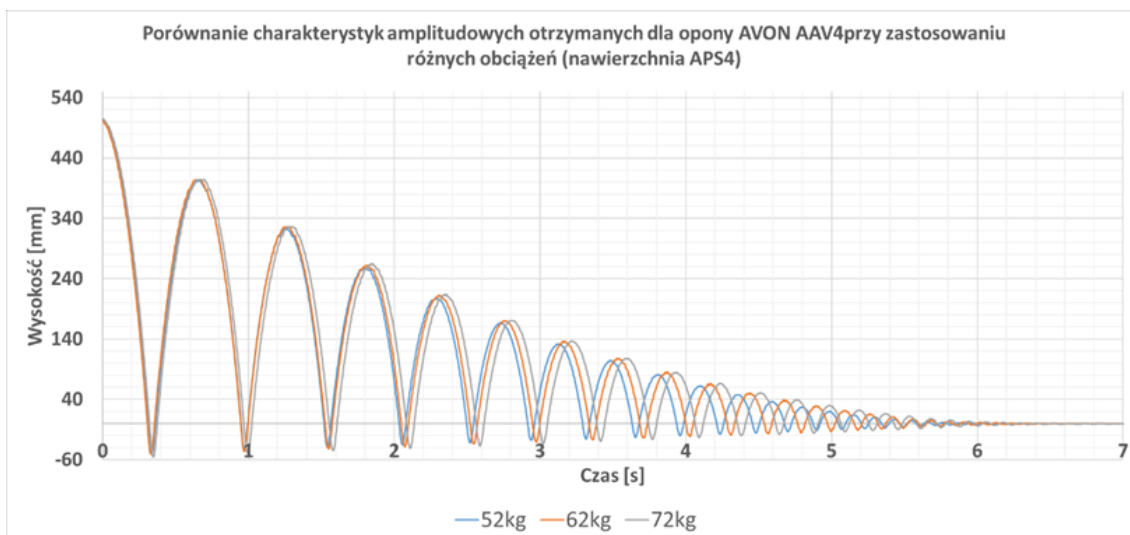
- AVON AAV4 o wysokiej wartości C_{RR} .
- UNIROYAL TIGER PAW M+S o pośredniej wartości C_{RR} .
- Continental BLUECO o bardzo niskiej wartości C_{RR} .

Badanie przeprowadzono na nawierzchniach różniących się teksturą i parametrem MPD oznaczonymi jako: APS4, PERS, SMA8, Safety Walk oraz na nawierzchni stalowej. Zastosowane wartości ciśnień pompowania wynosiły 210 kPa. Wysokość z jakiej dokonywano zrzutu kół wynosiła 50 cm, a masa kół (wraz z masą dociążającą) wynosiły kolejno 52 kg, 62kg oraz 72kg.

W dalszej kolejności dokonano pomiarów przy pomocy maszyn bieżnych. Zastosowana została metodyka TUG (ciśnienie wewnątrz opony regulowane do wartości 210 kPa, prędkość toczenia się opony wynosiła 80 km/h, a wartość zastosowanych obciążeń wynosiła kolejno 4000N, 4787N oraz 5562N). Zastosowane obciążenie zwiększano o tą samą wartość procentową co w przypadku metody oscylacyjnej. Badanie wykonano na tych samych nawierzchniach co w przypadku metody oscylacyjnej (za wyjątkiem nawierzchni SMA8, gdzie posłużono się repliką, o identycznej teksturze co oryginalna nawierzchnia, lecz wykonaną z innego materiału).

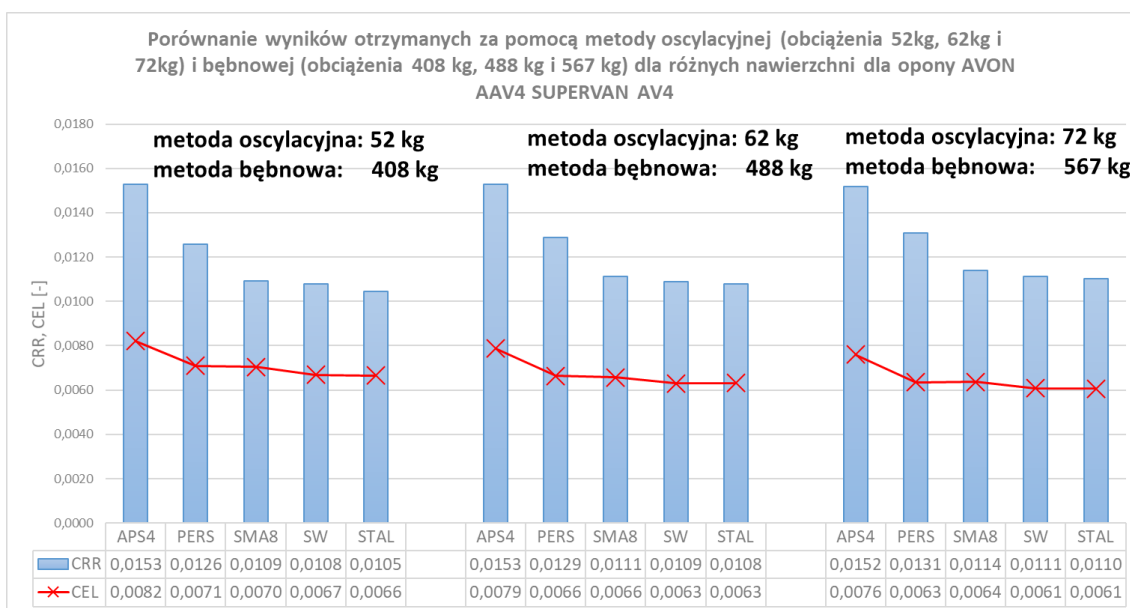
1) OPONA AVON AAV4 SUPERVAN AV4

Na wykresie poniżej (Rysunek 66) przedstawiono przykładowe charakterystyki amplitudowe uzyskane dla opony AVON AAV4 przebadanej na nawierzchni APS4, przy zastosowaniu trzech obciążeń: 52 kg, 62 kg oraz 72 kg. W miarę wzrostu obciążenia badanego koła zwiększa się jego amplituda odbicia. Przekłada się to bezpośrednio na wzrost pola powierzchni pomiędzy obwiedniami przechodzącymi przez maksima i minima zaprezentowanych charakterystyk, a przez to zmniejszanie się wartości współczynnika metody oscylacyjnej (C_{EL}). Analogiczne wyniki uzyskano dla pozostałych nawierzchni.



Rysunek 66. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony AVON AAV4 przy zastosowaniu różnych obciążeń

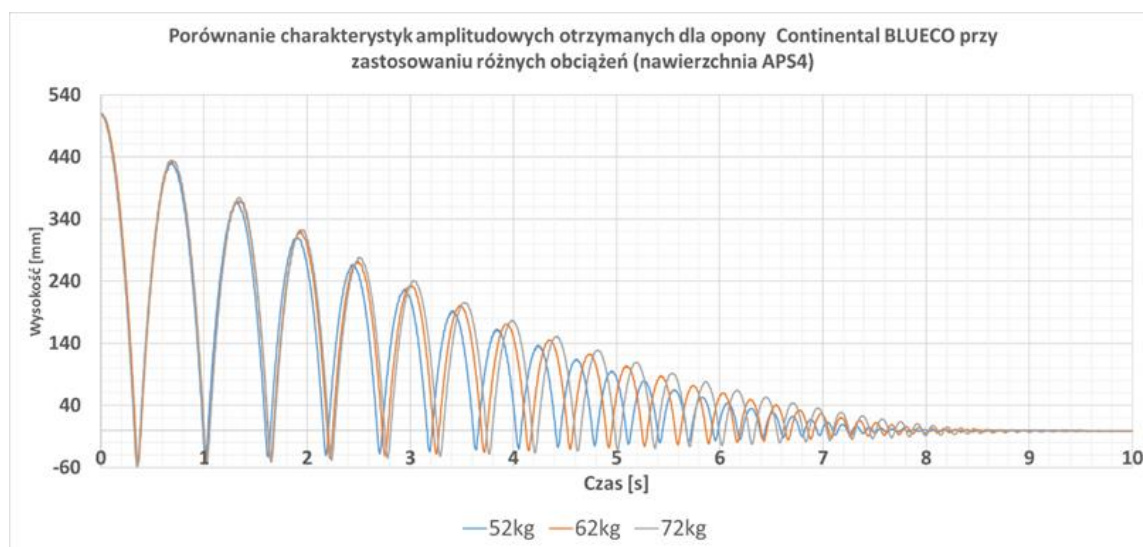
Podobnie jak w przypadku badania wpływu ciśnienia pompowania, wyniki pomiarów uzyskane za pomocą metody oscylacyjnej i bębnowej są do siebie zbliżone na poszczególnych nawierzchniach, za wyjątkiem nawierzchni PERS, gdzie wyniki na niej otrzymane wydają się zbyt niskie (zostało to omówione we wcześniejszym rozdziale). Najwyższe wartości obu współczynników uzyskano dla nawierzchni APS4, najniższe dla Safety Walk oraz nawierzchni stalowej (Rysunek 67).



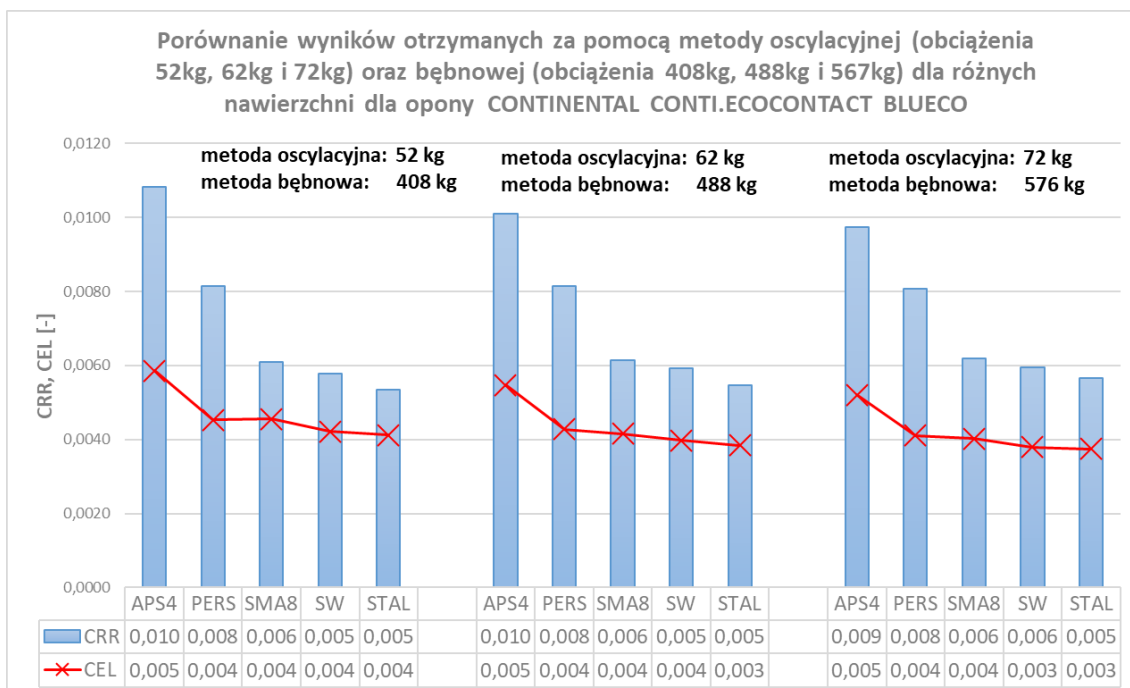
Rysunek 67. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (przy obciążeniach 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4

2) OPONA Continental CONTI.ECOCONTACH BLUECO

Poniżej przedstawiono przykładowe charakterystyki amplitudowe otrzymane dla opony CONTINENTAL CONTI.ECOCONTACH BLUECO przy zastosowaniu obciążenia 52kg, 62kg i 72kg na nawierzchni APS4 (Rysunek 68). Tak samo jak w przypadku poprzedniej opony AVON AAV4 zaobserwowano wzrost amplitudy odbicia wraz ze wzrostem zastosowanego obciążenia. Również porównując ze sobą wyniki otrzymane przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej zauważamy zbieżność na poszczególnych nawierzchniach (Rysunek 69). Jedynym wyjątkiem jest tu nawierzchnia PERS, podobnie jak miało to miejsce w poprzednich analizach.



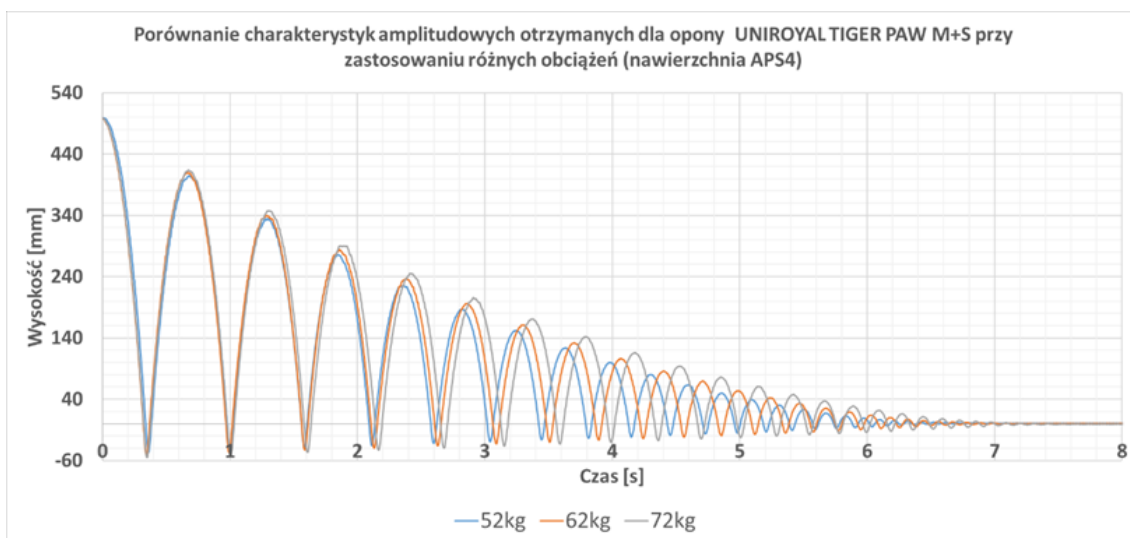
Rysunek 68. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony Continental BLUECO przy zastosowaniu różnych obciążeń



Rysunek 69. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (obciążenia 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony CONTINENTAL CONTI.ECOCONTACT BLUECO

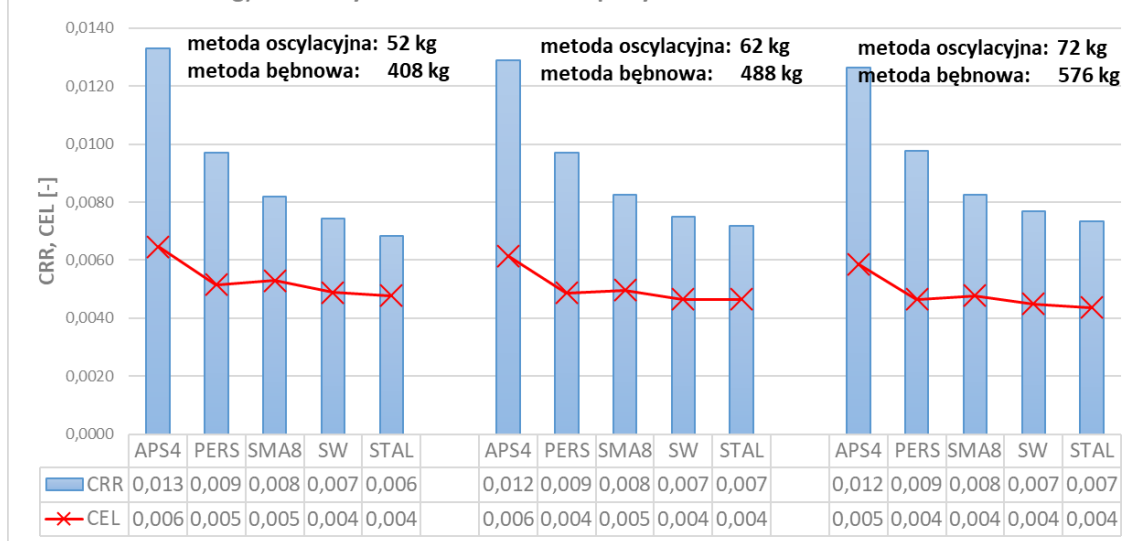
3) UNIROYAL TIGER PAW M+S

Przykładowe charakterystyki amplitudowe otrzymane dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S przedstawiono na Rysunek 70. W tym przypadku również następuje wzrost amplitudy odbicia wraz ze wzrostem zastosowanego obciążenia oraz zbieżność wyników na poszczególnych nawierzchniach dla obu metod pomiarowych, za wyjątkiem nawierzchni PERS dla której otrzymano niemal identyczne wyniki jak dla nawierzchni SMA8 (Rysunek 71).



Rysunek 70. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S przy zastosowaniu różnych obciążeń

Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (obciążenia 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S



Rysunek 71. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (obciążenia 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S

Wszystkie omówione w tym rozdziale wyniki przedstawiono w Tabeli 11:

Tabela 11. Zestawienie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej oraz bębnowej przy obciążeniu 52kg, 62kg i 72kg (metoda oscylacyjna) oraz 408kg, 488kg i 567kg (metoda bębnowa)

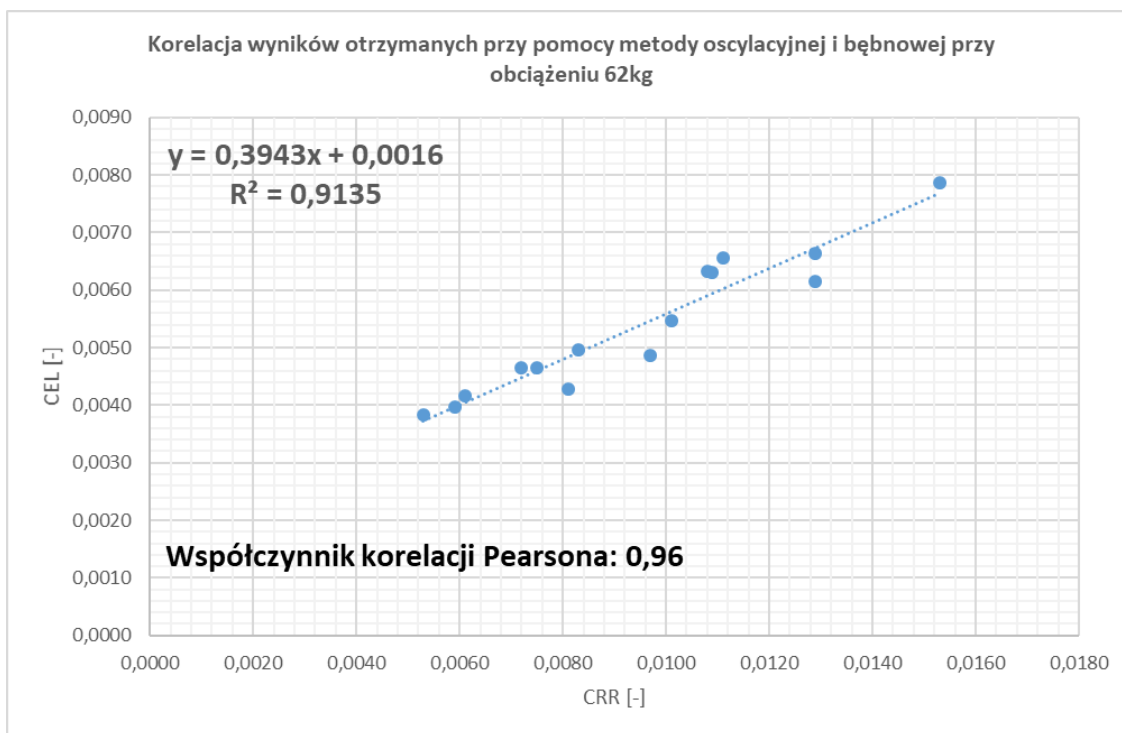
opona	nawierzchnia	Obciążenie [kg]	wsp. metody oscylacyjnej	Obciążenie [kg]	wsp. oporu toczenia
AVON AAV4	APS4	52	0,0082	408	0,0153
		62	0,0079	488	0,0153
		72	0,0076	567	0,0152
	PERS	52	0,0071	408	0,0126
		62	0,0066	488	0,0129
		72	0,0063	567	0,0131
	STAL	52	0,0066	408	0,0105
		62	0,0063	488	0,0108
		72	0,0061	567	0,0110
	SafetyWalk	52	0,0067	408	0,0108
		62	0,0063	488	0,0109
		72	0,0061	567	0,0111
SMA8	52	0,0070	408	0,0109	
	62	0,0066	488	0,0111	
	72	0,0064	567	0,0114	
UNIROYAL TIGER PAW	APS4	52	0,0065	408	0,0133
		62	0,0061	488	0,0129
		72	0,0059	567	0,0126
	PERS	52	0,0052	408	0,0097
		62	0,0049	488	0,0097
		72	0,0047	567	0,0098
	STAL	52	0,0048	408	0,0068
		62	0,0046	488	0,0072
		72	0,0044	567	0,0073
	SafetyWalk	52	0,0049	408	0,0074
		62	0,0046	488	0,0075
		72	0,0045	567	0,0077
SMA8	52	0,0053	408	0,0082	
	62	0,0050	488	0,0083	
	72	0,0048	567	0,0083	
Cont.BLUECO	APS4	52	0,0059	408	0,0108
		62	0,0055	488	0,0101
		72	0,0052	567	0,0097
	PERS	52	0,0045	408	0,0081
		62	0,0043	488	0,0081
		72	0,0041	567	0,0081
	STAL	52	0,0041	408	0,0053
		62	0,0038	488	0,0055
		72	0,0037	567	0,0057
	SafetyWalk	52	0,0042	408	0,0058
		62	0,0040	488	0,0059
		72	0,0038	567	0,0060
SMA8	52	0,0045	408	0,0061	
	62	0,0042	488	0,0061	
	72	0,0040	567	0,0062	

Po zestawieniu wyników otrzymanych metodą oscylacyjną oraz bębnową, otrzymano poniższe korelacje (Rysunek 72, Rysunek 73, Rysunek 74). Można zaobserwować wzrost współczynnika korelacji wraz ze zwiększeniem zastosowanego obciążenia w trakcie zrzutu opony, różnice te jednak są nieznaczne (najniższa wartość współczynnika korelacji Pearsona 0,94 przy obciążeniu 52kg, a najwyższa 0,96 przy 72kg). Świadczy to o niskiej czułości proponowanej metody na wielkość zastosowanego obciążenia.

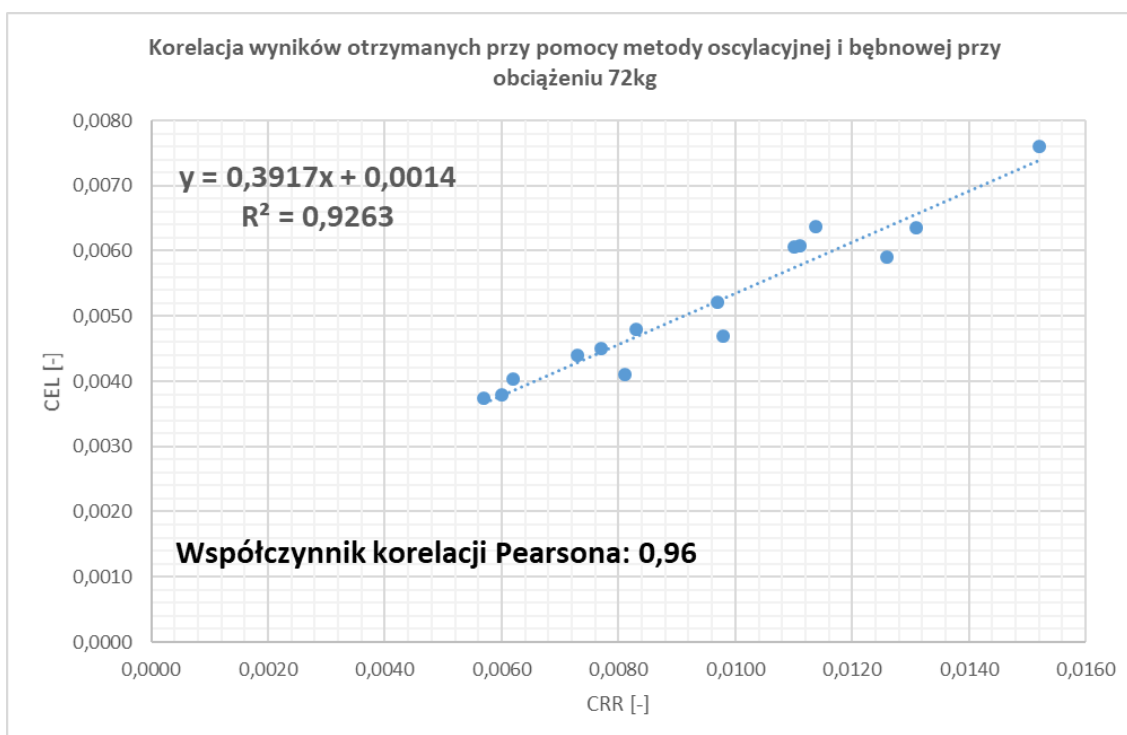


Rysunek 72. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej (przy obciążeniu 52kg dla metody oscylacyjnej i 408kg dla metody bębnowej)





Rysunek 73. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej (przy obciążeniu 62kg dla metody oscylacyjnej i 488kg dla metody bębnowej)



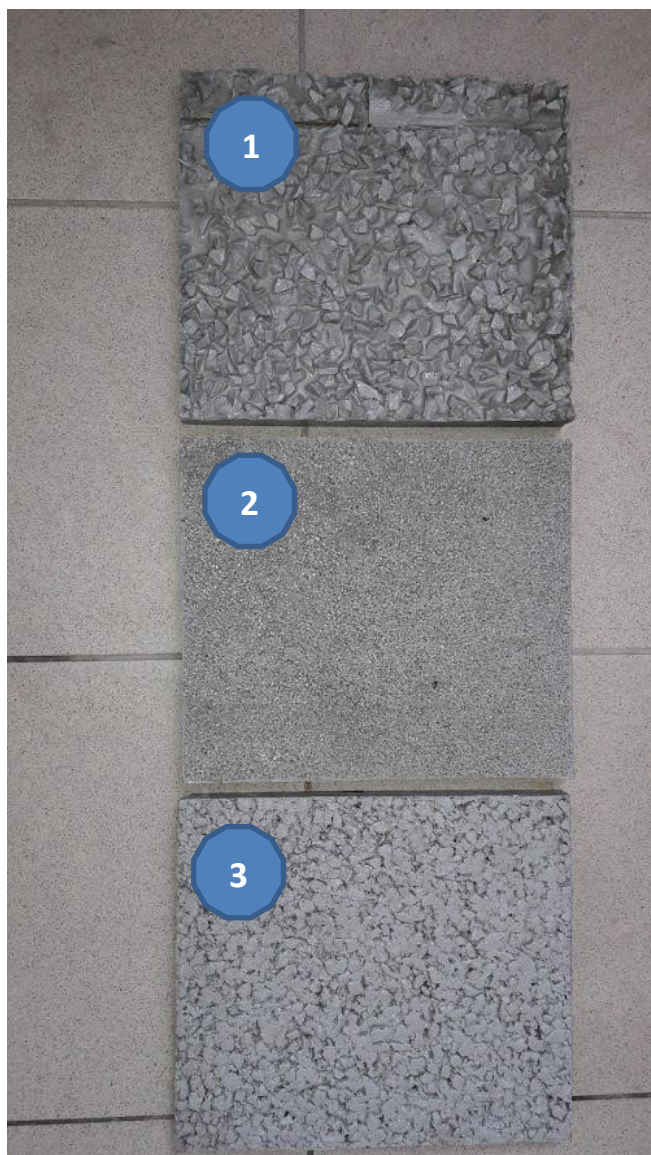
Rysunek 74. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej (przy obciążeniu 52kg dla metody oscylacyjnej i 567kg dla metody bębnowej)

4.4 Analiza wpływu sztywności nawierzchni oraz jej głębokości profilu

4.4.1 Analiza wpływu sztywności nawierzchni

W celu wyznaczenia wpływu sztywności nawierzchni drogowej na uzyskane wyniki przy pomocy metody oscylacyjnej dokonano pomiarów porównawczych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 (przedstawione w podrozdziale 3.1.4 Badane nawierzchnie drogowe, Tabela 3) oraz ich replikach o identycznej teksturze lecz innej sztywności, wykonanych z żywicy epoksydowej (Rysunek 75).

Do badań użyto podobnie jak w pozostałych analizach opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4, CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO oraz UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT. Badane opony napompowane były do ciśnienia 210 kPa, ich masa z obciążeniem wynosiła 52 kg, a wysokość zrzutu równa była 50 cm.



Rysunek 75. Repliki nawierzchni drogowych: APS4 (1), PERS (2), SMA8 (3) (materiał własny)

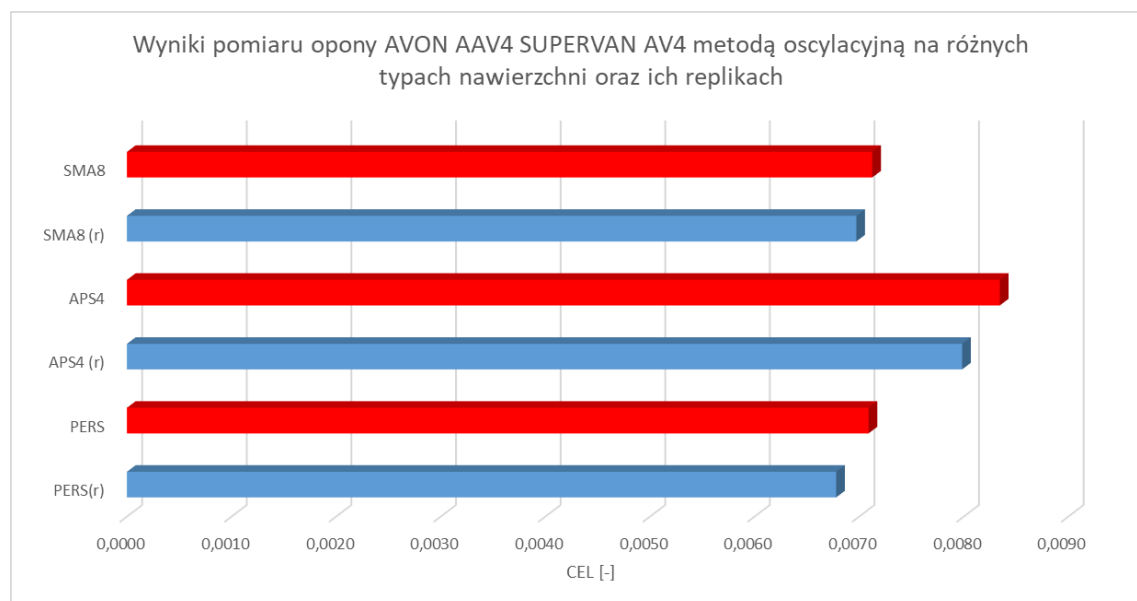
1) AVON AAV4 SUPERVAN AV4

Różnice między średnimi wartościami współczynnika C_{EL} uzyskiwanego na oryginalnych nawierzchniach i ich replikach były niewielkie i mieściły się w przedziale 2,13% - 4,36% (Tabela 12, Rysunek 76). Największe różnice uzyskano dla nawierzchni PERS (4,36%), gdzie w każdej serii pomiarowej niższe wartości C_{EL} uzyskano dla repliki nawierzchni. Podobne różnice uzyskano dla nawierzchni APS4. Różnica między oryginalną nawierzchnią, a jej repliką wynosiła 4,32% (we wszystkich przypadkach niższe wartości C_{EL} uzyskano dla repliki). Najniższą różnicę uzyskano dla nawierzchni SMA8 (2,13%). W serii 1 i 2 wyniki były albo niemal identyczne, albo na korzyść oryginalnej nawierzchni. W serii 3 i 4 niższe wartości C_{EL} otrzymano dla repliki nawierzchni. Patrząc jednak na średnią arytmetyczną ze wszystkich pomiarów, niższe wartości C_{EL} uzyskano dla repliki.

Tabela 12. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)

AVON AAV4 SUPERVAN AV4							temperatura boku opony
nawierzchnia	PERS(r)	PERS	APS4 (r)	APS4	SMA8 (r)	SMA8	
seria1	0,0069	0,0071	0,0082	0,0085	0,0071	0,0071	20°C
seria2	0,0069	0,0072	0,0082	0,0086	0,0072	0,0069	20°C
seria3	0,0066	0,0070	0,0077	0,0081	0,0068	0,0073	22°C
seria4	0,0066	0,0071	0,0078	0,0082	0,0067	0,0072	22°C
średnia arytmetyczna	0,0068	0,0071	0,0080	0,0083	0,0070	0,0071	
różnica [%]	4,36		4,32		2,13		

(r) - replika nawierzchni odlana z żywicy



Rysunek 76. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)

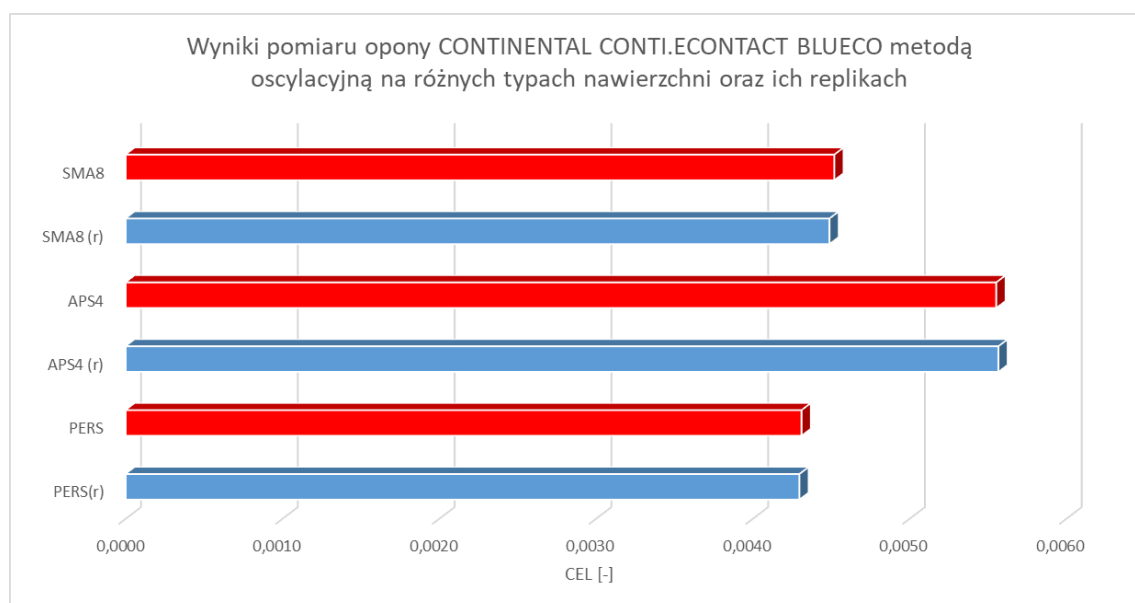
2) CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO

W tym przypadku wyniki uzyskiwane na nawierzchniach oryginalnych i ich replikach były niemal identyczne (różnice wartości średnich mieściły się w zakresie 0,25% - 0,68%). Analizując poszczególne serie pomiarowe nie można określić jednoznacznie, który typ nawierzchni (oryginalna, czy replika) daje niższe wartości współczynnika C_{EL} (Tabela 13, Rysunek 77).

Tabela 13. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)

CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO							temperatura boku opony
nawierzchnia	PERS(r)	PERS	APS4 (r)	APS4	SMA8 (r)	SMA8	
seria 1	0,0043	0,0043	0,0055	0,0058	0,0044	0,0045	22°C
seria 2	0,0043	0,0043	0,0057	0,0055	0,0045	0,0045	22°C
seria3	0,0042	0,0044	0,0054	0,0055	0,0045	0,0045	23°C
seria4	0,0044	0,0042	0,0056	0,0054	0,0046	0,0046	23°C
średnia arytmetyczna	0,0043	0,0043	0,0056	0,0056	0,0045	0,0045	
różnica [%]	0,31		0,25		0,68		

(r) - replika nawierzchni odlana z żywicy



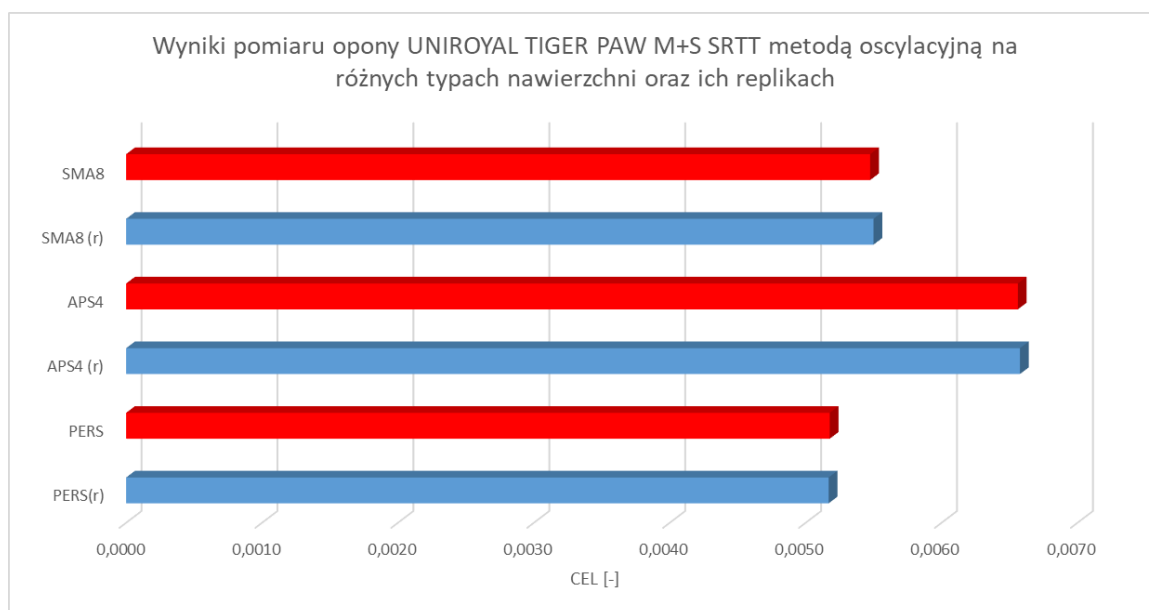
Rysunek 77. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)

3) UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT

Wyniki uzyskane na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach są bardzo zbliżone, różnice wartości średnich wynoszą poniżej 0,44% (Tabela 14, Rysunek 78). Patrząc na poszczególne serie pomiarowe nie można wyróżnić jednoznacznie, który typ nawierzchni daje niższe wartości współczynnika C_{EL} .

Tabela 14. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)

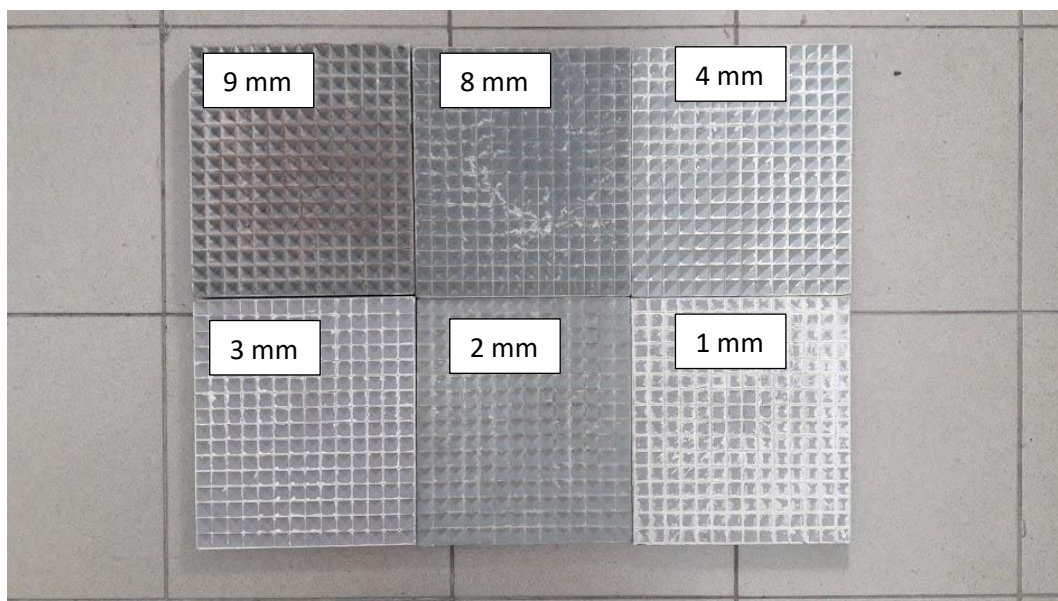
UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT							temperatura boku opony
nawierzchnia	PERS(r)	PERS	APS4 (r)	APS4	SMA8 (r)	SMA8	
seria 1	0,0052	0,0051	0,0066	0,0066	0,0055	0,0055	22°C
seria 2	0,0050	0,0052	0,0066	0,0065	0,0054	0,0054	22°C
seria3	0,0052	0,0053	0,0065	0,0065	0,0054	0,0055	21°C
seria4	0,0053	0,0051	0,0066	0,0066	0,0057	0,0055	21°C
średnia arytmetyczna	0,0052	0,0052	0,0066	0,0066	0,0055	0,0055	
różnica [%]	0,16		0,24		0,44		



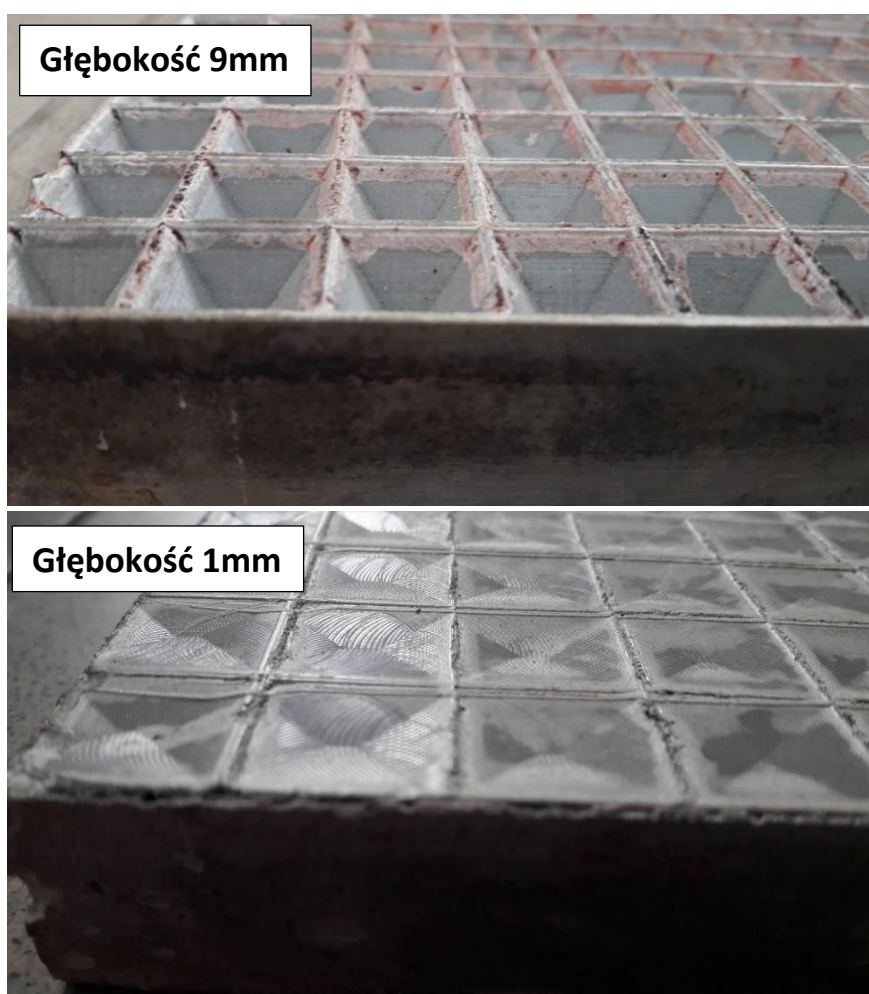
Rysunek 78. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)

4.4.2 Analiza wpływu głębokości profilu nawierzchni

W dalszej kolejności wykonano pomiary mające na celu wykazanie wpływu głębokości profilu nawierzchni na przebieg oscylacji. W tym celu użyto próbek nawierzchni wykonanych z żywicy epoksydowej o zagłębieniach w kształcie ostrosłupa (zagłębienia: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 8 mm oraz 9 mm), (Rysunek 79, Rysunek 80). Do pomiarów użyto tych samych opon co w poprzednim przypadku badania wpływu sztywności nawierzchni. Badane opony napompowane były do ciśnienia 210 kPa, wysokość zrzutu wynosiła 50 cm, a ich masa z obciążeniem równa była 52 kg.



Rysunek 79. Próbkki nawierzchni różniące się głębokością profilu



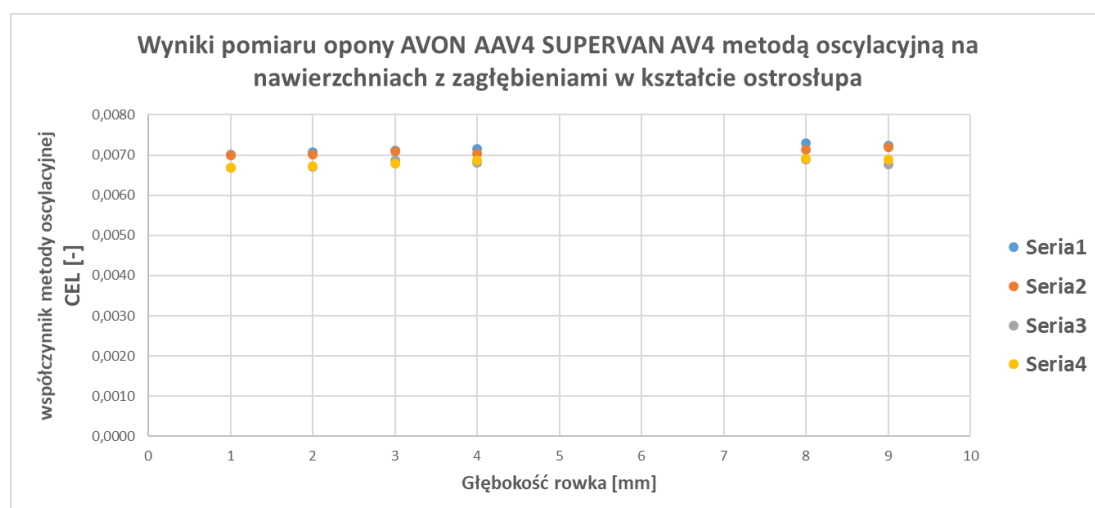
Rysunek 80. Porównanie głębokości profilu nawierzchni

1) AVON AAV4 SUPERVAN AV4

Dla wszystkich serii pomiarowych uzyskano jednakową tendencję. Wraz ze wzrostem głębokości profilu nawierzchni rośnie wartość współczynnika oscylacyjnego, ale tylko do pewnego momentu. Powyżej pewnej głębokości profilu nawierzchni (w tym przypadku 3 mm) współczynnik C_{EL} przestaje rosnąć, co ma związek ze zjawiskiem envelopingu (zjawisko omówione w podr. 2.4) (Tabela 15, Rysunek 81).

Tabela 15. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)

AVON AAV4 SUPERVAN AV4							temperatura boku opony
głębokość [mm]	1	2	3	4	8	9	
seria 1	0,0070	0,0071	0,0071	0,0072	0,0073	0,0072	20°C
seria 2	0,0070	0,0070	0,0071	0,0070	0,0071	0,0072	20°C
seria3	0,0067	0,0067	0,0069	0,0068	0,0069	0,0068	22°C
seria4	0,0067	0,0067	0,0068	0,0069	0,0069	0,0069	22°C
średnia arytmetyczna	0,0068	0,0069	0,0070	0,0070	0,0071	0,0070	



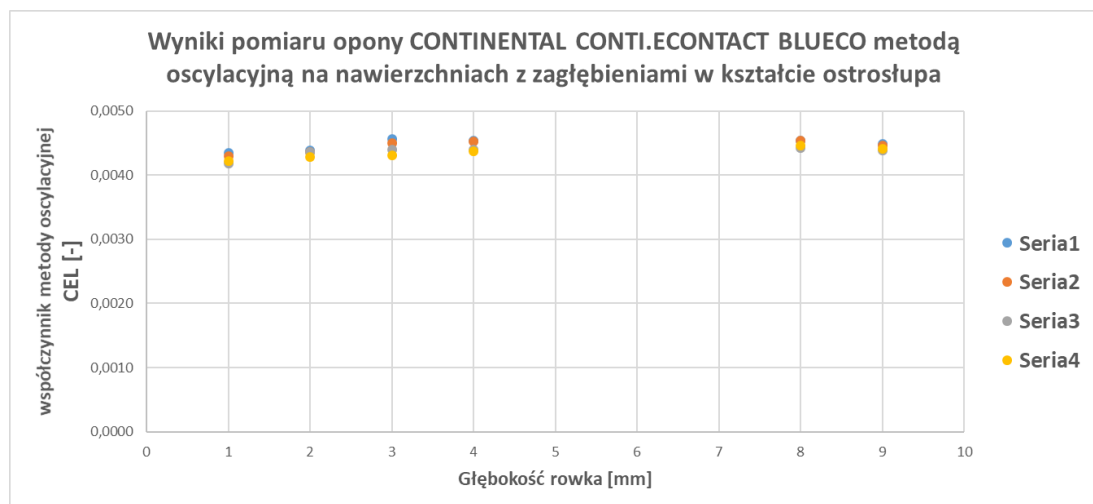
Rysunek 81. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)

2) CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO

Tak samo jak w przypadku poprzedniej opony dla wszystkich serii pomiarowych zaobserwować można identyczną tendencję. Współczynnik C_{EL} rośnie tylko do pewnej głębokości profilu nawierzchni (4mm), powyżej której przyjmuje stałą wartość (Tabela 16, Rysunek 82).

Tabela 16. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)

CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO							temperatura boku opony
głębokość [mm]	1	2	3	4	8	9	
seria 1	0,0043	0,0044	0,0046	0,0045	0,0045	0,0045	22°C
seria 2	0,0043	0,0044	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	22°C
seria3	0,0042	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	23°C
seria4	0,0042	0,0043	0,0043	0,0044	0,0045	0,0044	23°C
średnia arytmetyczna	0,0043	0,0043	0,0044	0,0045	0,0045	0,0044	



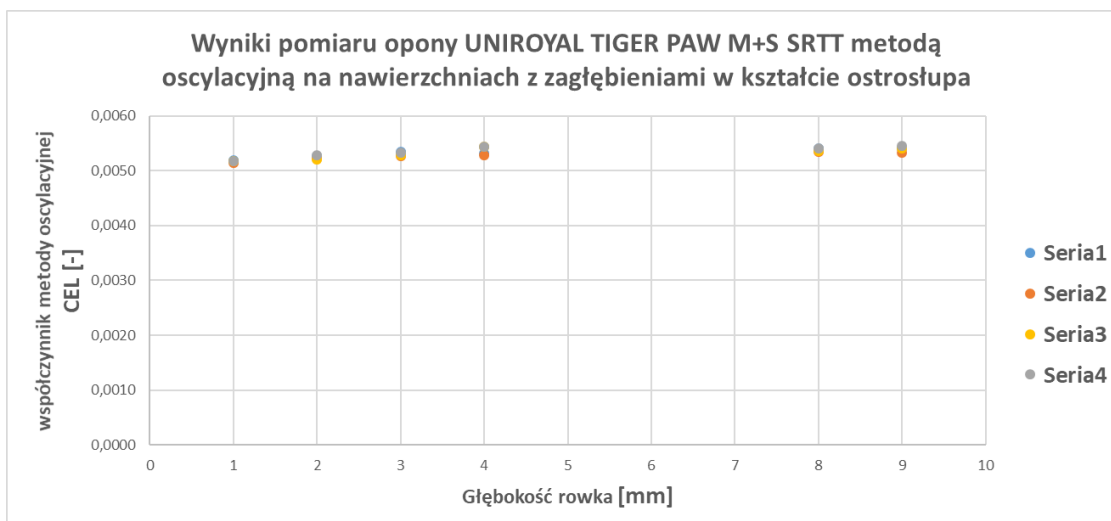
Rysunek 82. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)

3) UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT

Wyniki uzyskane dla ostatniej z badanych opon potwierdzają obserwacje uzyskane wcześniej. I w tym przypadku widać wzrost wartości C_{EL} tylko do pewnej głębokości profilu nawierzchni (4mm). Dalszy wzrost głębokości nie powoduje wzrostu zmian wartości współczynnika C_{EL} .

Tabela 17. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)

UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT							temperatura boku opony
głębokość [mm]	1	2	3	4	8	9	
seria 1	0,0052	0,0053	0,0053	0,0053	0,0054	0,0054	22°C
seria 2	0,0051	0,0052	0,0053	0,0053	0,0053	0,0053	22°C
seria3	0,0052	0,0052	0,0053	0,0054	0,0054	0,0054	21°C
seria4	0,0052	0,0053	0,0053	0,0054	0,0054	0,0055	21°C
średnia arytmetyczna	0,0052	0,0052	0,0053	0,0054	0,0054	0,0054	



Rysunek 83. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)

Metoda oscylacyjna jest czuła na zmiany w kształtu profilu nawierzchni i pozwala na zauważenie różnic w profilach w których wierzchołki nierówności mają różny kąt zaostrenia. Wskazuje jednak również, że całkowita głębokość nierówności („rowka”) nie ma wpływu na opór toczenia, gdyż nie wpływa na odkształcenie materiału opony. Potwierdza to istotne znaczenie envelopingu jako zjawiska decydującego o oporze toczenia.

4.5 Analiza wpływu temperatury

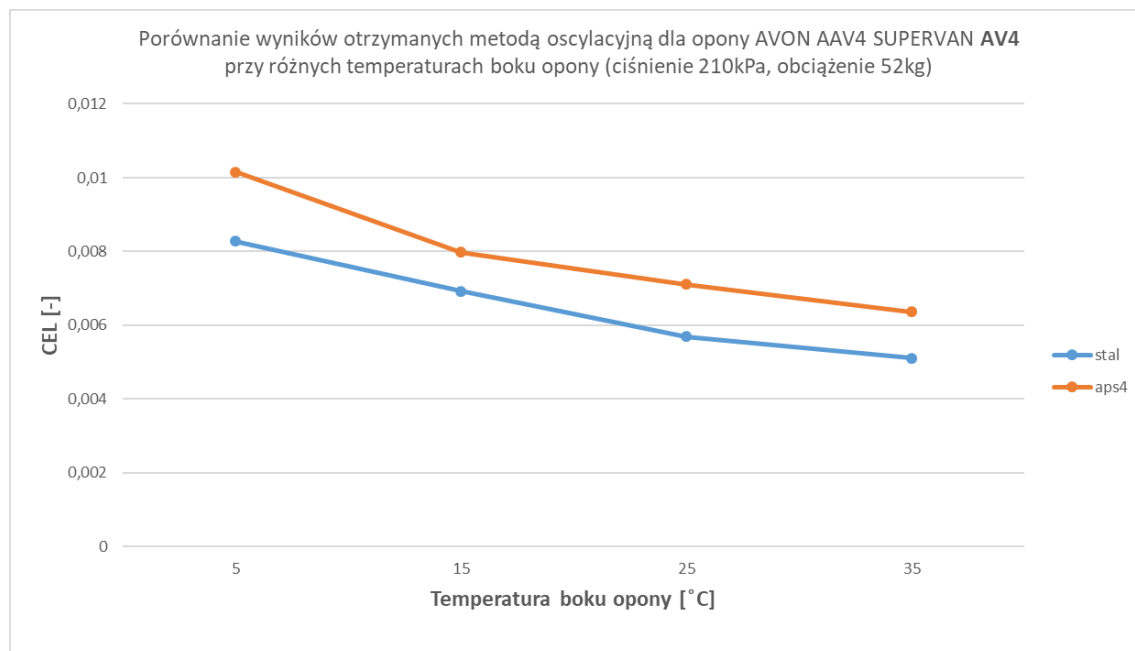
Poniżej przedstawiono analizę wpływu temperatury opony na wyniki otrzymane przy pomocy metody oscylacyjnej. Zbadano opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT, AVON AAV4 SUPERVAN AV4 oraz CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO na nawierzchni stalowej (generująca niskie opory toczenia) oraz APS4 (generująca wysokie opory toczenia). Ciśnienie pompowania opon wynosiło 210 kPa, wysokość zrzutu 50 cm, a masa koła wraz z obciążeniem 52 kg. Opony były wstępnie rozgrzewane na stanowisku bębnowym, w celu osiągnięcia wysokiej temperatury, a następnie mocowane na stanowisku oscylacyjnym. Pomiaru dokonano dla 4 temperatur boku opony 35°C, 25°C, 15°C i 5°C (pomiar temperatury dokonany za pomocą pirometru).

1) AVON AAV4 SUPERVAN AV4

Wraz ze spadkiem temperatury boku opony rośnie wartość współczynnika C_{EL} . Różnica między najwyższą wartością C_{EL} uzyskaną dla temperatury boku opony 5°C, a najniższą wartością uzyskaną dla temperatury 35°C wynosiła 37% dla nawierzchni APS4 oraz 39% dla nawierzchni stalowej (Tabela 18, Rysunek 84). Dla obu nawierzchni zauważono również wzrost tempa narastania współczynnika C_{EL} wraz ze spadkiem temperatury opony.

Tabela 18. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (AVON AAV4 SUPERVAN AV4 na nawierzchniach APS4 i stalowej)

Temperatura [°C]	5	15	25	35
APS4	0,0102	0,0080	0,0071	0,0064
STAL	0,0083	0,0069	0,0057	0,0051



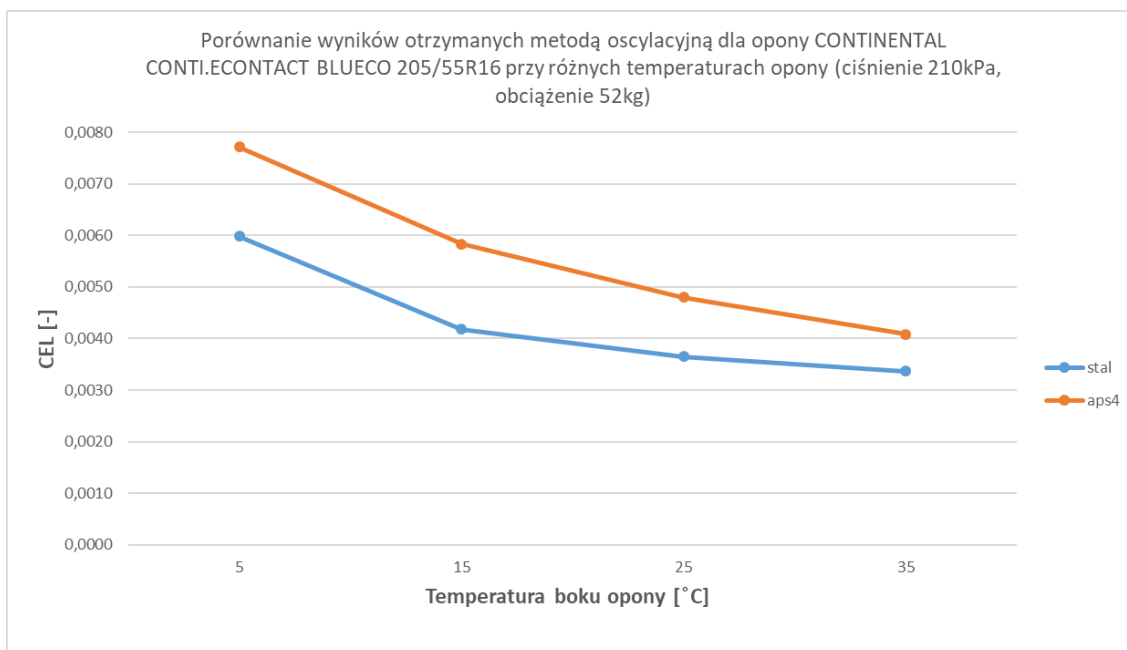
Rysunek 84. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (AVON AAV4 SUPERVAN AV4 na nawierzchniach APS4 i stalowej)

2) CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO

Tak jak w przypadku poprzedniej opony wraz ze spadkiem temperatury zauważono wzrost wartości współczynnika C_{EL} . Różnice w wartościach współczynnika C_{EL} uzyskanych dla opony CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO wynosiły 47% dla nawierzchni APS4 oraz 43% dla nawierzchni stalowej (Tabela 19, Rysunek 85). Tempo narastania wartości współczynnika C_{EL} wzrasta wraz z obniżaniem się temperatury boku opony.

Tabela 19. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO na nawierzchniach APS4 i stalowej)

Temperatura [°C]	5	15	25	35
APS4	0,0077	0,0058	0,0048	0,0041
STAL	0,0060	0,0042	0,0037	0,0034



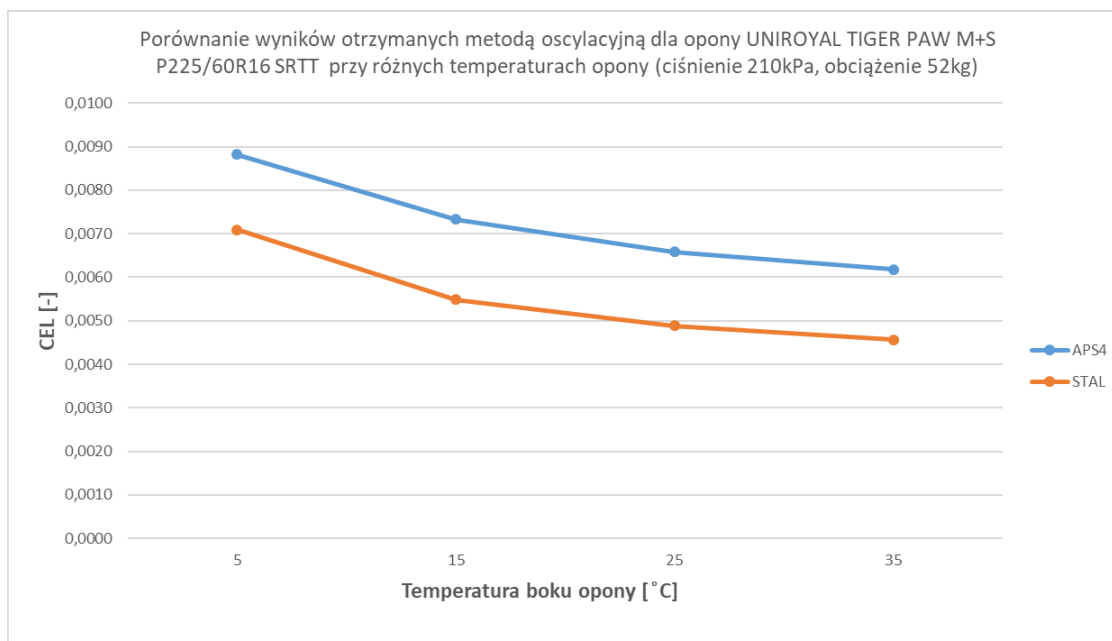
Rysunek 85. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO na nawierzchniach APS4 i stalowej)

3) UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT

Identycznie jak w przypadku dwóch poprzednich opon zaobserwowano wzrost wartości współczynnika C_{EL} w miarę obniżania się temperatury badanej opony. Różnice w wartościach współczynnika C_{EL} były najniższe spośród wszystkich 3 opon. Dla nawierzchni APS4 wyniosła 30%, a dla nawierzchni stalowej 35% (Tabela 20, Rysunek 86). Tempo narastania wartości współczynnika C_{EL} podobnie jak dla poprzednich opon wzrasta wraz z obniżeniem się temperatury boku opony.

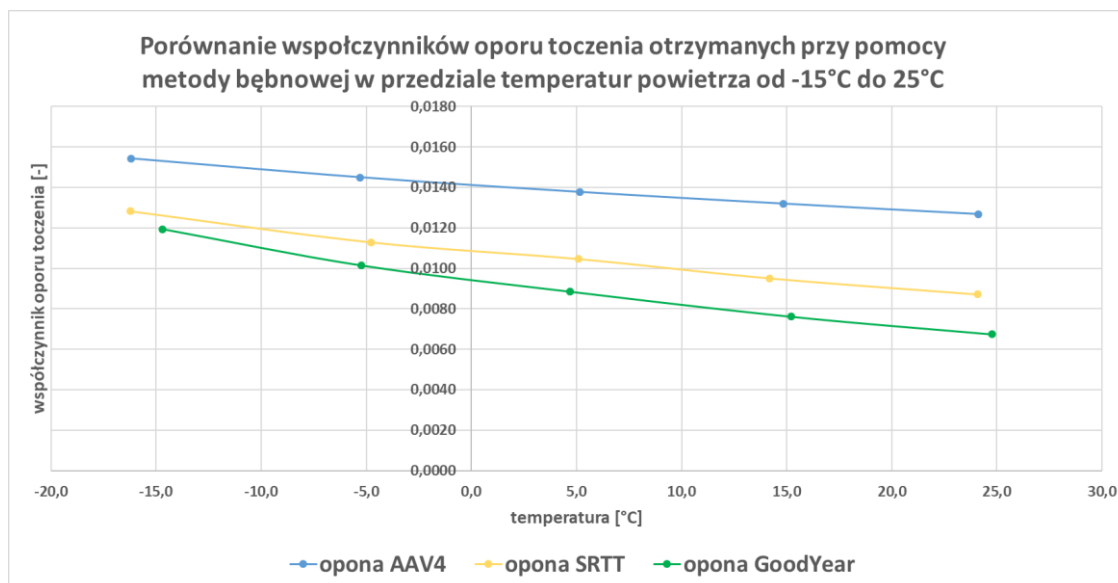
Tabela 20. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT na nawierzchniach APS4 i stalowej)

temperatura [°C]	5	15	25	35
APS4	0,0088	0,0073	0,0066	0,0062
STAL	0,0071	0,0055	0,0049	0,0046



Rysunek 86. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT na nawierzchniach APS4 i stalowej)

Temperatura badanej opony ma bardzo duży wpływ na wartość współczynnika C_{EL} . Wraz z jej spadkiem rośnie twardość mieszanki gumowej. Większa ilość energii jest tracona na ugięcie opony podczas uderzenia o nawierzchnię, a co za tym idzie rośnie wartość współczynnika C_{EL} . Dla wyżej opisanych opon różnice w przedziale temperatur 5°C - 35°C wynosiły 30% - 47%. We wszystkich przypadkach zaobserwowano również wzrost tempa narasta współczynnika C_{EL} w miarę obniżania się temperatury boku opony. Na różnice w przebiegu krzywych opisujących tę zależność ma zapewne wpływ skład mieszanki gumowej z której wykonano badane opony. W celu uzyskania powtarzalnych wyników stanowisko pomiarowe musi znajdować się w pomieszczeniu, gdzie możliwe jest uzyskanie ustalonej temperatury. Na Rysunku 87 przedstawiono współczynniki oporu toczenia uzyskane dla tych samych opon w przedziale temperatur od -15°C do 25°C. Należy jednak mieć na uwadze fakt, iż charakterystyka temperaturowa otrzymana przy pomocy metody bębnowej uwzględnia temperaturę powietrza w jakiej badane są opony, a nie temperaturę boku opony jak ma to miejsce w przypadku metody oscylacyjnej.

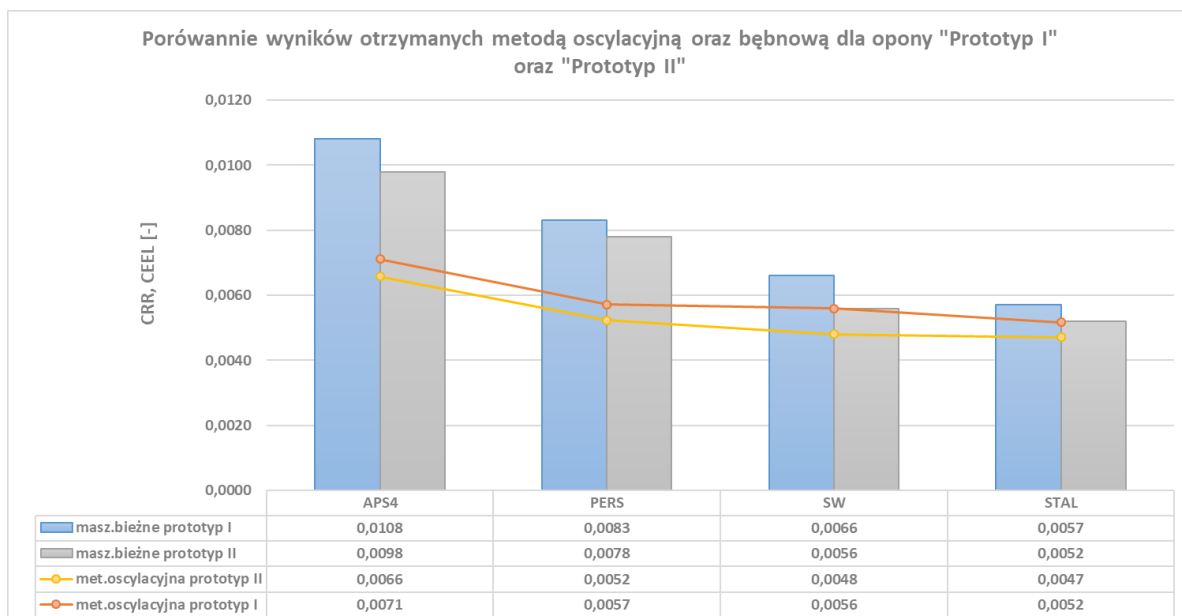


Rysunek 87 Porównanie współczynników oporu toczenia otrzymanych przy pomocy metody bębnowej w przedziale temperatur powietrza od -15°C do 25°C

4.6 Analiza wpływu mieszanki gumowej

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów, mających na celu określenie czułości metody oscylacyjnej na skład mieszanki gumowej z której wykonane są opony. Badaniu poddane zostały opony o identycznej rzeźbie bieżnika w rozmiarze 195/55R20, różniące się wyłącznie składem mieszanki gumowej (ze względu na to, że były to opony prototypowe, ich nazwa nie może zostać ujawniona). Zastosowane obciążenie wynosiło 52 kg, wysokość zrzutu 50 cm, a ciśnienie pompowania 210 kPa. Pomiary wykonano na 4 nawierzchniach: APS4, PERS, SafetyWalk oraz nawierzchni stalowej. Tak jak w pozostałych przypadkach wykonano pomiary porównawcze na maszynach bieżnych (obciążenie 4000 N, ciśnienie regulowane do wartości 210 kPa, prędkość toczenia opony 80 km/h).

Dla obu opon stwierdzono zbieżność metody oscylacyjnej z metodą bębnową, polegającą na identycznym uszeregowaniu otrzymanych wyników na poszczególnych nawierzchniach. Co więcej, niższe wartości współczynnika oporu toczenia oraz oscylacyjnego otrzymano dla tej samej opony „Prototyp 2” (Rysunek 88).



Rysunek 88. Porównanie wyników otrzymanych metodą oscylacyjną oraz bębnową dla opony "Prototyp I" oraz "Prototyp II"

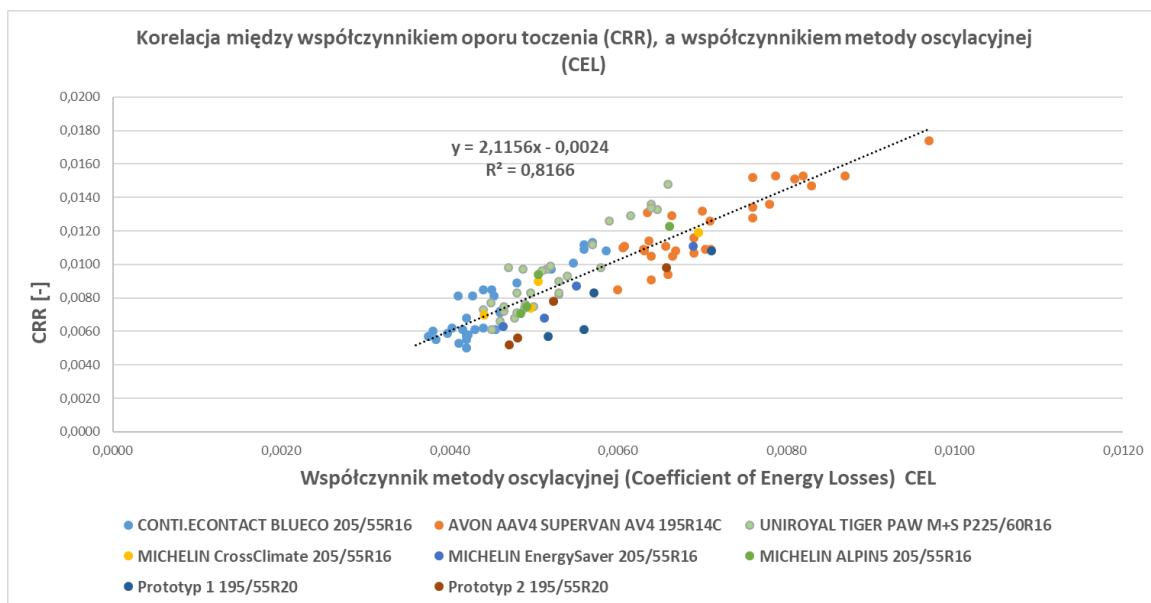
PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W celu zweryfikowania proponowanej metody oscylacyjnej posłużono się kilkoma oponami do samochodów osobowych oraz kilkoma próbkami nawierzchni drogowych charakteryzującymi się różnymi wartościami oporu toczenia. Badania przeprowadzono w różnych warunkach ciśnienia pompowania, obciążenia badanego koła, temperatury opony. Sprawdzone również wpływ sztywności użytych nawierzchni, głębokości profilu oraz porównano między sobą opony różniące się jedynie składem mieszanki gumowej. Uzyskane w ten sposób wyniki porównano z tymi rezultatami uzyskanymi w analogicznych warunkach za pomocą maszyn bieżnych. Na poniższych wykresach przedstawiono zestawienie wszystkich otrzymanych wyników z podziałem ze względu na badane opony (Rysunek 89) oraz podziałem ze względu na badane nawierzchnie (Rysunek 90). Otrzymano korelację dodatnią o współczynniku korelacji Pearsona $R = 0,90$ oraz współczynniku determinacji $R^2 = 0,82$.

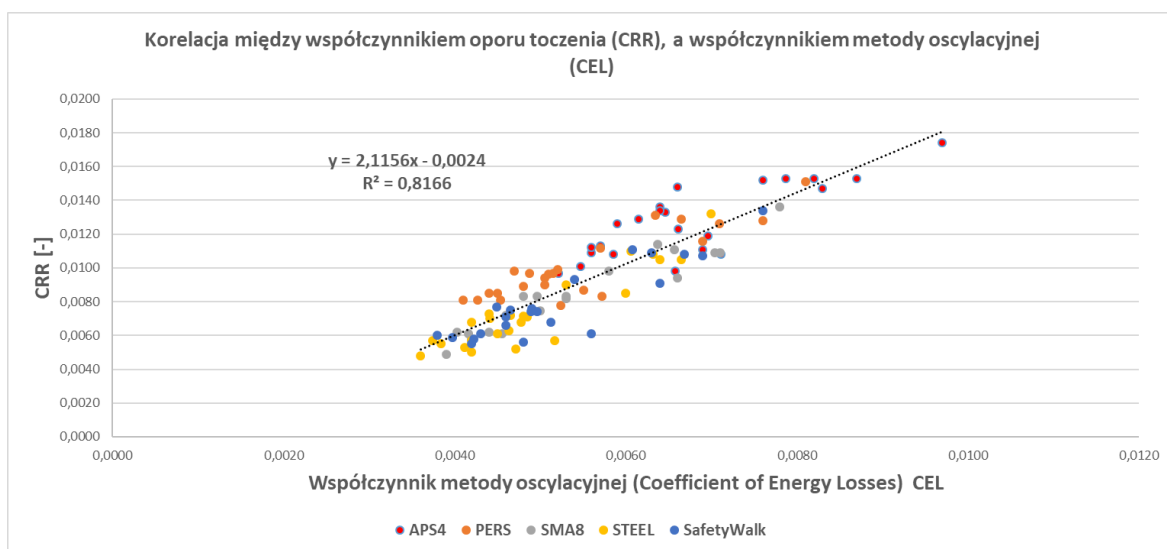
Na wielkość korelacji na pewno mają wpływ wyniki uzyskane dla opony UNIROYAL TIGER PAW SRTT, zwłaszcza na nawierzchniach APS4 i PERS. Punkty im odpowiadające znajdują się po lewej stronie linii trendu (zbyt niskie wartości C_{EL} z punktu widzenia korelacji z C_{RR}). Nawierzchnia APS4 odznacza się wysokim współczynnikiem MPD (jest nawierzchnią bardzo szorstką). Przetaczanie się opony po wysokich ziarnach kruszywa prawdopodobnie wywołuje większe odkształcenia opony, a co za tym idzie straty energii, niż ma to miejsce w trakcie odbicia od niej. Wyniki uzyskane na nawierzchni PERS mogły być zaniżone ze względu na jej specyficzną budowę. Jest to nawierzchnia charakteryzująca się dużą odkształcalnością i sprężystością, a więc część energii towarzysząca uderzeniu opony mogła zostać przez nią skumulowana i oddana w fazie odbicia. Na Rysunku 90 widać, że dla większości pomiarów uzyskanych na tych nawierzchniach mamy do czynienia ze zbyt niskimi wartościami współczynnika C_{EL} .

Wyższy stopień korelacji byłby również możliwy do uzyskania w przypadku zmniejszenia różnic pomiędzy temperaturami badanych opon. Jak wykazano w rozdziale 4.5 metoda oscylacyjna jest bardzo czuła na ten czynnik, a wraz ze wzrostem temperatury maleje wartość współczynnika C_{EL} .

Różnice w materiałach z jakich wykonano nawierzchnię SMA8 (oryginalna nawierzchnia zastosowana w metodzie oscylacyjnej oraz jej replika wykonana z żywicy w metodzie bębnowej) nie mają znaczącego wpływu na wyniki uzyskane metodą oscylacyjną. W zależności od badanej opony różnice mieściły się w przedziale 0,44% - 2,14%.



Rysunek 89. Korelacja między współczynnikiem oporu toczenia, a współczynnikiem metody oscylacyjnej (podział ze względu na badane opony)



Rysunek 90. Korelacja między współczynnikiem oporu toczenia, a współczynnikiem metody oscylacyjnej (podział ze względu na badane nawierzchnie)

Wnioski

1. Wykazano skuteczność proponowanej metody w ocenie oporu toczenia nawierzchni drogowych i opon (współczynnik korelacji Pearsona z metodą bębnową wyniósł 0,90).
2. Dla ustalonych warunków pomiaru (ciśnienie pompowania, obciążenie, temperatura opony) metoda wykazuje wysoką powtarzalność uzyskiwanych wyników.
3. Uzyskano niemal identyczne uszeregowanie wyników jak w metodzie z użyciem maszyn bieżnych. Najwyższe wartości współczynnika C_{EL} otrzymano dla nawierzchni APS4, następnie PERS i SMA8 (wyniki otrzymane na nawierzchni PERS wydają się zbyt niskie, wynika to zapewne ze specyfiki samej nawierzchni, która odznacza się dużą odkształcalnością i sprężystością, a więc część energii towarzysząca uderzeniu opony mogła zostać przez nią skumulowana i oddana w fazie odbicia), SafetyWalk, a najniższe dla stalowej.
4. Metoda oscylacyjna wykazuje znaczną czułość na wartość ciśnienia wewnątrz badanej opony. Pomiary wykazały spadek korelacji z metodą bębnową wraz ze wzrostem ciśnienia pompowania (dla ciśnienia 150 kPa: wsp. Pearsona = 0,95, dla 210 kPa: wsp. Pearsona = 0,91, a dla 270 kPa: wsp. Pearsona = 0,87).
5. Zastosowane obciążenie badanej opony ma nieznaczny wpływ na stopień korelacji z metodą bębnową (niewielki wzrost współczynnika korelacji Pearsona wraz ze wzrostem obciążenia).
6. Metoda oscylacyjna jest bardzo czuła na zmiany temperatury badanej opony. Różnice w otrzymywanych wynikach w zakresie temperatur od 5 °C do 35 °C sięgają 30% - 48% w zależności od badanej nawierzchni i opony.
7. Różnice między wynikami otrzymanymi na rzeczywistych próbkach nawierzchni, a tymi otrzymanymi na ich replikach są niewielkie (poniżej 5%).
8. Metoda oscylacyjna potwierdza występowanie zjawiska envelopingu. Współczynnik C_{EL} rośnie wraz ze zwiększającą się głębokością profilu nawierzchni, ale tylko do momentu kiedy bieżnik opony osiągnie maksymalne zagłębienie w nierównościach nawierzchni. W przypadku dalszego zwiększania wartości zagłębienia profilu nawierzchni, współczynnik C_{EL} wykazuje w przybliżeniu stałą wartość.
9. Metoda oscylacyjna wykazała podobne różnice jak metoda bębnowa, pomiędzy oponami o identycznej geometrii, różniącymi się jedynie mieszanką gumową.
10. Metoda oscylacyjna posiada przewagę nad metodą bębnową pod względem:
 - o możliwości użycia rzeczywistych próbek nawierzchni,
 - o niskiego kosztu uzyskania próbek nawierzchni do badania (wymagana jest próbka o polu niewiele większym niż ślad styku opony z nawierzchnią, gdzie w metodzie bębnowej należy wykonać komplet replik w formie łusek, pozwalających pokryć cały obwód bębna),
 - o niskiego kosztu budowy stanowiska pomiarowego,
 - o czasu pomiaru (metoda umożliwia natychmiastowy pomiar, w odróżnieniu od metody bębnowej, gdzie wymagany jest 30 minutowy czas nagrzewania opony).

11. Do ograniczeń metody oscylacyjnej należą:
 - o uzyskane wyniki mogą posłużyć jedynie do oszacowania współczynnika oporu toczenia (obecny algorytm nie pozwala na bezpośrednie przeliczanie C_{EL} na C_{RR}),
 - o Ze względu na dużą czułość metody na temperaturę, stanowisko pomiarowe musi znajdować się w klimatyzowanym pomieszczeniu, gdzie panuje niewielka amplituda temperatur (podobnie jak w metodzie bębnowej).
12. Metoda może znaleźć zastosowanie podczas wstępnego testowania prototypów nawierzchni drogowych pod kątem ich wpływu na wartość współczynnika oporu toczenia. Może posłużyć jako wstępne kryterium mające na celu odrzucenie nawierzchni o skrajnych wartościach, w celu ograniczenia do minimum liczby budowanych kosztownych odcinków testowych, czy replik nawierzchni na stanowisko bębnowe.

Warto również podkreślić, iż metoda wraz z uzyskanymi za jej pomocą wynikami pomiarów zostały przedstawione w artykule: **Ejsmont J., Owczarzak W., *Engineering method of tire rolling resistance evaluation, MEASUREMENT. -Vol. 145, (2019), s.144-149 [32]* (liczba punktów: 200, zgodnie z wykazem czasopism naukowych MNiSW).**

Zamierzenia dotyczące dalszego rozwoju metody oscylacyjnej.

Autor planuje wykorzystać opisaną metodę przy badaniach envelopingu prowadzonych przez mgr inż. Sławomira Sommera. Badanie próbek nawierzchni w których sukcesywnie wypełniane żywicą są wgłębienia tekstury, pozwoli określić jak głęboko nierówności nawierzchni wnikają w materiał opony. W założeniu współczynnik oscylacyjny powinien zmienić się, gdy w trakcie oscylacji wystąpi styk elementów bieżnika z wypełnieniem znajdującym się w zagłębieniach nawierzchni.

Wykaz literatury

1. Reimpell J., Betzler J.: Podwozia samochodów Podstawy konstrukcji, WKŁ, Warszawa 2001, s.456.
2. Taryma S., Opór toczenia opon samochodowych, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2007
3. 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
4. Ejsmont J., Świczko-Żurek B., Ronowski G., Opór toczenia opon samochodowych, Magazyn Autostrady, 7/2014
5. Norma ISO 28580:2018 Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method - single point test and correlation of measurement results
6. Clark S.K., A brief history of tire rolling resistance, Symposium on Tire Rolling Resistance at 122nd Meeting of Rubber Division, American Chemical Society at Chicago, Illinois, October 5-7, 1982
7. Warholic T.C., Rolling resistance performance of passenger car tires during warm-up (speed, load and inflation pressure effects), Symposium on Tire Rolling Resistance at 122nd Meeting of Rubber Division, American Chemical Society at Chicago, Illinois, October 5-7, 1982
8. Taryma S., Mioduszewski P., Woźniak R., Ejsmont J., Aspekty zużycia opon samochodowych, W:(Materiały) Konferencja naukowa KONMOT 96, Perspektywy Rozwojowe Konstrukcji, Technologii i Eksploatacji Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Kraków – Szczawnica, 23-25.10.1996, T.2, Pojazdy Samochodowe, Konstrukcja i Badania, s.219-228
9. Taryma S., Analiza wpływu czynników eksploatacyjnych na opór toczenia opony. Czasopismo Techniczne Mechanika, Pojazdy Samochodowe, T.2, Z. 7M/2004. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004, s.621-628
10. Taryma S.: Opór toczenia bieżnikowanych opon samochodowych, W: (Materiały) Konferencja MECHANIA 99 „Nauka i Praktyka”, Gdańsk 25-26.11.1999, s.247-252
11. Ejsmont J., Taryma S., Wilga M., Woźniak R.: Pomiar oporów toczenia opon samochodowych. W: (Materiały) IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Pojazdy samochodowe. Problemy rozwoju i eksploatacji”, AUTOPROGES 93, Jachranka k. Warszawy, 1993, s. 284-296
12. Taryma S., Ronowski G.: Opór toczenia opon z kierunkową rzeźbą bieżnika, W: (Materiały) VII Międzynarodowe Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych Wojskowej Akademii Technicznej „Doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych, Warszawa – Rynia, 08-10.12.1999, Materiały Sympozjum, s.611-618
13. Taryma S., Mioduszewski P.: Budowa opony a jej opór toczenia, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, „Konstrukcja, Badania, Eksploatacja, Technologia Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Kraków, 2000, Zesz. 20, s.33-41
14. Ejsmont J., Woźniak R., Taryma S., Mioduszewski P., Wilga P.: Wpływ rzeźby bieżnika na opór toczenia opon samochodowych, W: (Materiały) V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: „Pojazdy Samochodowe. Problemy rozwoju i eksploatacji”, AUTOPROGRES 95, Jachranka k. Warszawy, 17-19.05.1995, s.21-28
15. Norma ISO 13473-5:2009(en) Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 5: Determination of megatexture
16. Mioduszewski P.: Badanie tekstury nawierzchni drogowej, Międzynarodowa Konferencja Motoryzacyjna „AUTOPROGRES-KONMOT 2002”, Doskonalenie Konstrukcji Technologii i Eksploatacji Pojazdów, Pasym k/Olsztyna, 21-24.05.2002, Materiały Konferencyjne, Konstrukcja i Badania, tom 3, s. 251-260
17. Sandberg U: Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety, VTI Notat 53A-1997, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden, 1997

18. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B.: Methods of Tire Rolling Resistance Measurements. COTUME'2014, Congrès Tunisien de Mécanique, Sousse, Tunisie 2014
19. Ejsmont J., Ronowski G., Taryma S., Świeczko-Żurek B.: Wpływ równości nawierzchni na opór toczenia opon, *Archiwum Motoryzacji*, Vol.70, no.4, s.121-132
20. Norma ISO 13473-2:2002(en) Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis
21. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko-Żurek B., Sommer S: Road texture influence on tyre rolling resistance, *Road Materials and Pavement Design*, 2016
22. Ronowski G.: Układ kompensacji wpływu wzniesienia oraz przyspieszenia w przyczepie do badania oporu toczenia, *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*,
23. Ronowski G.: Design and calibration of rolling resistance test trailer R2mk.2. Scientific Conference on Automotive Vehicles and Combustion Engines (KONMOT 2016) IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering
24. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko-Żurek B.: Accurate rolling resistance; Rolling resistance measurements can be influenced by a number of factors, *Tire Technology International* 2017
25. Ejsmont J., Motrycz G., Ronowski G., Stryjek P., Sobieszczyk S., *Laboratoryjne badania oporu toczenia i temperatury opon do pojazdów specjalnych*
26. Ejsmont J., Taryma S., Ronowski G., Świeczko-Żurek B.: Influence of load and inflation pressure on the tyre rolling resistance, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 237–244 (2016)
27. Ejsmont J., Taryma S., Ronowski G., Świeczko-Żurek B.: Influence of temperature on the tyre rolling resistance, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 45–54 (2018)
28. Taryma S.: Analiza wpływu wybranych czynników konstrukcyjnych na opór toczenia opon samochodowych, *MECHANICS AND MECHANICAL ENGINEERING*, Vol. 10 No. 5 ,2005
29. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Ronowski G.: Sposób formowania repliki nawierzchni drogowej zwłaszcza do maszyn bieżnych z bębniem zewnętrznym i replika nawierzchni drogowej uformowana tym sposobem, *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*, zgłoszenie patentowe nr 413356, data zgłoszenia 31.07.2015
30. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko-Żurek B.: Sposób wytwarzania form do replik nawierzchni drogowych i forma do replik nawierzchni drogowych, *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*, zgłoszenie patentowe nr 413355, data zgłoszenia 31.07.2015
31. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko-Żurek B., Sommer S., Owczarzak W.: Sposób i urządzenie do laboratoryjnej oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności, *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*, numer prawa wyłącznego 229187, data udzielenia patentu 29.06.2018
32. Ejsmont J., Owczarzak W., *Engineering method of tire rolling resistance evaluation*, *MEASUREMENT*. -Vol. 145, (2019), s.144-149

Wykaz ilustracji

Rysunek 1. Schemat sił działających na toczące się koło samochodowe (materiał własny)	12
Rysunek 2. Wpływ prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia, ciśnienie 230kPa, nawierzchnia stalowa (materiał własny).....	14
Rysunek 3. Wpływ prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia, ciśnienie 210kPa, nawierzchnia ISO (materiał własny).....	14
Rysunek 4. Wpływ prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia, ciśnienie regulowane 210kPa, nawierzchnia PERS, (materiał własny)	15
Rysunek 5. Zależność siły oporu toczenia od obciążenia przy prędkości 80 km/h [24]	15
Rysunek 6. Wpływ obciążenia na wartość współczynnika oporu toczenia przy ciśnieniu 210 kPa oraz prędkości 80 km/h [24]	16
Rysunek 7. Zależność pomiędzy współczynnikiem oporu toczenia, a ciśnieniem dla różnych opon [24]	17
Rysunek 8. Zależność pomiędzy współczynnikiem oporu toczenia, a ciśnieniem dla różnych nawierzchni drogowych[24].....	17
Rysunek 9. Zależność współczynnika oporu toczenia w zależności od kombinacji obciążenia i ciśnienia dla różnych opon i nawierzchni [24].....	18
Rysunek 10. Zależność siły i współczynnika oporu toczenia od prędkości dla opony stosowanej w samochodach osobowych o rozmiarze 145R13 w różnym stopniu zużycia [2]	19
Rysunek 11. Termogram przedstawiający różnice temperatur w różnych obszarach opony (materiał własny)	19
Rysunek 12. Wpływ czynników zewnętrznych na temperaturę opony [25]	20
Rysunek 13. Temperatuty poszczególnych stref opony podczas toczenia (materiał własny)....	20
Rysunek 14. Porównanie wyników przed i po zastosowaniu korekcji temperaturowej (materiał własny)	21
Rysunek 15. Komora termostatyczna stosowana w laboratorium Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej (materiał własny)	22
Rysunek 16. Wymiennik ciepła stosowany w laboratorium Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej (materiał własny)	22
Rysunek 17. Zależność współczynnika oporu toczenia od temperatury powietrza dla różnych opon na nawierzchni DAC16 [25].....	23
Rysunek 18. Zależność współczynnika oporu toczenia od temperatury powietrza dla różnych opon na nawierzchni SMA8 (materiał własny)	24
Rysunek 19. Zależność współczynnika oporu toczenia od temperatury powietrza dla różnych opon na nawierzchni stalowej (materiał własny)	24
Rysunek 20. Wpływ temperatury powietrza na współczynnik oporu toczenia dla opony T1077 na różnych nawierzchniach przy prędkości 80 km/h [25].....	25
Rysunek 21. Uśrednione wartości nachylenia regresji liniowej na wszystkich nawierzchniach [25].....	25
Rysunek 22. Bieżnik opony z lamelkami naciętymi pod kątem α w stosunku do promienia koła [2].....	26
Rysunek 23. Opór toczenia opon kierunkowych z drogową rzeźbą bieżnika, toczonych zgodnie i przeciwnie do kierunku oznaczonego na oponie na nawierzchni SW-80 [2]	27
Rysunek 24. Opór toczenia opon kierunkowych z drogową rzeźbą bieżnika, toczonych zgodnie i przeciwnie do kierunku oznaczonego na oponie na nawierzchni APS-4 [2].....	27
Rysunek 25. Zależność współczynnika oporu toczenia od szerokości opony [11].....	28

Rysunek 26. Zależność współczynnika oporu toczenia od stosunku wysokości do szerokości opony [11].....	29
Rysunek 27. Zmiana współczynnika oporu toczenia w zależności od kolejnych faz nacinania wzoru bieżnika [12].....	30
Rysunek 28. Zależność współczynnika oporu toczenia od prędkości [12]	30
Rysunek 29. Główne składowe przyczepności gumy: adhezja i histereza [26]	32
Rysunek 30. Częstotliwości odkształceń bieżnika opony w funkcji długości fali nierówności dla prędkości jazdy $V=20\text{m/s}$ [26]	32
Rysunek 31. Porównanie właściwości opon z silikonową mieszanką gumową z właściwościami opon z tradycyjną mieszanką gumową bieżnika [26]	33
Rysunek 32. Ilustracja poszczególnych zakresów tekstury nawierzchni drogowej [14]	34
Rysunek 33. Zakresy tekstury i ich wpływ na współpracę opony z nawierzchnią [15]	34
Rysunek 34. Wyznaczanie współczynnika MPD (Mean Profile Depth (a) [18]; Otulanie (enveloping) nawierzchni jezdni przez elementy bieżnika opony (b) [4]	35
Rysunek 35 Powierzchnia styku pomiędzy oponą, a nawierzchnią drogową o różnej teksturze [19].....	36
Rysunek 36. Przyczepa R ² Mk.2 do pomiaru współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni [22].....	37
Rysunek 37. Ustrój pomiarowy przyczepy R ² Mk.2.....	37
Rysunek 38. Metoda pomiaru współczynnika oporu toczenia (C_{RR}) przy wykorzystaniu odchylanego wahacza pomiarowego (a) oraz schemat ustroju pomiarowego przyczepy R ² Mk.2 (b) [20]	38
Rysunek 39. Schemat budowy maszyny bieżnej do badania oporu toczenia opon samochodowych (a) [2], maszyny bieżne będące na wyposażeniu Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej: bęben o średnicy 2 m (b), bęben o średnicy 1,7 m (c) materiał własny	40
Rysunek 40. Nawierzchnie Safety Walk (a), stalowa (b) oraz SMA8 (c) materiał własny	41
Rysunek 41. Nawierzchnie APS4 (a) oraz PERS (b) materiał własny	42
Rysunek 42 Schemat przedstawiający sposób formowania repliki nawierzchni drogowej do maszyn bieżnych z bębniem zewnętrznym	43
Rysunek 43. Proces tworzenia warstwy elastycznej stanowiącej negatywowe odwzorowanie nawierzchni drogowej	43
Rysunek 44. Wierzchnia warstwa repliki składająca się z żelkotu wymieszanego z drobno pociętym włóknem szklanym (a); gotowa replika (b).....	44
Rysunek 45. Schemat przedstawiający ideę działania metody oscylacyjnej	46
Rysunek 46. Schemat urządzenia do pomiaru oporu toczenia metodą oscylacyjną	47
Rysunek 47. Laserowy czujnik położenia ILD 1401-50 przymocowany do stanowiska (a); kasetka pomiarowa NI USB-6216 BNC wraz z komputerem obsługującym program rejestrujący przebieg odbicia badanej opony (b); zrzut z ekranu komputera przedstawiający interfejs programu (program napisany przez dr hab. inż. Grzegorza Ronowskiego prof. nadzw. PG)(c)	48
Rysunek 48. Widok urządzenia do wykonywania pomiarów metodą oscylacyjną	49
Rysunek 49. Zrzut ekranu przedstawiający program służący do wyznaczania współczynnika tłumienia drgań (program napisany przez dr inż. Michała Mazura). a-charakterystyki amplitudowe przed dopasowaniem (niebieska przedstawia przebieg rzeczywisty, czerwona wygenerowany przez model matematyczny); b-charakterystyki amplitudowe po dopasowaniu	58
Rysunek 50. Przebieg przykładowej charakterystyki sztywności promieniowej dla opony AVON AAV4 przy ciśnieniu pompowania 210kPa; F_{nom} – 75% obciążenia maksymalnego, f – ugięcie opony	60

Rysunek 51. Korelacja między wynikami uzyskanymi przy pomocy metody nr 1	61
Rysunek 52. Przykład otrzymanej charakterystyki amplitudowej (a); wyznaczone obwiednie (b)	62
Rysunek 53. Korelacja między wynikami uzyskanymi przy pomocy metody nr 2	63
Rysunek 54. Wpływ zagłębienia profilu nawierzchni na wyniki otrzymane dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4 przy pomocy metody oscylacyjnej.....	67
Rysunek 55. Wpływ zagłębienia profilu nawierzchni na wyniki otrzymane dla opony Continental Conti.Econtact BLUECO przy pomocy metody oscylacyjnej	68
Rysunek 56. Wpływ zagłębienia profilu nawierzchni na wyniki otrzymane dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT przy pomocy metody oscylacyjnej	69
Rysunek 57. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony AVON AAV4 przy różnych ciśnieniach pompowania na nawierzchni APS4	71
Rysunek 58. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (C_{EL}) oraz bębnowej (C_{RR}) przy ciśnieniach 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa dla różnych nawierzchni dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4	71
Rysunek 59. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony Continental BLUECO przy różnych ciśnieniach pompowania na nawierzchni APS4	72
Rysunek 60. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (C_{EL}) i bębnowej (C_{RR}) przy ciśnieniach 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa dla różnych nawierzchni dla opony Continental BLUECO	73
Rysunek 61. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S przy różnych ciśnieniach pompowania na nawierzchni APS4	73
Rysunek 62. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (C_{EL}) i bębnowej (C_{RR}) przy ciśnieniach 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa dla różnych nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S	74
Rysunek 63. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej przy ciśnieniu pompowania 150kPa.....	76
Rysunek 64. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej przy ciśnieniu pompowania 210kPa.....	76
Rysunek 65. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej przy ciśnieniu pompowania 270kPa.....	77
Rysunek 66. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony AVON AAV4 przy zastosowaniu różnych obciążeń	79
Rysunek 67. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (przy obciążeniach 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4	79
Rysunek 68. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony Continental BLUECO przy zastosowaniu różnych obciążeń.....	80
Rysunek 69. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (obciążenia 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony CONTINENTAL CONTI.ECOCONTACT BLUECO	81
Rysunek 70. Porównanie charakterystyk amplitudowych uzyskanych dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S przy zastosowaniu różnych obciążeń.....	81
Rysunek 71. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej (obciążenia 52kg, 62kg i 72kg) oraz bębnowej (obciążenia 408kg, 488kg i 567kg) dla różnych nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S	82
Rysunek 72. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej (przy przy obciążeniu 52kg dla metody oscylacyjnej i 408kg dla metody bębnowej)	84



Rysunek 73. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej (przy przy obciążeniu 62kg dla metody oscylacyjnej i 488kg dla metody bębnowej)	85
Rysunek 74. Korelacja wyników otrzymanych przy pomocy metody oscylacyjnej i bębnowej (przy przy obciążeniu 52kg dla metody oscylacyjnej i 567kg dla metody bębnowej)	85
Rysunek 75. Repliki nawierzchni drogowych: APS4 (1), PERS (2), SMA8 (3) (materiał własny)	86
Rysunek 76. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)	87
Rysunek 77. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)	88
Rysunek 78. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)	89
Rysunek 79. Próbkki nawierzchni różniące się głębokością profilu	90
Rysunek 80. Porównanie głębokości profilu nawierzchni	90
Rysunek 81. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)	91
Rysunek 82. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profiu (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)	92
Rysunek 83. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)	93
Rysunek 84. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (AVON AAV4 SUPERVAN AV4 na nawierzchniach APS4 i stalowej)	94
Rysunek 85. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO na nawierzchniach APS4 i stalowej)	95
Rysunek 86. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT na nawierzchniach APS4 i stalowej)	96
Rysunek 87 Porównanie współczynników oporu toczenia otrzymanych przy pomocy metody bębnowej w przedziale temperatur powietrza od -15°C do 25°C	97
Rysunek 88. Porównanie wyników otrzymanych metodą oscylacyjną oraz bębnową dla opony "Prototyp I" oraz "Prototyp II"	98
Rysunek 89. Korelacja między współczynnikiem oporu toczenia, a współczynnikiem metody oscylacyjnej (podział ze względu na badane opony)	100
Rysunek 90. Korelacja między współczynnikiem oporu toczenia, a współczynnikiem metody oscylacyjnej (podział ze względu na badane nawierzchnie)	100

Wykaz tabel

Tabela 1 Czas trwania ugięcia wybranych opon.....	51
Tabela 2. Zestawienie badanych opon	53
Tabela 3. Zestawienie badanych nawierzchni drogowych.....	55
Tabela 4. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 oraz ich replikach dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4; (r) - replika nawierzchni wykonana z żywicy	66
Tabela 5. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach różniących się głębokością profilu nawierzchni dla opony AVON AAV4 SUPERVAN AV4	66
Tabela 6. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 oraz ich replikach dla opony ONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO; (r) - replika nawierzchni odlana z żywicy	67
Tabela 7. Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach różniących się głębokością profilu nawierzchni dla opony CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO	68
Tabela 8 Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach APS4, PERS, SMA8 oraz ich replikach dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT; (r) - replika nawierzchni wykonana z żywicy.....	69
Tabela 9 Porównanie wyników otrzymanych na nawierzchniach różniących się głębokością profilu nawierzchni dla opony UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT	69
Tabela 10. Zestawienie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej oraz bębnowej przy ciśnieniu pompowania 150 kPa, 210 kPa oraz 270 kPa	74
Tabela 11. Zestawienie wyników otrzymanych za pomocą metody oscylacyjnej oraz bębnowej przy obciążeniu 52kg, 62kg i 72kg (metoda oscylacyjna) oraz 408kg, 488kg i 567kg (metoda bębnowa).....	83
Tabela 12. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)	87
Tabela 13. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)	88
Tabela 14. Porównanie wyników otrzymanych na oryginalnych nawierzchniach oraz ich replikach (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT).....	89
Tabela 15. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (opona AVON AAV4 SUPERVAN AV4)	91
Tabela 16. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO)	92
Tabela 17. Wyniki otrzymane na nawierzchniach różniących się głębokością profilu (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT)	92
Tabela 18. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (AVON AAV4 SUPERVAN AV4 na nawierzchniach APS4 i stalowej)	94
Tabela 19. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (CONTINENTAL CONTI.ECONTACT BLUECO na nawierzchniach APS4 i stalowej)	94
Tabela 20. Wyniki wpływu temperatury opony na wartość współczynnika oscylacyjnego (UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT na nawierzchniach APS4 i stalowej)	95

