

# WYBRANE WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE OKŁADZIN CIERNYCH HAMULCÓW TARCZOWYCH

ANDRZEJ GAJEK<sup>1</sup>, WOJCIECH SZCZYPIŃSKI-SALA<sup>2</sup>

Politechnika Krakowska

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentów, których celem było zbadanie wpływu zamodelowanych warunków eksploatacji i otoczenia na współczynnik tarcia pary cierniej hamulca tarczowego. Przeprowadzono analizę ich wpływu na rozrzut wartości tego współczynnika. Badania wykonano na odpowiednio oprzyrządowanym stanowisku badawczym w warunkach laboratoryjnych. Parę cierną modelował układ materiałów, stosowany w hamulcach samochodów osobowych, złożony z żeliwnej tarczy hamulca i kompozytowych nakładek ciernych. Badano przebiegi współczynnika tarcia w parze cierniej dla różnych warunków eksploatacji (prędkości obrotowej tarczy hamulcowej, ilości cykli hamowania) oraz czynników otoczenia (pojawienie się w obszarze tarcia wody, płynu hamulcowego). Badano również zmiany chropowatości powierzchni żeliwnej tarczy hamulcowej wynikające z zastosowania różnych materiałów ciernych nakładek oraz założonych na stanowisku badawczym warunków i parametrów eksploatacyjnych. Zarejestrowane podczas badań przebiegi funkcyjne oraz wartości mierzonych parametrów posłużyły do przeprowadzenia prac analitycznych. W pracy w syntetycznej formie przedstawiono wyniki i wnioski z badań, które mają zastosowanie w analizie kryteriów dopuszczalnej nierówności sił hamujących, mierzonych na rolkowych stanowiskach diagnostycznych.

**Słowa kluczowe:** hamulce tarczowe, okładziny cierne, współczynnik tarcia, zawilgocenie.

## 1. Wstęp

Układ hamulcowy jest podstawowym układem w pojeździe, odpowiadającym za bezpieczeństwo czynne. Jego skuteczne, sprawne i niezawodne działanie stanowi główny warunek bezpiecznego użytkowania samochodu. Długość drogi hamowania pojazdu uzależniona jest między innymi od momentu hamującego uzyskanego na kołach dzięki działaniu mechanizmu hamulcowego. Z pewnym uproszczeniem, można przyjąć, że moment hamujący na jedno koło jest iloczynem siły tarcia uzyskanej pomiędzy okładziną cierną

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, e-mail: gajeka@mech.pk.edu.pl, tel.: 12 628 35 46

<sup>2</sup> Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, e-mail: ws@.mech.pk.edu.pl, tel.: 12 628 35 40

a tarczą lub bębniem hamulcowym i promieniem równym wewnętrznemu promieniowi bębna dla hamulca bębnowego lub średniej wartości pomiędzy maksymalnym a minimalnym promieniem styku okładziny ciernej z tarczą dla hamulca tarczowego. W mechanizmach hamulcowych bezpośredni wpływ na moment hamowania ma siła docisku okładziny ciernej do powierzchni tarczy lub do bębna oraz wartość współczynnika tarcia pomiędzy trącymi elementami.

Funkcje układu hamulcowego jak i warunki pracy, w jakich musi on działać narzucają szereg wymagań dla materiałów zastosowanych w skojarzeniu okładziny ciernej z tarczą lub bębniem hamulcowym. Wymogi te wynikają z konieczności spełnienia nie tylko podstawowej roli układu, jaką jest kontrola nad prędkością pojazdu, ale dodatkowo układ hamulcowy powinien gwarantować komfort jazdy. Masowość produkcji pojazdów samochodowych oraz konkurencja cenowa wymusza obniżanie kosztów ich wytwarzania i eksploatacji. Kolejną grupę oczekiwań w stosunku do elementów układu hamulcowego stanowią postulaty niwelowania negatywnego wpływu na środowisko naturalne produktów zużycia się materiałów par trących.

Mimo wprowadzania nowych grup materiałów do konstrukcji hamulcowej pary ciernej, podstawowymi materiałami są nadal żeliwo szare i bezazbestowy, polimerowo-organiczny materiał cierny. Z danych literaturowych wynika, że przy odpowiedniej konstrukcji elementów zespołu hamulca, w zakresie ograniczenia ich obciążenia cieplnego, hamulce wykorzystujące żeliwne tarcze hamulcowe i polimerowo-organiczne nakładki cierne stanowią bardzo efektywne rozwiązanie z punktu widzenia skuteczności hamowania i racjonalizowania kosztów produkcji i eksploatacji samochodów. Stanowią nadal przedmiot prac rozwojowych [1,2,4,5].

## 2. Cel i przedmiot badań

Celem pracy było zbadanie wpływu różnych warunków eksploatacji na zmiany współczynnika tarcia w parze ciernej hamulca tarczowego. Badania wykonano na odpowiednio oprzyrządowanym stanowisku badawczym w warunkach laboratoryjnych. Przedmiotem badań była para cierna hamulca samochodu osobowych, złożona z żeliwnej tarczy hamulca i kompozytowych nakładek ciernych.

## 3. Własności materiałów skojarzenia tarcza hamulcowa – nakładka cierna

Obecnie najpowszechniej stosowanym materiałem w produkcji tarcz hamulcowych pojazdów samochodowych jest żeliwo szare. Pomimo iż można wskazać szereg wad tego materiału, takich jak duży ciężar właściwy czy niska odporność korozyjna, to lista zalet przemawia na jego korzyść. Materiał ten charakteryzuje się korzystnymi właściwościami tribologicznymi i niską ceną. Wytwórcy mają dobrze opanowaną technologię produkcji, nie występują też problemy z utylizacją zużytych elementów. Najszerzej stosowane jest

żeliwo szare, w którym wydzielenia grafitu mają postać płatków, choć również wykorzystywane jest żeliwo sferoidalne. Stosowanie odpowiednich dodatków stopowych pozwala na zwiększenie odporności korozyjnej, jednak to rozwiązanie nie jest często stosowane ze względu na związany z tym wzrost kosztów produkcji.

Wprowadzane, w celu obniżenia masy całkowitej pojazdu, innowacje techniczne w konstrukcji tarcz hamulcowych polegające na zmianie materiału lub zastosowanie perforacji, pozwalają zmniejszyć tą masę, jednak konieczność zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej tarczy powoduje, że efekt obniżenia masy przez perforację nie jest tak widoczny, jak przy zastosowaniu innych materiałów np. kompozytów na bazie lekkich stopów metalicznych [1,3,5,7].

Żeliwne tarcze hamulcowe w procesie produkcji kształtowane są poprzez obróbkę mechaniczną odlewów. Półfabrykaty tarcz hamulcowych w postaci odlewów nie powinny posiadać wad odlewniczych, ponieważ podczas eksploatacji ze względu na cykliczny charakter obciążeń tych elementów, wady takie szybko prowadziłyby do uszkodzeń. Tarcze obrabiane są poprzez toczenie, a następnie powierzchnie cierne poddaje się szlifowaniu uzyskując wymagane parametry chropowatości powierzchni roboczej. Usunięcie poprodukcyjnych naprężeń wewnętrznych tarczy pozwala na zmniejszenie ryzyka powstania odkształceń w trakcie użytkowania, stąd przed rozpoczęciem eksploatacji stosuje się odpowiednią obróbkę cieplną, lub proces sezonowania półfabrykatów.

Należy podkreślić, iż z eksploatacyjnego punktu widzenia jedną z najważniejszych cech charakteryzujących żeliwne tarcze hamulcowe jest stan ich powierzchni czynnej (ciernej), ponieważ nie jest ona jednorodna, a dzieli się na obszary grafitu i obszary o strukturze perlityczno - ferrytycznej. Taka budowa powierzchni ciernej wpływa między innymi na tłumienie drgań o dużej częstotliwości.

Podobnie jak dla tarcz hamulcowych tak i dla materiałów ciernych można wskazać ich podstawowe cechy. Należą do nich m.in. zdolność do tłumienia drgań, są z reguły izolatorami ciepła i mają odmienną od żeliwa charakterystykę przewodzenia ciepła, w procesie ścierania emitują produkty zużycia do środowiska naturalnego.

Składniki materiału ciernego można podzielić na cztery podstawowe grupy. Strukturalne zapewniają odpowiednie parametry wytrzymałościowe materiału. Najczęściej mają postać włókien a ich chemicznie uaktywniona powierzchnia powinna zapewnić dobre połączenie z substancją wiążącą. Ze względu na przewodnictwo cieplne, włókna metaliczne pełnią dodatkową funkcję, jaką jest odprowadzanie ciepła z materiału ciernego. Przy odpowiedniej orientacji i budowie włókien możliwe jest uzyskanie kierunkowej charakterystyki przewodzenia ciepła. Składniki wiążące służą spojeniu składników materiału ciernego. Zazwyczaj w tym celu wykorzystywane są żywice fenolowe lub kauczuk syntetyczny. Pozostałe dwie grupy to składniki wypełniające (tzw. napełniacze) oraz modyfikatory tarcia. Ta ostatnia grupa składników służy zapewnieniu stabilnej wartości współczynnika tarcia podczas pracy układu hamulcowego w szerokim zakresie warunków eksploatacji. Są to między innymi siarczki metali, grafit, koks, tlenek glinu, baryt, kreda, piasek cyrkonowy [1,2,4,6].

Obecnie najszersze zastosowanie w hamulcach pojazdów samochodowych znajduje grupa materiałów określaną jako bezazbestowe organiczne materiały cierne. Podstawowym

składnikiem strukturalnym są różnego rodzaju włókna. Stosowane są włókna metaliczne, szklane, aramidowe, mineralne.

Wytrzymałość mechaniczna materiałów ciernych zależy głównie od rodzaju składników strukturalnych i substancji spajającej. Odporność termiczna wynika z cech składników organicznych, które jako pierwsze ulegają degradacji pod wpływem podwyższonych temperatur. Typowa kompozycja organicznego materiału ciernego zawiera ponad dwadzieścia składników.

Cechą charakterystyczną tego typu materiałów jest niskie przewodnictwo cieplne. Dla pracy skojarzenia oznacza to, że zdecydowana większość generowanego ciepła tarcia jest przekazywana do tarczy hamulcowej. W celu sprostania rosnącym wymaganiom dotyczącym obciążeń cieplnych hamulców, wprowadzono materiały o zwiększonej zawartości składników metalicznych. Składniki metaliczne mogą pełnić zarówno funkcje strukturalne, stanowić osnowę okładziny jak i wypełniające. W pierwszym przypadku występują w postaci włókien, w drugiej w postaci proszków. Składniki metaliczne mają decydujący wpływ na właściwości termiczne materiału ciernego. Im wyższa jest ich zawartość, tym lepsze jest przewodnictwo cieplne. Pozytywnym skutkiem wyższej przewodności cieplnej jest szybsze odprowadzanie ciepła ze strefy tarcia. Wiąże się to z koniecznością izolowania okładziny od tarczy zacisku hamulcowego, w celu zapobieżenia przekazywaniu nadmiernych ilości ciepła do płynu hamulcowego [5,6,7].

Proces wytwarzania nakładek ciernych jest uzupełniany o obróbkę cieplną wygrzewaniem, która pozwala na poprawę wskaźników eksploatacyjnych nakładek pracujących w warunkach wysokiej temperatury spowodowanej użytkowaniem hamulców przy wielokrotnych intensywnych hamowaniach. Podczas wygrzewania zachodzi odgazowanie sprasowanego półfabrykatu materiału ciernego. Powyższy proces zapobiega utracie czerności pomiędzy elementami pary trącej hamulca spowodowanej powstaniem fazy gazowej podczas hamowania w ekstremalnych warunkach eksploatacji.

#### 4. Wyniki badań współczynnika tarcia pary cierniej hamulca

Zbadanie wpływu stanu pary cierniej hamulca tarczowego na współczynnik tarcia oraz ocena zmian jego wartości ma istotne znaczenie dla analizy procesu hamowania. Celem tej części badań było określenie wpływu rodzaju okładzin ciernych hamulca tarczowego w stanie nominalnym na wartość i rozrzut współczynnika tarcia tej pary cierniej. Wyniki tych badań powinny być uwzględniane przy ustalaniu dopuszczalnych wartości nierówności sił hamujących w badaniach diagnostycznych hamulców na stanowiskach rolkowych [9].

Na stanowisku badawczym przyjęto następujące warunki badań:

- zakres zmienności wartości prędkości obrotowej tarczy hamulcowej od 26.2 do 87.2 rd/s, co odpowiada prędkości liniowej samochodu od 30 do 100 km/godz,
- średni promień siły tarcia 0.092 m,
- nacisk jednostkowy pomiędzy elementami pary trącej 320÷530 N/cm<sup>2</sup>, co odpowiada

ciśnieniu w układzie hamulcowym modelowego samochodu osobowego 6÷10 MPa, a więc ciśnieniu odpowiadającemu intensywnemu hamowaniu,

- parę cierną stanowiły układy tribologiczne, złożone z nakładek, w których materiał cierne wykonano według czterech różnych technologii oraz tarcz żeliwnych, których powierzchnia trąca była szlifowana, a wartość chropowatości  $R_a$  wynosiła 0,25  $\mu\text{m}$ .

W rezultacie przeprowadzonych eksperymentów, uzyskane wartości współczynnika tarcia dla par ciernych złożonych z żeliwnych tarcz hamulcowych o ww. parametrze chropowatości oraz nakładek ciernych wytworzonych wg różnych technologii (różnych producentów) przedstawiono w Tabeli 1.

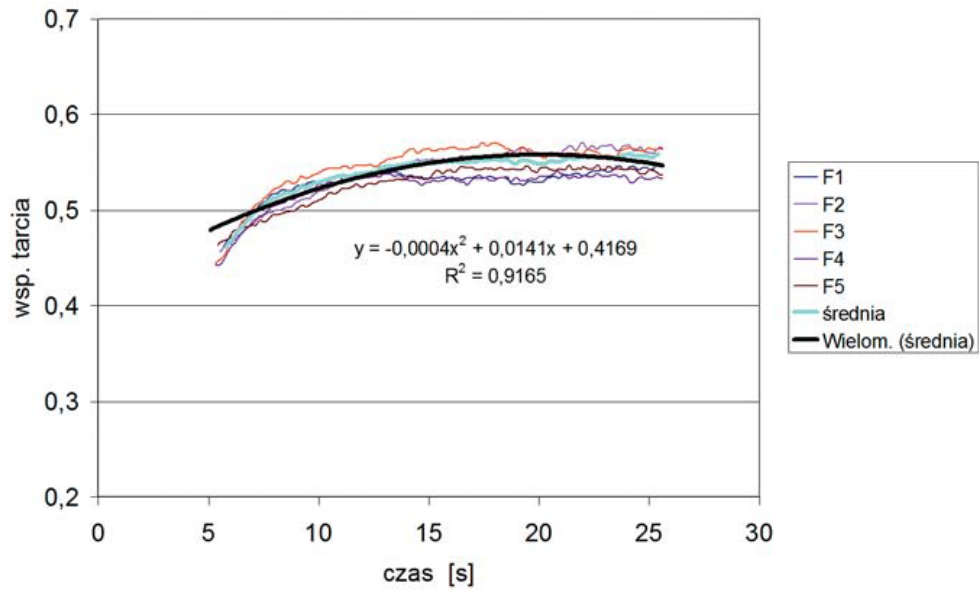
**Tabela.1 Średnie wartości współczynnika tarcia badanych par ciernych**

Technologia (producent)	Średnia wartość współczynnika tarcia $\mu_{sr}$	Odchylenie standardowe $S(\mu)$	$S(\mu)/\mu_{sr}$ [%]
I	0,54	0,005 - 0,02	0,9 - 3,5
II	0,55	0,01 - 0,02	2,4 - 3,8
III	0,53	0,02 - 0,03	1,3 - 5,8
IV	0,39	0,005 - 0,01	1,3 - 2,6

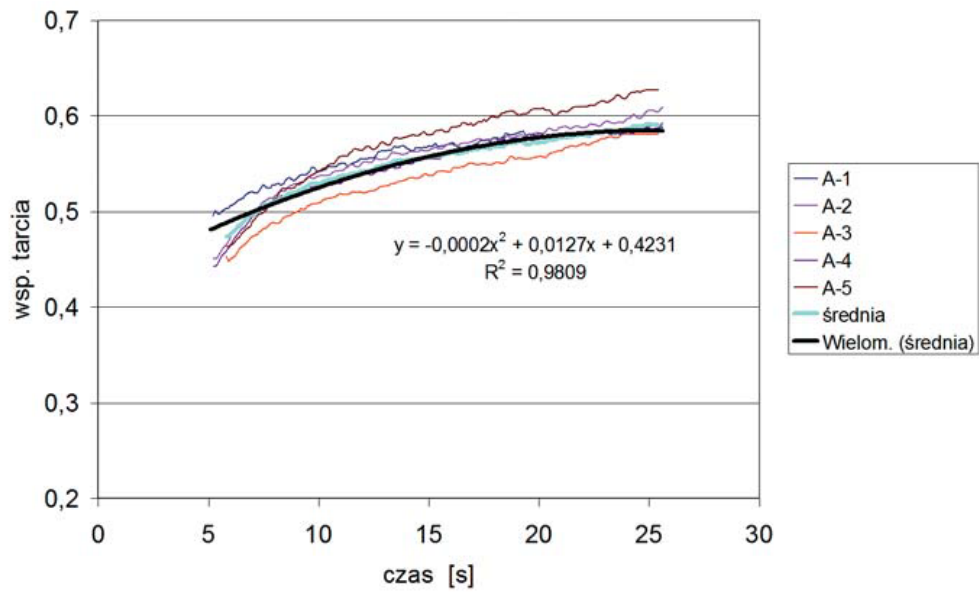
Zaobserwowano znaczny rozrzut wartości współczynnika tarcia, wahający się w przedziale od 0.39÷0.54 (tabela 1). Przeprowadzone obserwacje stanu powierzchni tarcia poparte badaniami spektrograficznymi wykazały, że w okładzinach hamulcowych poszczególnych producentów istnieją wyraźne różnice w granulacji i rozmieszczeniu poszczególnych składników tworzywa, w stopniu sprasowania i zwięzłości struktury, w ilości i rozłożeniu wypełniacza i metalowych opiłków odprowadzających ciepło z powierzchni tarcia. Wskazane powyżej czynniki mają istotny wpływ na współczynnik tarcia i charakterystykę współpracy w parze ciernej hamulca.

Podczas pojedynczego zahamowania współczynnik tarcia dla układów ciernych złożonych z materiałów różnych producentów ulegał zmianie – zwiększeniu o 5 - 40%, rys. 1 ÷ 4. Poszczególne próby hamowania odpowiadały warunkom długotrwałego, normalnego hamowania na drodze. Najmniejsze zmiany wartości współczynnika tarcia zarejestrowano dla okładzin producenta nr IV.

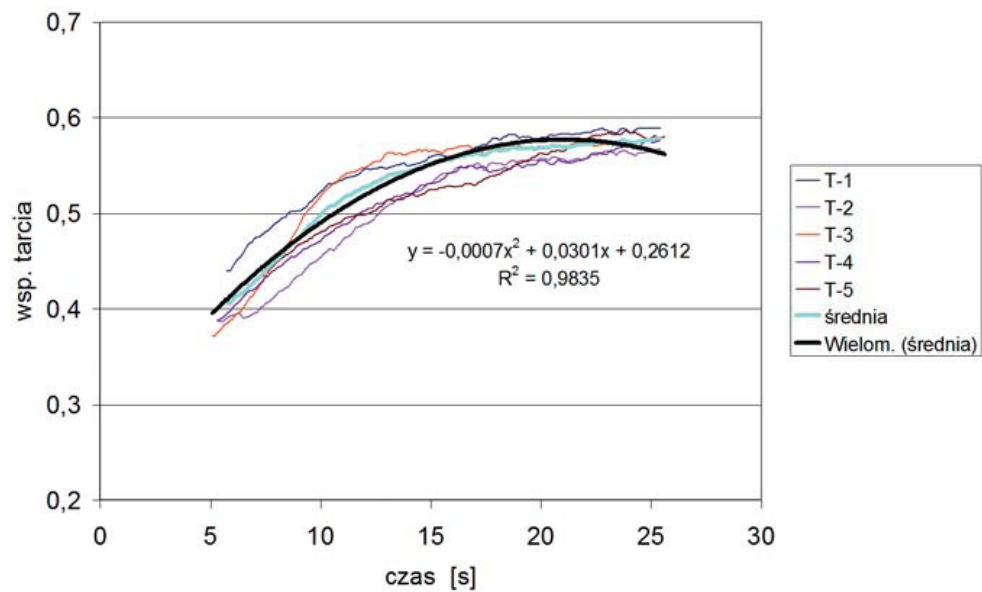
Przeprowadzone badania wykazały, że zmiany w wartości współczynnika tarcia są wywołane powstającym podczas hamowania ciepłem tarcia. Pomiarzy temperatury tarczy hamulcowej potwierdziły to spostrzeżenie, ponieważ w czasie 20 sekund hamowania, temperatura powierzchni ciernej narastała w sposób ciągły. Na rys 5. pokazano zależność współczynnika tarcia od temperatury. Przedstawiona zależność wykonana została dla stosunkowo wąskiego zakresu zmian temperatury tarczy hamulcowej, odpowiadającego zmianom podczas hamowań w ruchu miejskim.



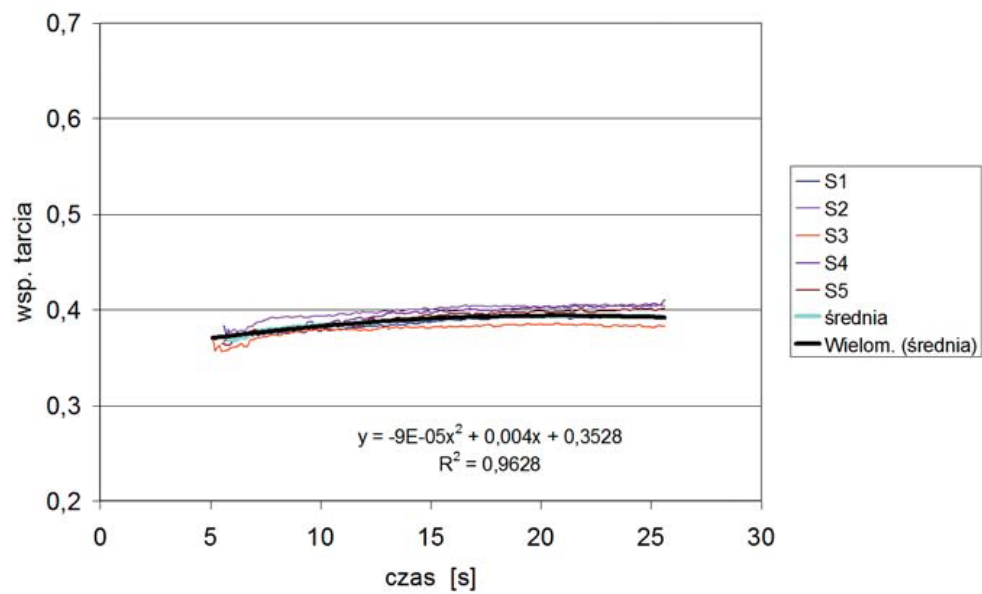
**Rys. 1. Zmiana współczynnika tarcia okładzin w trakcie pojedynczego hamowania  
Producent I; warunki eksperymentu  $p = 530 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min} = 52.3 \text{ rad/s}$**



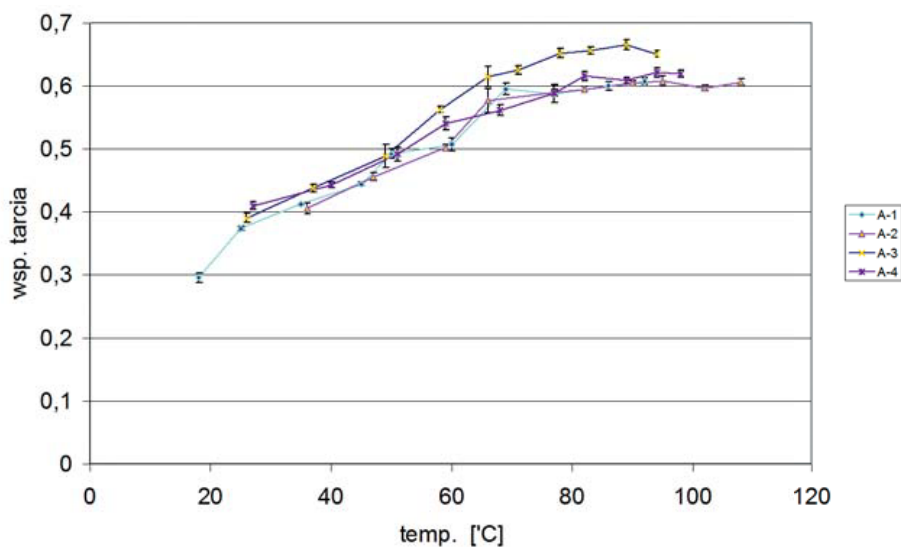
**Rys. 2. Zmiana współczynnika tarcia okładzin w trakcie pojedynczego hamowania  
Producent II; warunki eksperymentu:  $p = 530 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min} = 52.3 \text{ rad/s}$**



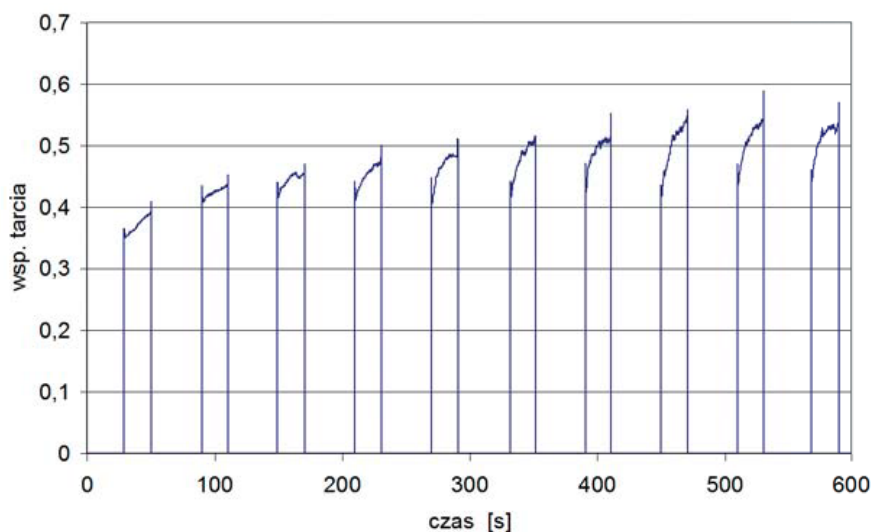
**Rys. 3. Zmiana współczynnika tarcia okładzin w trakcie pojedynczego hamowania  
Producent III; warunki eksperymentu:  $p = 530 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min} = 52.3 \text{ rad/s}$**



**Rys. 4. Zmiana współczynnika tarcia okładzin w trakcie pojedynczego hamowania  
Producent IV; warunki eksperymentu:  $p = 530 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min} = 52.3 \text{ rad/s}$**



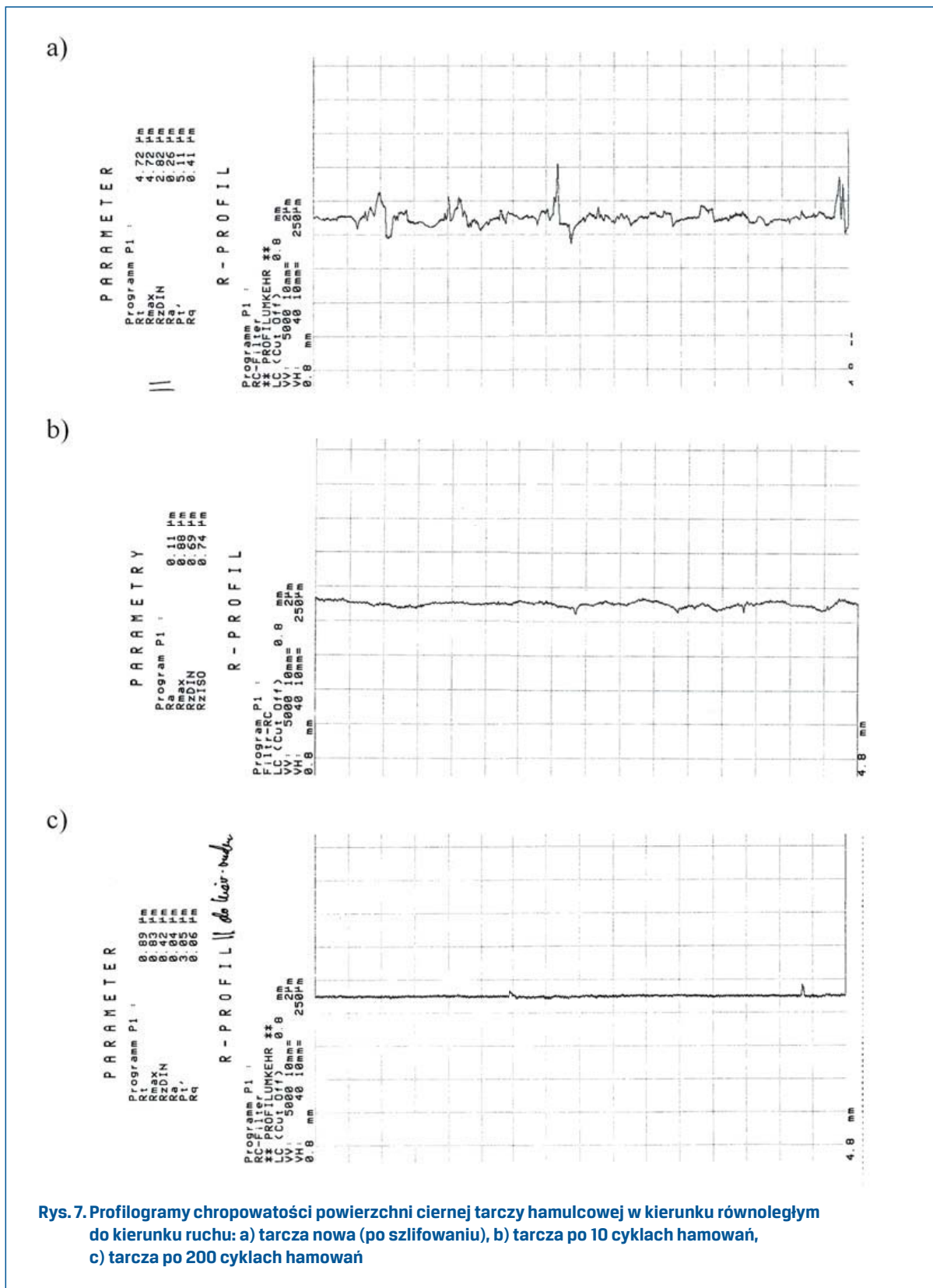
**Rys. 5. Wpływ zmian temperatury w parze ciernej na współczynnik tarcia, warunki eksperymentu:  $p = 425 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min}$**



**Rys. 6. Zmiana wartości współczynnika tarcia w parze ciernej hamulca tarczowego w okresie docierania; warunki eksperymentu:  $p = 425 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min}$**

Zbadano również okres docierania nowych okładzin do tarczy hamulcowej. Wielokrotne, kolejne zahamowania wykazały znaczny wzrost współczynnika tarcia w tym okresie. W początkowej fazie docierania wartość współczynnika tarcia wynosiła około 66% wartości końcowej – rys. 6. Stan wzrostu trwał przez kilkadziesiąt zahamowań. W okresie tym występowała wyraźna zmiana chropowatości tarczy hamulcowej – rys. 7. Tarcza żeliwna, w wykonaniu fabrycznym, posiadała chropowatość  $R_a = 0,26 \mu\text{m}$ . Po 10 cyklach hamowań





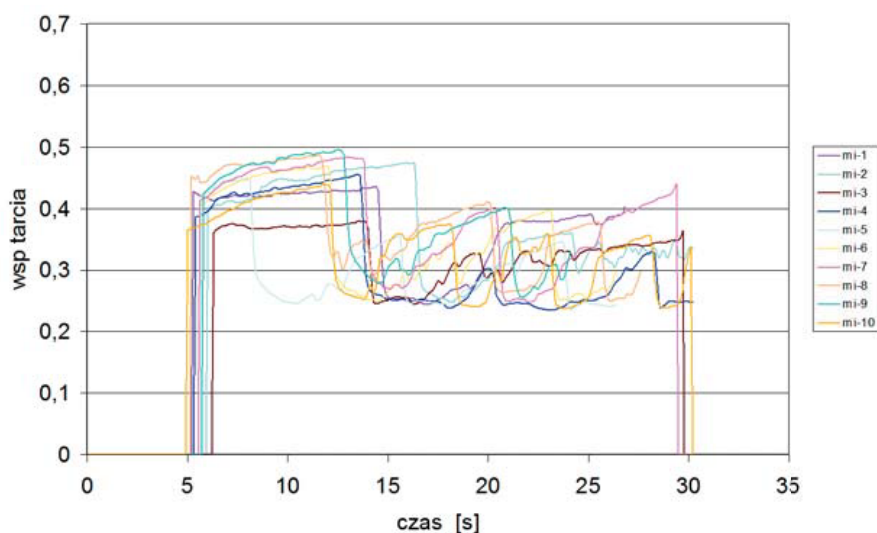
chropowatość zmniejszyła się do wartości  $R_a = 0,11 \mu\text{m}$ , a wartość współczynnika tarcia wzrosła o około 30%. Po 200 cyklach hamowania chropowatość wynosiła  $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ .

## 5. Badania wpływu obecności wody na współczynnik tarcia okładzin hamulcowych

Konstrukcyjną cechą tarczowych mechanizmów hamulcowych jest ich podatność na oddziaływania czynników zewnętrznych. W warunkach eksploatacji układu hamulcowego występują sytuacje zawilgocenia okładzin, chwilowego lub ciągłego zamoczenia tarcz hamulcowych oraz zanieczyszczenia tych elementów. Wynika to z łatwości, z jaką wszelkie substancje zanieczyszczające mogą dostawać się w strefę współpracy elementów ciernych. Jednym z celów przeprowadzonych badań była ocena wpływu na funkcjonowanie i efektywność hamowania pary tarcia hamulca tarczowego czynników zewnętrznych atmosferycznych takich jak woda oraz konstrukcyjnych – płyn hamulcowy.

Ocenę wpływu zawilgocenia powierzchni ciernych hamulca na efektywność hamowania, wykonano na podstawie wyników badań stanowiskowych, analizując przebieg współczynnika tarcia pary ciernej w procesie hamowania narażonej na oddziaływanie wody.

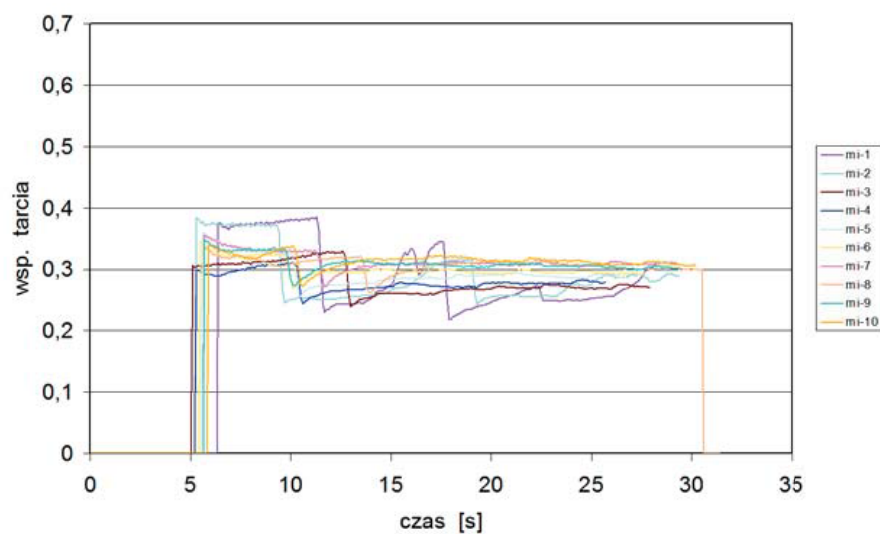
Badania wykonano dla dwu prędkości obrotowych: 530 obr/min. i 250 obr/min., co odpowiadało prędkości pojazdu 64 km/godz. i 30 km/godz. oraz dla dwóch sposobów namoczenia tarcz hamulcowych: chwilowe i ciągłe. Wyniki przedstawiono na rys. 8÷10.



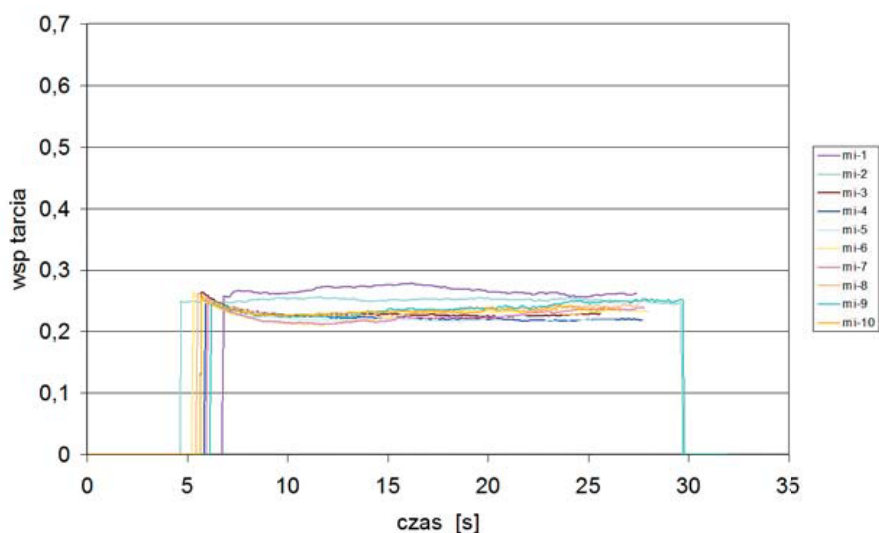
**Rys. 8. Przebieg współczynnika tarcia przy zmianie stanu pary trącej z suchej na mokrą dla 10 próbek hamowania; warunki eksperymentu:  $p = 425 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 500 \text{ obr/min}$**

Przy rozpoczynaniu hamowania od prędkości 64 km/godz. z suchą tarczą hamulcową i następnie namoczeniu jej wodą, występował gwałtowny spadek współczynnika tarcia o około 40%, a po około 1.5 – 3 sekundach, współczynnik tarcia stopniowo narastał do około 80% wartości dla pary ciernej z tarczą suchą. Wartość temperatury tarczy po badaniu wynosiła około 40°C. Wzrost wartości współczynnika tarcia wynikał z samooczyszczania się tarczy z wody. Badanie przy mniejszej prędkości obrotowej, odpowiadającej prędkości samochodu 30 km/godz. wykazało, że po jednorazowym namoczeniu tarczy hamulcowej współczynnik tarcia obniżał się o około 30%, a jego niska wartość utrzymywała się przez kilka sekund (rys. 9), znacznie dłużej niż przy prędkości 530 obr/min (rys. 8). Prawdopodobnie może to być spowodowane działaniem mniejszych sił odśrodkowych działających na krople wody i wolniejszym procesem samooczyszczania.

Próba hamowania z tarczą ciągle nawilżaną wykazała stałe utrzymywanie się w parze ciernej niskiej wartości współczynnika tarcia, poniżej 0.3 (rys. 10), podczas gdy w parze suchej wynosił on 0.4 – 0.45. Taki efekt występuje przy prędkości 30 - 40 km/godz., czyli w warunkach jazdy miejskiej, przy niewielkim samooczyszczaniu tarczy hamulcowej z wody.



**Rys. 9. Przebieg współczynnika tarcia przy zmianie stanu pary trącej z suchej na mokrą dla 10 prób hamowania; warunki eksperymentu:  $p = 425 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 250 \text{ obr/min}$**



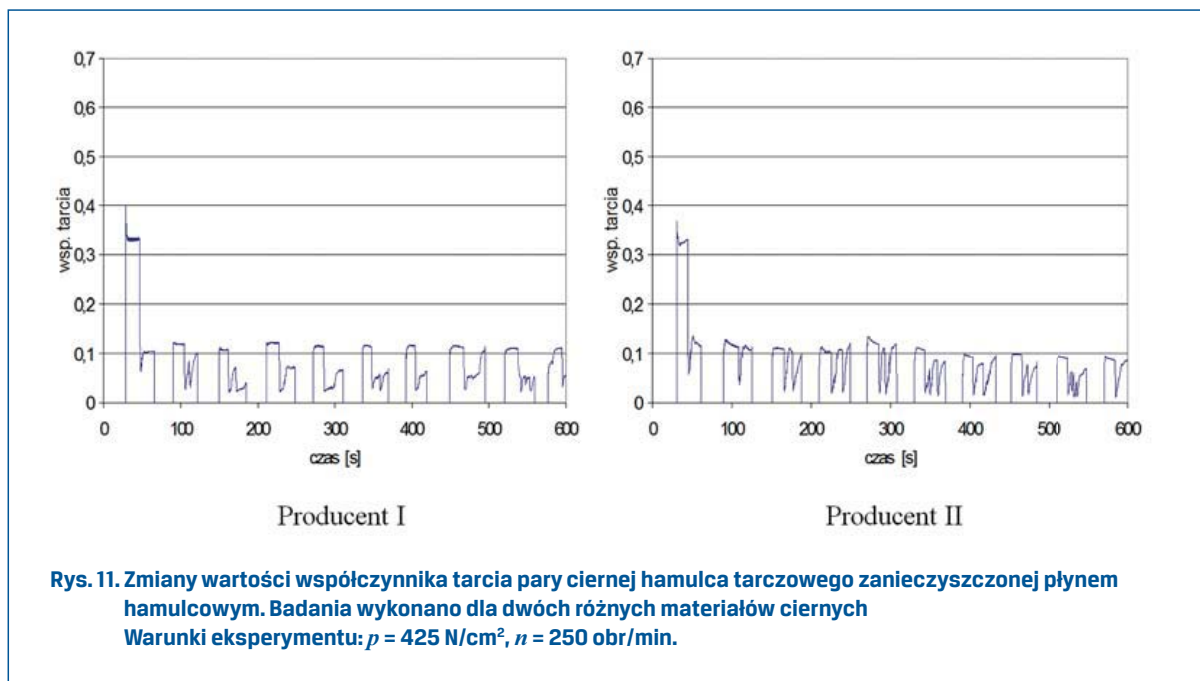
**Rys. 10. Przebieg współczynnika tarcia przy stałym nawilżaniu powierzchni tarczy hamulcowej dla 10 próbek hamowania; warunki eksperymentu:  $p = 425 \text{ N/cm}^2$ ,  $n = 250 \text{ obr/min}$**

## 6. Badania wpływu płynu hamulcowego na współczynnik tarcia

Wyniki oceny wpływu obecności płynu hamulcowego w parze ciernej na skuteczność hamowania przedstawiono na wykresach – rys. 11. Obrazują one przebiegi zmian współczynnika tarcia podczas wielokrotnego hamowania. Pierwsze hamowanie rozpoczynano dla suchej, czystej okładziny hamulcowej i tarczy, a w trakcie hamowania zwilżano tarczę hamulca płynem hamulcowym. Następne hamowania odbywały się na tej samej tarczy hamulcowej, bez jej oczyszczenia, a w czasie hamowania następowało ponowne nawilżenie tarczy płynem.

Przebiegi współczynnika tarcia dla par ciernych z okładzinami różnych producentów nie różniły się istotnie. Pojawienie się nawet niewielkiej ilości płynu hamulcowego na powierzchni tarcia tarczy hamulcowej powodowało intensywny spadek współczynnika tarcia w stosunku do tarczy suchej. Przedstawione na rysunku 11 pierwsze zahamowanie obrazuje współpracę okładziny ciernej z tarczą suchą. Wprowadzenie płynu hamulcowego w strefę współpracy wywołało bardzo znaczący spadek współczynnika tarcia, około 70%. Podczas kolejnych cykli hamowań, współczynnik tarcia nie przekraczał wartości 0,1 i nie wykazywał tendencji wzrostu. Oznacza to, iż płyn, który raz został zaadsorbowany przez powierzchnie współpracy elementów ciernych utrzymuje się i znacznie zmniejsza współczynnik tarcia. Zaobserwowano również, że ponowne zwilżenie płynem powierzchni trących obniża wartość współczynnika tarcia o kolejne 50% – rys. 11. Jest to efekt krótkotrwały, po czym następuje wzrost wartości współczynnika tarcia. Ta tendencja wzrostu, jak gdyby

zdolności do regeneracji materiału ciernego prawdopodobnie zależy od jego struktury. Dla użytych w eksperymentach nakładek producenta I współczynnik tarcia po ponownym nawilżeniu płynem hamulcowym obniżał się do wartości około 0.05 z powolną tendencją wzrostu, natomiast dla okładzin producenta II efekt regeneracji, to znaczy powrót współczynnika tarcia do wartości sprzed powtórnego nawilżenia następował w znacznie krótszym czasie. Jednak w obu przypadkach nadal współczynnik tarcia nie powrócił do wartości dla pary tarcia suchej (ok. 0.35÷0.39) zachowując wartość jak po jednokrotnym zwilżeniu (ok. 0.1).



## 7. Wnioski

1. Badania tribologiczne wykazały, że pomiędzy okładzinami ciernymi tego samego producenta mogą występować różnice w wartości współczynnika tarcia par ciernych rzędu 4%. Zaobserwowano również istotny wpływ temperatury powierzchni tarcia na wartość tego współczynnika.
2. Biorąc pod uwagę wykazane różnice w wartości współczynnika tarcia i dokładność rolkowych stanowisk diagnostycznych rzędu 5 % wartości mierzonej siły hamowania, należy stwierdzić, że przy fabrycznie sprawnych elementach układu hamulcowego, wynik badania sił hamujących na stanowiskach diagnostycznych na kole prawym i lewym może się prawdopodobnie różnić o około 10%. Taka różnica nie powinna być traktowana jako niesprawność eksploatacyjna układu hamulcowego, ponieważ wynikać może z własności tworzyw ciernych i stanowisk pomiarowych.
3. Jeżeli hamulec jednego z kół zostanie nagle zamoczony, a drugi pracuje w warunkach normalnych, to chwilowa różnica w wartościach współczynnika tarcia między

hamulcem suchym i zamoczonym może wynosić nawet 40%, a w trakcie hamowania zmniejsza się do około 20%. W kolejnym cyklu hamowania współczynnik tarcia wraca do wartości jak dla pary ciernej z okładzinami suchymi. Przy długotrwałym nawilżaniu współczynnik tarcia pary ciernej zmniejsza się o około 25% w stosunku do pary w stanie suchym.

4. Uszkodzenie zespołu hamulca w postaci zanieczyszczenia powierzchni tarczy hamulcowej płynem hamulcowym powoduje obniżenie współczynnika tarcia pary ciernej hamulca nawet o 70% powodując istotne zmniejszenie momentu hamującego, co niebezpiecznie obniża skuteczność hamowania. Taka niesprawność powinna być na bieżąco wykrywana i sygnalizowana kierującemu przez pokładowy system diagnostyczny.

## Literatura

- [1] FLEURY E., LEE S.M., KIM J.S., KIM D.H., KIM W.T., AHN H.S.: *Tribological properties of Al-Ni-Co-Si quasicrystalline coatings against Cr-coated cast iron disc*, Wear, 253, 2002.
- [2] KENNEDY F.E., BALBAHADUR A.C., LASHMORE D.S.: *The friction and wear of Cu-based silicon carbide particulate metal matrix composites for brake applications*, Wear 203-204, 1997.
- [3] SHERRINGTON I., HAYHURST P.: *Simultaneous observation of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts*, Wear 249, 2001.
- [4] BERNS H.: *Comparison of wear resistant MMC and white cast iron*, Wear, 254, 2003.
- [5] ERIKSSON M., JACOBSON S.: *Tribological surfaces of organic brake pads*, Tribology International, 33, 2000.
- [6] JAWORSKI J.: *Okładziny cierne do hamulców i sprzęgieł pojazdów mechanicznych*. WKiŁ, Warszawa 1984
- [7] Materiały firmy FOMAR – 1990.
- [8] STADLER Z., KRNEL K., KOSMAC T.: *Friction and wear of sintered metallic brake linings on a C/C-SiC composite brake disc*. Wear 265, 2008.
- [9] SEONG J. K., MIN H. C., KEUN H. C., HO J.: *Complementary effects of solid lubricants in the automotive brake lining*. Tribology International 40, 2007.

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr NM 509175833: *Opracowanie monitorów diagnostycznych dla systemu diagnostyki pokładowej hamulców samochodów osobowych*.