

Patryk FIJAK<sup>1</sup>

Opiekun naukowy: Tomasz KNEFEL<sup>2</sup>

## **BADANIA KLOCKÓW HAMULCOWYCH NA STACJONARNYM STANOWISKU BADAWCZYM**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono procedurę oceny i weryfikacji różnego rodzaju klocków hamulcowych samochodu osobowego w odniesieniu do części oryginalnych. Opisano teoretyczne podstawy hamowania pojazdów, budowę okładziny ciernej oraz przedstawiono wymagania, jakie stawiane są współczesnym klockom hamulcowym. W artykule opisano zjawiska, które powodują zmniejszenie współczynnika tarcia okładzin klocków hamulcowych, w tym szczególnie niebezpieczne zjawisko fadingu. W artykule wskazano, które z pośród badanych klocków hamulcowych w różnych przedziałach cenowych są szczególnie narażone na zjawisko fadingu, a które mniej i jak bardzo pogarsza się skuteczność hamowania, gdy to zjawisko wystąpi.

**Słowa kluczowe:** hamulce tarczowe, klocki hamulcowe, tarcie, skuteczność, niezawodność

## **TESTING OF BRAKE PADS ON A STATIONARY TESTING MACHINE**

**Summary:** The article presents the procedure for the assessment and verification of various types of car brake pads in relation to original parts. The theoretical foundations of vehicle braking, the construction of friction linings and the requirements for modern brake pads are described. The article describes the phenomena that cause a reduction in the friction coefficient of brake pad linings, including the particularly dangerous fading phenomenon. The article indicates which of the tested brake pads in various price ranges are particularly exposed to the fading phenomenon, and which less and how much the braking performance deteriorates when this phenomenon occurs.

**Keywords:** brakes, brake pads, friction, efficiency, reliability

### **1. Wstęp**

Początkowo hamulce w pojazdach mechanicznych z racji na niewielkie prędkości były bardzo prostej budowy. Hamulce klockowe zaadoptowano wprost z pojazdów konnych, gdzie współdziałały bezpośrednio z obręczami kół[1]. Wraz z rozwojem

---

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Specjalność: Samochody i Silniki, fijakpat@gmail.com

<sup>2</sup> dr hab. inż. prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, knefel@ath.bielsko.pl

pojazdów i zwiększeniem ich prędkości, konstruktorzy musieli opracować skuteczniejszy rodzaj hamulców. Podczas gdy w samochodach powszechny był sposób przekazywania napędu z silnika na tylną oś za pośrednictwem łańcucha, zastosowano hamulce wewnątrz łańcuchowych kół napędowych. Gdy upowszechnił się sposób przekazywania napędu zwany klasycznym (silnik, skrzynia i wał napędowy umieszczone wzdłuż osi pojazdu przekazujące napęd na most napędowy tylnej osi), wówczas powstał hamulec bębnowy umieszczony za skrzynią uruchamiany nożnie [1]. Hamulec postojowy występował na kołach osi tylnej również w postaci bębnow. Na każdym kole był jeden mechanizm hamujący. Szczeki hamulcowe były rozpierane wewnątrz bębnow hamulcowych za pomocą systemu wodzików i dźwigni. W późniejszym okresie H. Perrot zastosował wreszcie hamulce związane z przednim kołami, co w dużym stopniu poprawiło skuteczność hamowania. Zabudowanie układów hamulcowych w przedniej osi pojazdu było bardzo trudne, ponieważ w dalszym ciągu system uruchamiający hamulce był mechaniczny, a koła przedniej osi musiały być skręcane, a ich skręcanie nie mogło wpływać na działanie układu uruchamiającego. W seryjnej produkcji hamulce umieszczone na obu osiach zaczęto stosować dopiero ok. 1925 roku pomimo tego, że skuteczność hamowania dzięki zastosowaniu hamulców w przedniej osi zwiększała się znacząco. Szybki rozwój samochodów ciężarowych po I wojnie światowej wymusił zastosowanie wydajniejszych układów – z kolei żelaznej zostały zapożyczone powietrzne hamulce naciśnieniowe stosowane tam od dawna. Rozwój hamulców naciśnieniowych nastąpił także dzięki zwiększeniu wydajności transportu samochodowego używającego zestawów składających się nierzadko z kilku przyczep. Zaletą układów uruchamiania hamulców w sposób naciśnieniowy jest odciążenie kierowcy, natomiast wadą jest stopień skomplikowania takiego układu [1].

Pojazdy mechaniczne są konstruowane z myślą o przyspieszeniu przemieszczania się z jednego miejsca do drugiego, skrócenia czasu podróży i tak, aby podróż przebiegała w jak najbardziej komfortowych warunkach. Dzięki temu, że udaje się realizować te założenia, pojazdy mechaniczne cieszą się tak dużą popularnością. Wraz z rozwojem techniki udaje się nieustannie zwiększać prędkości pojazdów i poprawiać komfort podróży. Bezpieczeństwo podróży natomiast w ogromnej mierze zależy od sprawnego, właściwego, niezawodnego i skutecznego działania układów hamulcowych. Ponieważ, jak wcześniej wspomniałem, prędkości pojazdów są nieustannie zwiększane, układy hamulcowe, też muszą się nieustannie rozwijać w kierunku poprawy skuteczności i niezawodności hamowania („*szybkość pojazdu zależy od skuteczności działania jego hamulców*” - Charles Faroux).

## 2. Cel pracy

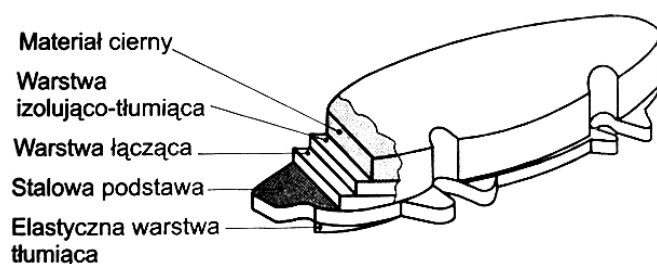
Celem pracy jest porównanie wartości oraz przebiegu zmian współczynnika tarcia okładzin ciernych badanych klocków hamulcowych w zależności od temperatury powierzchni trącej tarczy hamulcowej oraz porównanie badanych klocków hamulcowych między sobą.

Współczynnik tarcia pary trącej jest bardzo istotnym parametrem z punktu widzenia skuteczności hamowania, ponieważ ma decydujący wpływ na uzyskiwane opóźnienia hamowania, a w konsekwencji na drogę potrzebną do zatrzymania pojazdu.

Temperatura tarczy hamulcowej może zwiększyć się w bardzo krótkim czasie, przez to może wystąpić bardzo niekorzystne zjawisko zwane fading, którego wynikiem jest nagle, nieprzewidziane zmniejszenie skuteczności hamowania pojazdu za sprawą chwilowego zmniejszenia współczynnika tarcia pary tarczej.

### 3. Budowa i wymagania stawiane klockom hamulcowym

Element cierny zbudowany jest z licznych warstw, które umożliwiają właściwą pracę tego elementu oraz zapewniają jego bezawaryjność i odpowiedni czas eksploatacji.



Rysunek 1. Budowa wkładki cierniej hamulca tarczowego [2]

Okładziny cierne współczesnych klocków hamulcowych powinny spełniać następujące wymagania:

- stabilna i wysoka wartość współczynnika tarcia,
- wytrzymałość na ściskanie i ścinanie,
- duża odporność na zużycie w różnych warunkach tarcia,
- brak skłonności do szczepień adhezyjnych,
- duża stabilność mechaniczna, chemiczna i termochemiczna,
- odporność na korozję, wodę, oleje i inne substancje,
- wysoka temperatura topnienia,
- odporność na podpalenie,
- wysoki współczynnik przewodzenia ciepła,
- duża wartość ciepła właściwego,
- mała kruchość.

W związku z powyższymi, wkładki cierne muszą być poddawane surowym badaniom, które to umożliwiają uzyskanie homologacji i dopuszczenia do produkcji danej konstrukcji wkładki cierniej, wyprodukowanej w określony sposób oraz zawierającej określony skład [2].

### 4. Obiekty badań

Badanymi obiektami były klocki hamulcowe różnych firm, w szerokim przedziale cenowym, przeznaczone do współpracy z hamulcem tarczowym przedniej osi pojazdu Volkswagen Passat B5. Klocki zostały oznaczone jako: zamienniki A, zamienniki B, klocki ceramiczne oraz klocki oryginalne. Do testów wykorzystano tarcze hamulcową

o średnicy 280mm i grubości 22 mm. Temperatura była mierzona za pomocą termopary umieszczonej w powierzchni czarnej tarczy hamulcowej.

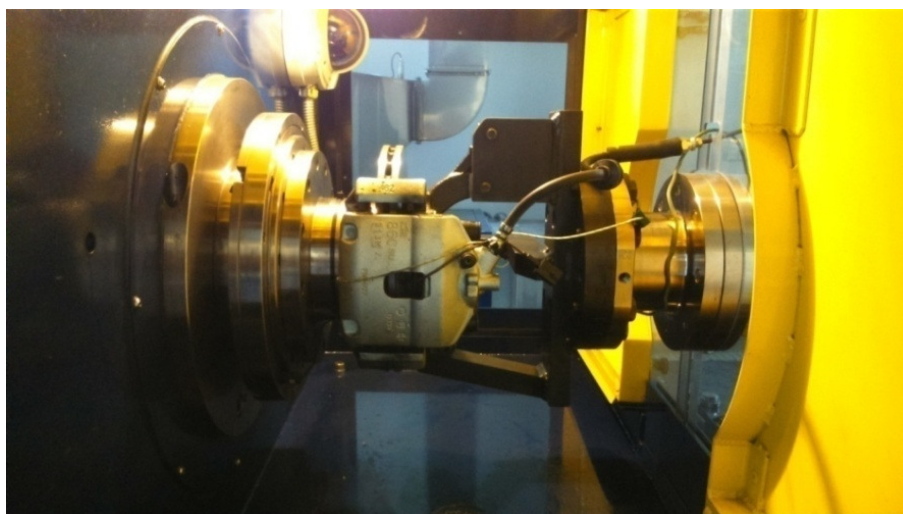
## 5. Stanowisko badawcze zespołów hamulcowych

Pomiary zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym Link model 3000. Jest to wydajne, efektywne i łatwe w obsłudze narzędzie do badania zespołów hamulcowych. Zostało ono zaprojektowane do prowadzenia zaawansowanych testów podzespołów hamulcowych uruchamianych hydraulicznie. Celem, jaki przyświecał konstruktorom urządzenia były precyzyjne i dokładne pomiary skuteczności hamowania, efektywności, pojemności cieplnej oraz innych cech związanych z układem hamulcowym, a wynikających z jego eksploatacji[3].



*Rysunek 2. Widok stanowiska badawczego Link Model 3000 [3]*

Dynamometr LINK M3000 pozwala rejestrować w czasie rzeczywistym następujące sygnały[3]: moment hamujący, prędkość obrotową, prędkość liniową, opóźnienie podczas hamowania, temperaturę klocka i szczęki, temperaturę tarczy i bębna, ciśnienie w układzie, przyspieszenie oraz wiele innych.



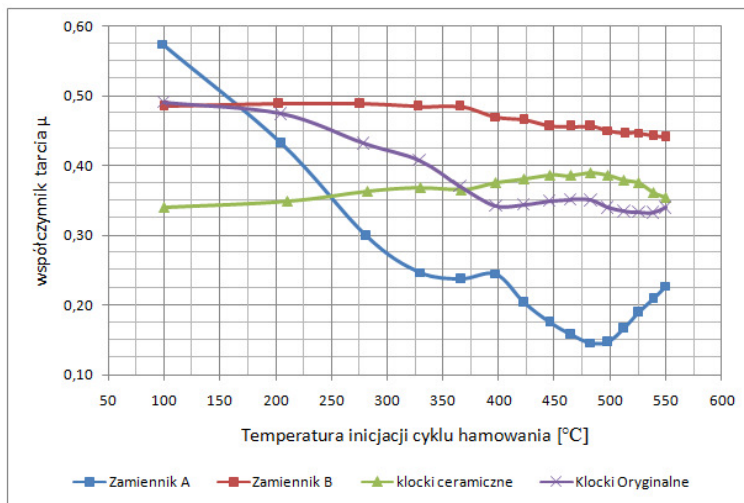
*Rysunek 3. Widok podzespołów zamontowanych na stanowisku badawczym*

## **6. Wyniki badań**

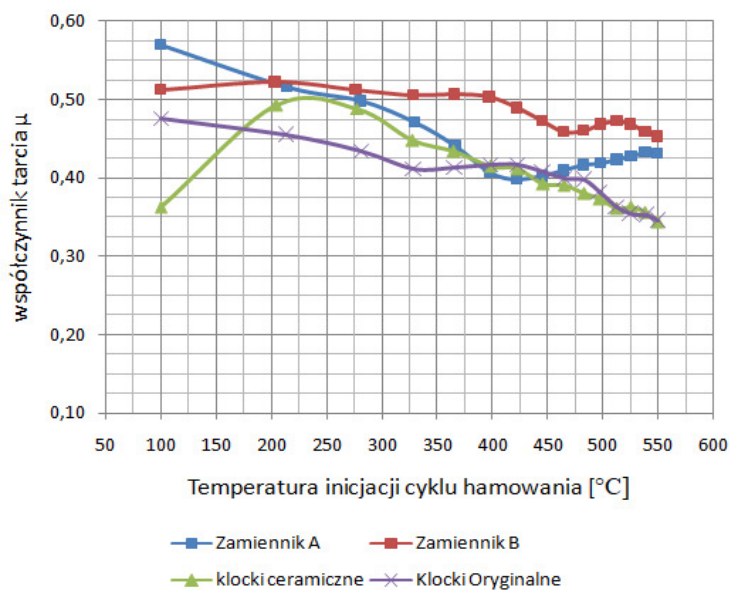
W celu określenia parametrów pracy badanych klocków hamulcowych przeprowadzono szereg testów, a wybrane wyniki przedstawiono na rys. 4÷7. Każdy z testów poprzedzono krótkim opisem. Analizę otrzymanych wyników przedstawiono w siódmej części artykułu.

Test Fade 1 to sprawdzian właściwości ciernych okładziny ciernej w podwyższonej temperaturze (rys. 4). Parametrem regulowanym jest ciśnienie robocze wewnątrz układu uruchamiającego. Jest ono tak regulowane, aby zapewnić symulowane opóźnienie hamowania o konkretnej wartości. Temperatura inicjacji każdego cyklu hamowania jest ściśle określona.

Z kolei test Fade2 występuje po teście Fade1 1 oraz kilku kolejnych testach je poprzedzających (rys. 5). Różnice między testami wynikają z wypalenia się, w efekcie działania wysokiej temperatury, pewnej ilości składników okładziny ciernej, które mają skłonność do tworzenia poduszki gazowej oraz cieczy, które obniżają współczynnik tarcia.

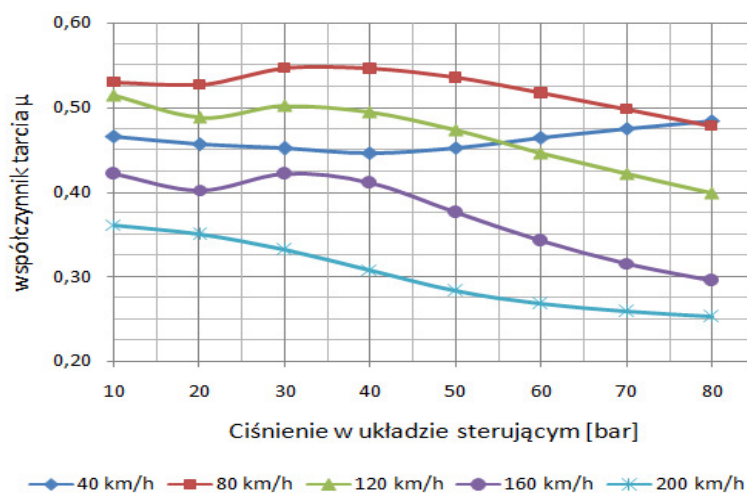


Rysunek 4. Zestawienie wyników badań z testu Fade1 dla wszystkich badanych klocków hamulcowych

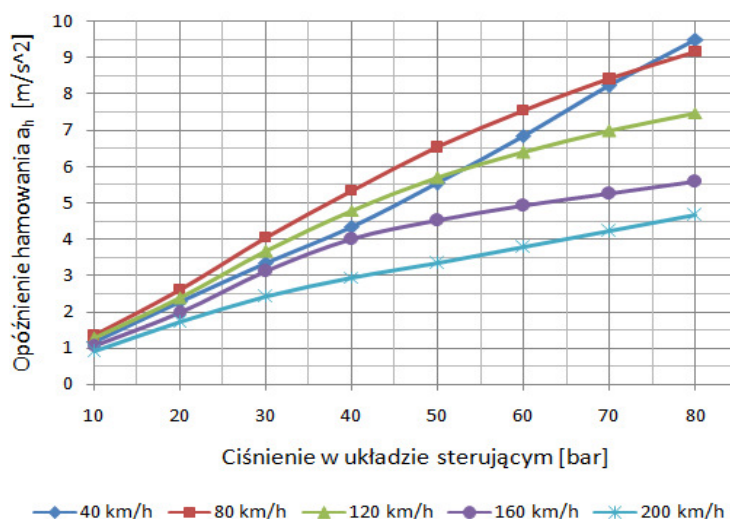


Rysunek 5. Zestawienie wyników badań z testu Fade2

Kolejny test, Speed/Pressure, to pomiar wartości współczynnika tarcia. W tym teście wielkościami zmiennymi są ciśnienie sterujące oraz symulowana prędkość pojazdu (rys. 6, 7).



Rysunek 6. Test Speed/Pressure dla zamienników A – zależność współczynnika tarcia od ciśnienia oraz prędkości



Rysunek 7. Test Speed/Pressure dla zamienników A – zależność opóźnienia hamowania od ciśnienia oraz prędkości

## 7. Analiza wyników badań

Należy zwrócić szczególną uwagę na zależność współczynnika tarcia od temperatury, ponieważ dokonując kilku hamowań z wysoką intensywnością występujących w niewielkim odstępie czasowym, temperatura elementów ciernych układu hamulcowego gwałtownie zwiększa się, co może mieć bardzo duży wpływ na skuteczność hamowania. Stabilna, wysoka wartość współczynnika tarcia, niezależna

od temperatury, ma w takim przypadku kluczowe znaczenie dla skutecznego działania układu hamulcowego.

Oczekiwana wartość współczynnika tarcia okładziny ciernej wynosi od 0,3 do 0,5. Zbyt niski współczynnik tarcia wpływa negatywnie na skuteczność układu hamulcowego oraz powoduje konieczność sterowania pracą hamulców za pomocą wysokiego ciśnienia. Zbyt wysoki współczynnik tarcia powoduje przyspieszone zużycie okładziny ciernej oraz powierzchni trącej tarczy hamulcowej lub bębna hamulcowego [4].

Idealnym przebiegiem współczynnika tarcia podczas każdego z testów jest taki przebieg, podczas którego wartość współczynnika tarcia nie zmienia się niezależnie od temperatury, ciśnienia oraz prędkości. Opóźnienie hamowania zwiększa się wówczas liniowo wraz ze zwiększaniem ciśnienia wewnątrz układu sterującego, a więc do siły przyłożonej na pedał hamulca. Kierujący pojazdem jest wtedy w stanie precyzyjnie sterować opóźnieniem hamowania.

Analizując uzyskane wyniki badań z testu Fade 1 można stwierdzić, że zamienniki A wypadły najgorzej z pośród wszystkich badanych klocków hamulcowych (rys. 4). W przypadku pierwszego hamowania uzyskana wartość współczynnika tarcia wynosząca 0,575 jest bardzo duża, największa spośród wszystkich badanych klocków hamulcowych. Jednak już w trakcie trzeciego hamowania, współczynnik tarcia zmniejsza swoją wartość do 0,299, co jest wartością aż o 48 % mniejszą w stosunku do wyniku uzyskanego podczas pierwszego hamowania. W trakcie kolejnych cykli hamowań współczynnik zmniejsza swoją wartość do 0,146, co jest zmniejszeniem wartości aż o 74,6 %. W przypadku tych klocków hamulcowych występuje zjawisko fadingu krytycznego.

Najmniejszą zmiennością współczynnika tarcia w zależności od temperatury inicjacji cyklu hamowania cechują się klocki oznaczone jako zamienniki B (rys. 4). Ich współczynnik tarcia przyjmuje znaczące wartości, praktycznie stałe, aż do temperatury 350 °C. W rozpatrywanym zakresie, zmniejszenie współczynnika tarcia wynosi 9,8% w stosunku do wartości maksymalnej podczas tego testu.

Klocki ceramiczne również cechują się prawidłowym przebiegiem współczynnika tarcia podczas tej próby (rys. 4). Zmniejszenie wartości współczynnika tarcia wynosi maksymalnie 12,3 %. Co ciekawe wartość współczynnika tarcia zwiększa się podczas zwiększania temperatury od 100 °C aż do 465 °C. Dopiero po przekroczeniu 465 °C współczynnik tarcia łagodnie zmniejsza swoją wartość.

Klocki oryginalne w trakcie cykli hamowania w temperaturze 100 °C oraz 200 °C cechują się bardzo wysokim współczynnikiem tarcia, lecz wraz z kolejnymi cyklami hamowania i ze zwiększaniem temperatury inicjacji cyklu do 396 °C współczynnik tarcia wyraźnie zmniejsza swoją wartość (rys. 4). Następnie następuje ustabilizowanie współczynnika tarcia na poziomie  $\mu = 0,340$  co jest zadowalającym wynikiem. Dla tych klocków współczynnik tarcia zmniejsza swoją wartość o 32,4 % w stosunku do wartości maksymalnej.

Test Fade 2 (rys. 5) jest powtórzonym testem Fade 1, jednak wyniki w trakcie realizacji tego testu różnią się od wyników uzyskanych podczas testu Fade 1, ponieważ okładziny cierne zostały już poddane działaniu wysokiej temperatury i mniejszy jest udział związków, które składają się na warstwę wierzchnią okładziny ciernej, a negatywnie oddziałują na wartość współczynnika tarcia.



Zamienniki A podczas tego testu również wypadły najgorzej z pośród wszystkich badanych klocków hamulcowych. W przypadku pierwszego hamowania uzyskana wartość współczynnika tarcia 0,569 jest bardzo duża, największa z pośród wszystkich badanych klocków hamulcowych. W trakcie kolejnych cykli hamowań współczynnik zmniejsza swoją wartość o 30,1 %. Jednak takie zmniejszenie wartości w trakcie testu Fade 2 nie jest dobrym wynikiem.

Klocki ceramiczne podczas tego testu w trakcie pierwszego cyklu hamowania w temperaturze 100 °C charakteryzują się najmniejszym współczynnikiem tarcia równym 0,36. Jednak już w trakcie następnego hamowania współczynnik tarcia zwiększa swoją wartość na tyle, że dalszy przebieg nie odbiega znacząco od przebiegu współczynnika tarcia dla pozostałych badanych klocków hamulcowych.

Klocki oryginalne w trakcie tego testu cechują się niskim średnim współczynnikiem tarcia, lecz przebieg jego zmian jest stosunkowo stabilny (rys. 5). Dopiero po przekroczeniu 365 °C współczynnik tarcia wyraźnie zmniejsza swoją wartość. Dla tych klocków współczynnik tarcia zmniejsza swoją wartość o 27,5 % w stosunku do wartości maksymalnej.

Na podstawie wyników badań testów Speed/Pressure (rys. 6) można stwierdzić, że wraz ze zwiększaniem ciśnienia oraz wraz ze zwiększaniem prędkości występuje ogólna tendencja do zmniejszania wartości współczynnika tarcia. Wyjątek stanowią próby z najmniejszą prędkością 40 km/h, gdzie można obserwować zwiększenie wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem zadawanego ciśnienia.

Analizując wykresy opóźnienia przedstawione na rys. 7 uzyskane z pomiarów podczas badania Speed/Pressure, można stwierdzić, że opóźnienie hamowania zmniejsza swoją wartość wraz ze wzrostem prędkości. Jest to wynikiem zmniejszenia wartości współczynnika tarcia wraz ze zwiększeniem symulowanej prędkości jazdy. Największym procentowym zmniejszeniem wartości współczynnika tarcia, cechują się zamienniki A, dla których zmniejszenie wartości wyniosło aż 51 % (rys. 7).

## 8. Uwagi końcowe i wnioski

W przypadku wszystkich badanych klocków hamulcowych, współczynnik tarcia wykazuje ogólną tendencję do zmniejszania swojej wartości wraz ze zwiększeniem temperatury powierzchni trących. Zmniejszenie współczynnika tarcia wraz ze zwiększeniem temperatury jest spowodowane tym, że podczas działania większej temperatury, z powierzchni okładziny czarnej klocka hamulcowego uwalniane zostają gazy oraz ciecze powstające w wysokich temperaturach ze składników wchodzących w skład okładziny czarnej. Powstające w wysokich temperaturach ciecze, które zalegają lokalnie między okładziną czarną a tarczą hamulcową powodują powstawanie tarcia mokrego i negatywnie wpływającego na wartość współczynnika tarcia. Powstające gazy powodują powstawanie poduszki gazowej zmniejszając tym samym powierzchnie styku, a w konsekwencji zmniejszenie współczynnika tarcia.

Przebieg zmian współczynnika tarcia w zależności od temperatury elementu czarnej dla każdej grupy badanych klocków jest inny. Jest to spowodowane różnym składem mieszanki okładzin czarnych klocków hamulcowych, oraz zastosowaniem różnych substancji wchodzących w skład mieszanki okładziny czarnej. Niektóre z substancji

wchodzących w skład mieszanki okładziny czarnej, w pewnym wąskim zakresie temperatur, powodują zwiększenie współczynnika tarcia, jednak wraz z dalszym zwiększeniem temperatury korzystny wpływ na powiększenie współczynnika tarcia zmniejsza się. Dobór tych substancji zwiększających współczynnik tarcia wpływa bezpośrednio na przebieg zmienności współczynnika tarcia w zależności od temperatury.

Najlepszą z badanych grup klocków hamulcowych okazała się ta oznaczona jako zamienniki B. Współczynnik tarcia tych klocków hamulcowych podczas wszystkich testów osiągał duże wartości oraz cechował się najmniejszą zmiennością w zmiennych warunkach testowych.

Najgorszymi spośród badanych klocków hamulcowych okazały się zamienniki A, ponieważ podczas testu Fade 1 wartość współczynnika tarcia uległa bardzo gwałtownemu zmniejszeniu podczas kolejnych cykli hamowań. Maksymalne zmniejszenie współczynnika tarcia podczas testu Fade1 wyniosło ponad 74%. Tak duże zmniejszenie się współczynnika tarcia jest szczególnie niebezpieczne, ponieważ podczas pierwszego intensywnego hamowania skuteczność układu hamulcowego jest bardzo wysoka, a droga hamowania krótka. Kierowca jest przekonany, że jego pojazd jest w stanie zahamować podobnie za każdym razem. Jednak już po trzech podobnych cyklach hamowania, temperatura układu hamulcowego znacząco zwiększy swoją wartość, a współczynnik tarcia może zmniejszyć się aż o 50 %, więc droga hamowania może zwiększyć się nawet dwukrotnie. W sytuacji awaryjnej, gdy kierowca jest zmuszony do awaryjnego hamowania oraz wystąpi zjawisko fadingu krytycznego, skuteczność hamulców może ulec drastycznemu zmniejszeniu (o 75%). Kierowca może wtedy odnieść wrażenie, że układ hamulcowy jego pojazdu nie pracuje.

Zamienniki A są dostępne w znacznie niższej cenie niż pozostałe badane klocki hamulcowe. Badania potwierdzają, że zastosowane w nich materiały są znacząco niższej jakości niż w pozostałych badanych klockach hamulcowych, a uzyskiwany współczynnik tarcia jest bardzo podatny na zmniejszenie pod wpływem zwiększonej temperatury. Warto więc się zastanowić czy kupno najtańszych dostępnych klocków hamulcowych jest rozsądnym wyborem.

## LITERATURA

1. ŚCIESZKA S.: Hamulce czarne, zagadnienia materiałowe konstrukcyjne i tribologiczne, ITE Gliwice-Radom, 1998.
2. GABRYELEWICZ M.: Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych, WKŁ, Warszawa, 2015.
3. [https://www.bosmal.com.pl/569badania\\_ukladow\\_hamulcowych\\_na\\_stanowisku\\_dynamometrycznym\\_badania\\_stanowiskowe](https://www.bosmal.com.pl/569badania_ukladow_hamulcowych_na_stanowisku_dynamometrycznym_badania_stanowiskowe) 08.01.2018.
4. JAWORSKI J.: Okładziny czarne do hamulców i sprzęgieł pojazdów mechanicznych, WKŁ, Warszawa, 1984.