

Rafał WAWRZYNEK

## PRZYCZYNY USZKODZEŃ TARCZ HAMULCOWYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono podstawowe przyczyny i objawy uszkodzeń występujące w trakcie eksploatacji skojarzenia tarczy hamulcowej z okładziną cierną. Omówiono występowanie niekorzystnych zjawisk pulsacji towarzyszącej procesowi hamowania. Na podstawie przeprowadzonych badań i dokumentacji fotograficznej dokonano analizy uszkodzeń oraz zmian zachodzących na powierzchni roboczej tarczy hamulcowej.

## ESTIMATION OF FAILURES REASONS OF BRAKES

**Summary.** This article presents basic reasons and results occurring in exploitation of connection of brake disc friction lining as well as the negative phenomena of pulsation accompanying the process of brake. The analysis of the damages and changes occurring on the working surface the breaks was made on the basis of investigations and the photographic documentation.

### 1. WSTĘP

Jedną z najistotniejszych cech samochodu, na którą najczęściej zwraca uwagę użytkownik, jest zdolność do przyspieszenia podczas jazdy. Samochód o masie np. 1000 kg na przyspieszenie od 0 do 100 km/h ma 12 sekund. Natomiast hamowanie samochodu jadącego z prędkością 100 km/h na docinku 45 m będzie trwało około 3,2 sekundy. Wykonana przez silnik praca potrzebna do przyspieszenia samochodu do prędkości 100 km/h i niezbędna do zahamowania od tej prędkości (przez hamulce) jest taka sama. Tymczasem moc, z jaką pracują silnik lub hamulce, będą wynikiem podzielenia wartości wykonanej pracy przez czas, w którym praca ta została wykonana [1]. Z tego prostego porównania wynika, jak trudne są warunki pracy układów hamulcowych.

### 2. ZAMIANA ENERGII W PROCESIE HAMOWANIA

Pojazd o masie  $m$  poruszający się z określoną prędkością  $v$  posiada energię kinetyczną  $E_k$  wyrażoną wzorem:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

gdzie:

$m$  - masa pojazdu [kg]

$v$  - prędkość pojazdu [m/s].

Ze wzoru wynika, że dwukrotny przyrost prędkości powoduje czterokrotny wzrost energii kinetycznej. Zadaniem hamulca jest zamiana energii ruchu pojazdu w energię cieplną i rozproszenie jej do otoczenia oraz częściowe spożytkowanie tej energii na zużycie podzespołów. Hamulce pojazdu nie są „akumulatorem” energii. Ich zdolność do gromadzenia ciepła jest ograniczona i zależy od pojemności cieplnej, określonej w procesie konstruowania układu hamulcowego. Nieprawidłowo zaprojektowane i obsługiwane hamulce utrudniają wymianę ciepła z otoczeniem i sprawiają, że podczas hamowania następuje nadmierne nagrzewanie elementów hamulcowych, tzn. ilość dostarczonej energii kinetycznej jest większa od tej, jaką hamulce mogą wypromieniować do atmosfery. Zwiększa się temperatura hamulca, a tym samym obniża się zdolność do zamiany energii kinetycznej w ciepłą. Efektem jest gwałtowne zmniejszenie skuteczności działania hamulców prowadzących do spadku współczynnika tarcia (fading temperaturowy), w skrajnych przypadkach zaniku siły hamującej [2].

Do prawidłowego funkcjonowania hamulca, a tym samym bezpiecznej eksploatacji pojazdów jest konieczne dobre odprowadzenie ciepła. Ideałem byłoby odprowadzenie na tyle skuteczne, aby hamulce utrzymywały stałą, możliwie niską temperaturę. Niestety, zmienne w czasie warunki chłodzenia uniemożliwiają w praktyce osiągnięcie takich założeń. Rozpatrując jednokrotne hamowanie możemy stwierdzić, że przy wysokiej prędkości ruchu pojazdu (na początku procesu hamowania) temperatura tarcz i okładzin hamulców jest stosunkowo niska, podczas hamowania wzrasta, maleje jednocześnie intensywność chłodzenia na skutek zmniejszenia się prędkości strumienia powietrza opływającego elementy hamulca.

Budowa oraz otwarta konstrukcja hamulca tarczowego sprawiają, że powierzchnia tarczy ma ułatwiony kontakt z opływającym ją powietrzem, zapewniając tym samym większą intensywność chłodzenia, powodując obniżenie temperatury współpracujących elementów. Niższa temperatura umożliwia utrzymanie stałej (lub bliskiej stałej) wartości współczynnika tarcia. Dzięki temu osiągnięto ustabilizowanie (w pewnym zakresie temperatur i częstotliwości hamowań) siły i momentu tarcia dla kolejno powtarzających się hamowań. Hamulec tarczowy lepiej odprowadza ciepło do otoczenia, jest lepiej chłodzony i nawet jeśli się szybciej nagrzewa, to szybciej stygnie niż hamulec bębnowy, który ma większą pojemność cieplną. Hamulce tarczowe okazały się bardzo podatne na modyfikacje związane z wymogami konstruktorów, dotyczące zmniejszenia masy nieresorowanej, przy zachowaniu wymaganej skuteczności hamowania [3].

### 3. ZALEŻNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA OD WARUNKÓW EKSPLOATACJI

Jeśli dla klocka hamulcowego i warunków, w jakich współpracuje on z tarczą hamulcową, znane są: wartości współczynnika tarcia ( $\mu$ ) oraz wartości siły docisku ( $F$ ), z jaką klocek hamulcowy dociska do tarczy hamulcowej, to wartość siły tarcia  $R$  można obliczyć ze wzoru:

$$R = \mu \times F$$

Wartość siły docisku  $F$ , z jaką klocek hamulcowy jest dociskany do tarczy, zależy od siły, z jaką kierowca naciska na pedał hamulca  $F_k$  (pomijamy cechy konstrukcyjne układu hamulcowego). Jeśli przyjmiemy stałą siłę  $F_k$ , maksymalną wartość siły docisku  $F$ , to wartość siły tarcia  $R$  zależy tylko od aktualnej wartości współczynnika tarcia  $\mu$  pomiędzy klockiem hamulcowym a tarczą. Na rysunku 1 pokazano schematycznie warunki współpracy skojarzenia klocek- tarcza [1].

Współczynnik tarcia między klockami hamulcowymi i tarczą zależy w istotnej mierze od warunków współpracy, a przede wszystkim od warunków jazdy. Do najważniejszych czynników wpływających na współczynnik tarcia zalicza się:

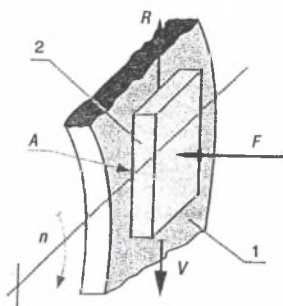
- temperaturę w strefie tarcia,
- nacisk jednostkowy klocka na tarcze,

- prędkość względną tarczy w stosunku do klocka.

### 3.1. Zależność współczynnika tarcia od temperatury

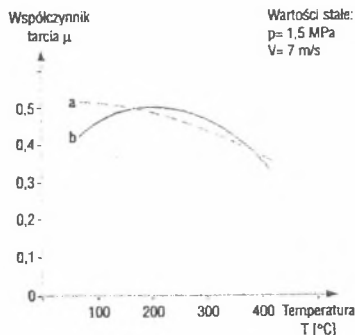
Przy każdym hamowaniu następuje wzrost temperatury w układzie klocek-tracza. W przypadku intensywnej hamowań oznaczających bardzo krótki czas na odprowadzenie ciepła z powierzchni klocka współczynnik tarcia ( $\mu$ ) zmienia się. Jak pokazano na rysunku 2, zmiana ta następuje wraz ze wzrostem temperatury powyżej  $100^{\circ}\text{C}$ . W zależności od rodzaju materiału, z którego wykonana jest okładzina, proces przebiegać może w dwojaki sposób:

- linia „a” oznacza najwyższą wartość współczynnika tarcia występującą przy niższych temperaturach klocka hamulcowego (ok.  $100^{\circ}\text{C}$ ), a przy wzroście temperatury współczynnik maleje,
- linia „b” przy niższych temperaturach klocka hamulcowego (ok.  $100^{\circ}\text{C}$ ) wartość współczynnika tarcia jest mniejsza od maksymalnej i dopiero po osiągnięciu przez klocek hamulcowy temperatury rzędu 200 do  $300^{\circ}\text{C}$  współczynnik osiąga maksimum. Dalszy wzrost temperatury powoduje obniżenie wartości współczynnika tarcia [1].



Rys. 1. Współpraca skojarzenia tracza (1) – klocek (2) [1]; F - siła docisku klocka do tarczy, A - rzeczywista powierzchnia styku, R - siła tarcia na styku tarcza klocek,  $\mu$  - współczynnik tarcia, p - nacisk jednostkowy, n - prędkość obrotowa tarczy, v - prędkość poślizgu

Fig. 1. Cooperation between brake disc (1) – brake shoe (2)



Rys. 2. Zależność współczynnika tarcia  $\mu$  od temperatury w strefie tarcia [1]

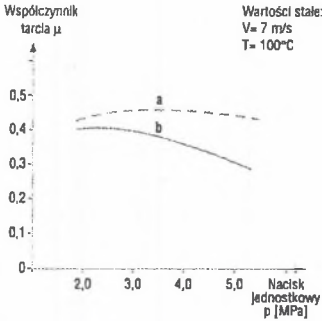
Fig. 2. Dependence of friction coefficient versus temperature in friction zone

### 3.2. Zależność współczynnika tarcia od nacisku jednostkowego i prędkości poślizgu

Nacisk jednostkowy ( $p$ ) informuje o tym, jaka wartość siły docisku ( $F$ ) klocka do tarczy hamulcowej przypada na jednostkę rzeczywistej powierzchni ich styku. W zależności od materiału ciernego, wzrost wartości nacisku jednostkowego powoduje niewielki wzrost (linia a) lub obniżenie (linia b) wartości współczynnika tarcia (rys. 3).

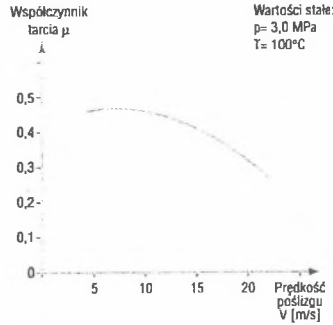
Wraz ze wzrostem prędkości poślizgu ( $v$ ) tarczy hamulcowej względem nieruchomego klocka hamulcowego (hamulcowego miejsca ich styku) współczynnik tarcia między nimi maleje, rys. 4. Ponieważ tarcza hamulcowa i koło są zamontowane na tej samej piaście, prędkość poślizgu jest bezpośrednio zależna od prędkości obrotowej koła, a więc również od prędkości ruchu pojazdu. Ponieważ samochód jedzie szybciej, to również koła oraz tarcza

hamulcowa obracają się coraz szybciej, dlatego prędkość poślizgu tarczy hamulcowej względem klocka hamulcowego również rośnie [1].



Rys. 3. Zmiany współczynnika tarcia  $\mu$  materiałów ciernych hamulca w funkcji nacisku jednostkowego [1]

Fig. 3. The changes of the  $\mu$  friction coefficient of frictional materials of the brake in the function of the unit pressure



Rys. 4. Zależność współczynnika tarcia od prędkości poślizgu [1]

Fig. 4. The interrelation between the friction coefficient and the velocity of the slide

#### 4. PRZYCZYNY I RODZAJE USZKODZEŃ TRCZ HAMULCOWYCH

W warstwie wierzchniej ciernych elementów hamulców zachodzi kompleks zjawisk trybologicznych i innych zjawisk związanych z procesem hamowania. Zjawiska te są główną przyczyną zmiany resursu hamulca. Utrata resursu hamulca może być gwałtowna (np. na skutek defektów materiałowych, niewłaściwej eksploatacji) i powodująca trwałą utratę właściwości użytkowych przez elementy cierne lub postępująca, powodująca stopniowy ubytek materiału elementów ciernych, nie zmieniająca zasadniczo charakterystyk sprzężenia ciernego [4].

##### 4.1. Pulsacja momentu hamującego na „zimno”

Podczas jednego obrotu tarczy hamulcowej zmienia się wartość momentu hamującego uzyskiwanego przez hamulce tarczowy danego koła pomimo stałego docisku klocków hamulcowych. Zmiana wartości momentu hamującego, czyli „pulsacja”, spowodowana jest zmianą grubości tarczy hamulcowej na jej obwodzie. Różnice grubości części roboczej tarczy od 12 do 15  $\mu\text{m}$  mogą już powodować pulsację momentu hamującego. Niestabilna praca hamulców prowadzi do obniżenia sprawności hamulca i trwałości jego elementów, a także może wywoływać drgania pojazdu. Gdy chwilowo wartość ta jest większa po jednej stronie osi, to pojazd ma tendencję do skręcania w tę stronę, po której siła ta jest większa. Ze względu na bezwładność samochodu oraz szybkie zmiany wartości momentu hamującego pojazd utrzymuje tor jazdy, natomiast hamulce danego koła są źródłem drgań o częstotliwości od 5 do 50 Hz, zależnie od prędkości ruchu pojazdu [1].

Pulsacja momentu na „zimno” objawia się:

- pulsowaniem pedału hamulca,
- drganiem koła kierownicy podczas hamowania,
- drganiem elementu zawieszenia i nadwozia podczas hamowania.

Mechanizm uszkodzeń tarczy hamulcowej jest następujący: tarcza hamulcowa obraca się między odsuniętymi od niej klockami hamulcowymi. Klocki cofają się na tyle, na ile pozwala tłoczek hamulcowy cofający się do zacisku. Dąży się do tego, aby klocki oddalały się od tarczy na minimalną odległość. Przy małej odległości klocka od tarczy konieczna jest mała ilość płynu hamulcowego potrzebnego do ich dosunięcia, a w przypadku systemu ABS czas dosunięcia klocka do tarczy jest krótszy. W przypadku gdy powierzchnia tarczy ulegnie deformacji, to jej praca będzie nierównomierna (tzw. bicie). „Wierzchołki” zdeformowanej części roboczej będą ocierały się o klocki hamulcowe, w następstwie czego miejsca te ulegną szybszemu zużyciu, a grubość tarczy zmniejszy się. W ten sposób starta lokalnie część robocza tarczy będzie miała nierównomierną grubość na obwodzie, co jest przyczyną powstawania pulsacji „na zimno”. Gdy tak powstałe różnice grubości są za duże, jedyną metodą ich usunięcia jest toczenie lub szlifowanie części roboczej.

Styl jazdy ma wpływ na rodzaj zużycia części roboczej tarcz hamulcowych. Eksploatacja głównie na autostradach powoduje, że hamulce używane są rzadko, wówczas dochodzi do procesu lokalnego zużywania części roboczej, a co za tym idzie, powstaje różnica w grubości tarczy, co może powodować powstawanie zjawiska bicia „na zimno”. Natomiast w ruchu miejskim często używane hamulce powodują równomierne zużycie powierzchni roboczej, lecz proces ten odznacza się przyspieszonym zużyciem tarcz hamulcowych [1].

#### 4.2. Pulsacja momentu hamującego z „przegrzania”

Podobnie jak w przypadku pulsacji na „zimno”, zmienia się wartość momentu hamującego po osiągnięciu wysokiej temperatury przez tarczę. Pulsacja występuje wyłącznie po nagraniu tarcz hamulcowych do wysokich temperatur, tj. około 600 - 700° C. Hamulce stają się źródłem drgań o częstotliwości od 100 do 250 Hz, zależnie od prędkości jazdy samochodu. Drgania będą odczuwalne i słyszalne dla człowieka, co stanowi pewien dyskomfort jazdy i może być zagrożeniem dla kierowcy. Badania eksploatacyjne pojazdów samochodowych wskazują, że hamulce nie są mechanicznie odizolowane od innych źródeł drgań, trudno jest rozszyfrować przyczynę występujących w danej chwili drgań, Drgania mogą pochodzić z układu ciernego hamulca, systemu zasilającego i sterującego pracą hamulca (np. ABS), ale także mogą być związane z innymi układami pojazdu takimi, jak np. zawieszenie, łożyskowanie kół jezdnych, opona, obręcz lub oś koła [4].

Uszkodzenia powierzchni tarczy są wynikiem lokalnych przekroczeń temperatury pracy tarczy hamulcowej (600 - 700° C). Podczas hamowania dochodzi do przenoszenia materiału ciernego klocka na powierzchnię tarczy (wcierania produktów zużycia). Ponadto w miejscach przegrzania może nastąpić zmiana struktury materiału tarczy hamulcowej i tworzenie się martenzytu [1]. Materiał o tak zmienionej strukturze jest twardszy niż materiał wyjściowy i mniej elastyczny, co zmienia warunki współpracy.

Naniesiony materiał klocków hamulcowych na tarczę hamulcową jest przeważnie usuwany z tarczy podczas hamowania. Jeśli przegrzanie było zbyt silne lub materiał klocka nie został samoczynnie usunięty, to można podjąć próbę toczenia takiej tarczy. Do przyczyn powstawania lokalnych przekroczeń temperatury możemy zaliczyć:

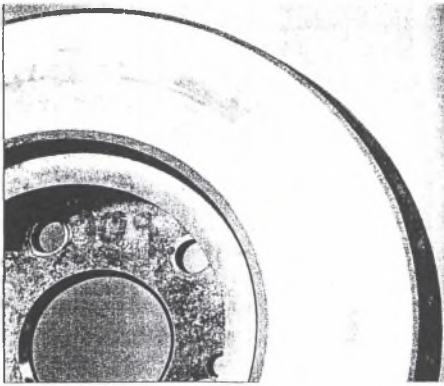
- deformację i bicie osiowe roboczej tarczy hamulcowej,
- blokowanie się tłoczka z zacisku hamulcowym po zagrzaniu elementów hamulca,
- niewłaściwy typ lub materiału klocka,
- zużycie klocków i innych elementów hamulca,
- nadmierny luz w zawieszeniu,
- złą geometrię kół jezdnych.

Jeżeli na tarczy występują zmiany barwy, to świadczą one o miejscowym wzroście temperatury wywołanym drganiami o wysokiej częstotliwości.



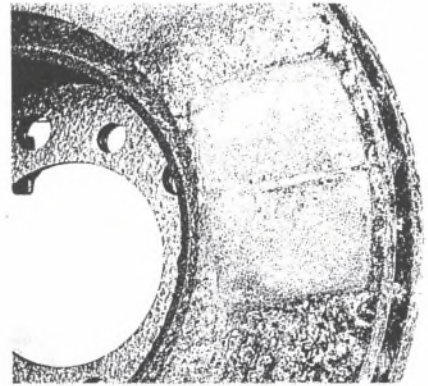
### 4.3. Korozja tarczy hamulcowej

Jeżeli pojazd jest używany zbyt rzadko, to część robocza tarczy hamulcowej jest pokryta warstwą rdzy. Pokrycie to może być rozłożone w sposób nieregularny lub być szczególnie widoczne w miejscu styku z powierzchnią klocka hamulcowego. Warstwa rdzy, choć mało widoczna, obniża skuteczność hamowania, ale zostaje usunięta nawet po jednokrotnym hamowaniu. Podczas postoju samochodu tarcze również pokrywają się rdzą. Gdy postój ten jest długi, warstwa ta jest gruba. Jej usunięcie następuje dopiero po kilkukrotnym hamowaniu, podczas tego procesu może wystąpić zmienna wartość momentu hamującego, ponieważ warstwa ta nie jest usunięta jednocześnie z całej tarczy. Drastycznym uszkodzeniem jest adhezyjne szepienie okładziny klocka z tarczą hamulcową występujące po dłuższym postoju. W momencie ruszania przy niewielkim szepieniu tarcza zostaje „uwolniona” pomiędzy klocków, natomiast silna korozja powierzchni tarczy powoduje konieczność przetoczenia tarczy lub jej wymiany.



Rys. 5. Produkty zużycia materiału ciernego wtarte w powierzchnię tarczy hamulcowej [1]

Fig. 5. The wear debris of the frictional materials rubbed in the surface of the brake disc.

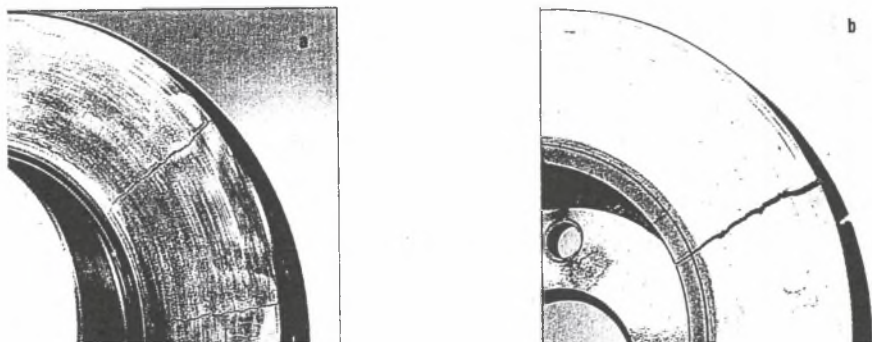


Rys. 6. Korozja powierzchni roboczej z odcisniętym klockiem hamulcowym [1]

Fig. 6. The corrosion of the working surface with the brake shoe trace

### 4.4. Pęknięcia tarcz hamulcowych

Pęknięciom tarcz hamulcowych towarzyszą odgłosy dobiegające od strony koła o częstotliwości rosnącej wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Może wystąpić pulsacja momentu hamującego, mimo stałego nacisku na pedał hamulca. Pęknięcie części roboczej tarczy powoduje szybkie zużywanie klocków. Zjawisko to intensyfikuje się po nagraniu tarczy w wyniku poszerzenia pęknięć [1, 5].



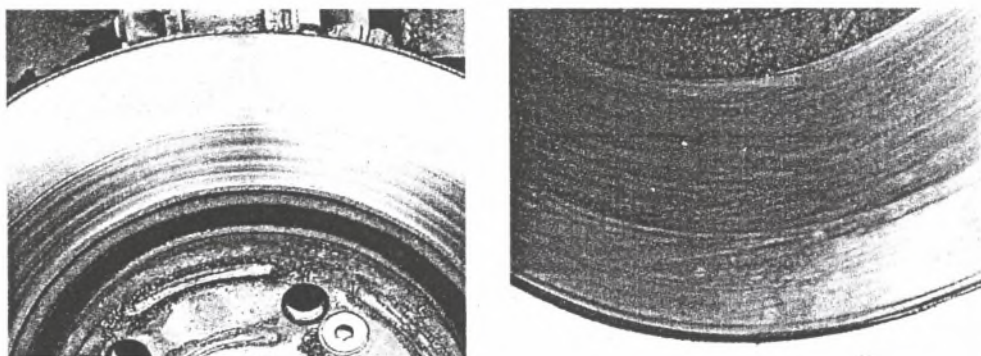
Rys. 7. Pęknięcie tarczy hamulcowej na skutek wysokich temperatur (a) i przeciążeń mechanicznych (b) [1]  
 Fig. 7. The crack of the brake disc resulting from high temperatures (a) and mechanical overloads (b)

#### 4.5. Utleniona powierzchnia robocza tarczy hamulcowej

Zmiana barwy na powierzchni roboczej spowodowana jest osiągnięciem dopuszczalnych temperatur pracy i utleniania dla tarczy hamulcowej. Do przyczyn powstawania zjawiska utleniania można zaliczyć:

- dynamiczną jazdę z obciążonym samochodem, jazda w górach;
- nieprawidłowe dotarcie klocka do tarczy;
- częściowa współpraca powierzchni klocka z częścią roboczą tarczy w skutek blokowania się okładziny w zacisku lub nieprawidłowego prowadzenia.

Krótkotrwałe obniżenie skuteczności hamulców wynika z współpracy powierzchni ciernej klocka z cieniutką warstwą tlenków występujących na powierzchni roboczej tarczy, a nie z właściwym materiałem tarczy. Ponieważ są to zmiany na powierzchni tarczy, można usunąć je za pomocą toczenia (szlifowania) powierzchni roboczej, o ile jej grubość na to pozwala [1, 5].

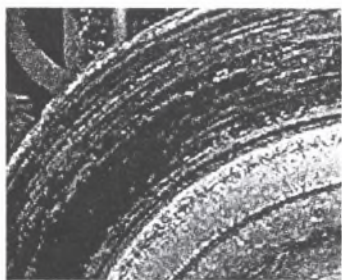


Rys. 8. Występowanie odbarwień na powierzchni roboczej tarcz hamulcowych  
 Fig. 8. The occurrence of discolorations on the working surface of the brake discs

#### 4.6. Rowki na powierzchni roboczej tarczy hamulcowej

Na skutek zużywania ściernego spowodowanego dostaniem się pomiędzy klocek i tarcze np. ziarenek piasku powstają na powierzchni roboczej tarczy rowki wzdłuż kierunku śli-

zganiania klocków. Występowanie rowków prowadzi do zmian wartości momentu hamującego. Zjawiskiem towarzyszącym występowaniu rowków są drgania i piski. Często jednak nie ma żadnych objawów świadczących o tym, że na powierzchni roboczej występują rowki. Jest to spowodowane wzajemnym dopasowaniem elementów ciernych w skojarzeniu. Jeżeli natomiast tarcza z rowkami będzie współpracować z nowymi klockami hamulcowymi, to wpłynie to na obniżenie skuteczności hamulców, ponadto układ będzie wrażliwy na zmiany termiczne, co może spowodować występowanie tzw. fadingu, czyli zbyt dużą utratę skuteczności w wyniku wzrostu temperatury klocków hamulcowych [1, 6].



Rys. 9. Współosiowe rowki na powierzchni roboczej tarczy hamulcowej oraz klocka  
Fig. 9. The coaxial furrows on the working surface of the brake disc and brake shoe

## 5. PODSUMOWANIE

Zachodzące w węzłach tarcia procesy trybologiczne wystawiają skojarzenie tarcza - klocek na działanie zmiennych obciążeń termicznych. Intensywne nagrzewanie powierzchni tarczy w procesie hamowania jest częściowo kompensowane chłodzącym strumieniem powietrza przepływającego przez elementy układu hamulcowego w trakcie ruchu pojazdu. Przekroczenie zakresu temperatury pracy powoduje powstawanie niekorzystnych zjawisk przegrzania powierzchni roboczej tarczy hamulcowej. Skutkuje to zmianami w strukturze materiału, w konsekwencji obniżeniem momentu hamującego i zjawiskiem pulsacji podczas hamowania. Taki układ jest źródłem drgań przenoszonych na pojazd. Obciążenia mechaniczne, na jakie narażony jest układ, mogą doprowadzić do powstawania pęknięć na powierzchni, a warunki atmosferyczne powiązane z niską częstotliwością użytkowania prowadzą do korozji. Dokładne poznanie omówionych skrótowo zjawisk występujących w elementach hamulców tarczowych podczas eksploatacji pojazdów pozwoli na opracowanie metody zapobiegania tym niekorzystnym ze względów ekonomicznych i bezpieczeństwa zjawiskom.

## Literatura

1. Auto Moto Serwis. Hamulce tarczowe. Poradnik serwisowy, nr 11, 2001.
2. Auto Moto Serwis. Układ hamulcowy, nr 3, 2005.
3. Liter R.: Hamulce samochodów osobowych i motocykli. WKŁ, Warszawa 1998.
4. Ścieszka F.: Hamulce cierne. Wydawnictwo ITE, Gliwice-Radom 1998.
5. Auto Moto Serwis. Badanie hamulców. Poradnik serwisowy, nr 4, 2002.
6. Informator Techniczny Bosch. Konwencjonalne układy hamulcowe. WKŁ, Warszawa 2001.