

PORADNIK

Nr 4/2002

cena 25 zł (w tym 7% VAT)

SERWISOWY

KOMPENDIUM PRAKTYCZNEJ WIEDZY WARSZTATOWEJ

ISSN 1643-4609



Badanie hamulców

- ✓ budowa stanowiska
- ✓ warunki pomiaru
- ✓ stanowisko w SKP

1. Hamowanie pojazdu

Badania hamulców

Jerzy R. Bogdański



Spis treści

1. Hamowanie pojazdu - teoria	5
1.1. Zamienić energię	6
1.2. Ciepło w hamulcach - teoretycznie i praktycznie	9
1.3. Hamulce tarczowe	10
1.4. Równowaga sił - równowaga momentów	12
1.5. Materiały	13
1.6. Wentylowane tarcze	14
1.7. Obciążenia cieplne - obciążenia mechaniczne	16
1.8. Hamulce bębnowe	18
1.9. Hamulce bębnowe - mechanizmy uruchamiania	19
1.10. Badanie hamulców - ciepło - krótkie podsumowanie	20
1.11. Korzystne tarcie	20
1.12. Hamowanie na drodze	21
1.13. Opona samochodu	22
1.14. Szttywne koło - sztywna nawierzchnia	22
1.15. Sprężyste koło - sztywna nawierzchnia	24
1.16. Przyczepność	25
1.17. Ocena skuteczności hamowania	26
1.18. Proporcjonalne siły	27
1.19. Stanowiska do pomiaru sił hamowania	28
2. Budowa najprostszego stanowiska	29
2.1. Koło na rolkach	29
2.2. Mierzymy siłę hamowania	30
2.3. Cechy szczególne pomiaru siły hamowania	31
3. Niepotrzebne blokowanie	32
4. Szczegóły konstrukcyjne	33
4.1. Sprawdzić dokładnie	34
4.2. Badać, sprawdzać, obsługiwać	36
4.3. Dodatkowe hamulce	37
4.4. Badanie stanu technicznego hamulców w świetle przepisów obowiązujących w SKP	38
4.5. Czynności kontrolne	40
4.6. Przepisy ogólne	40
5. Warunki pomiaru sił hamowania	53
5.1. Pomiar opóźnienia hamowania	54
5.2. Ocena skuteczności hamowania	54
6. Stanowisko w SKP	55
6.1. Wyposażenie technologiczne	58
6.2. Elementy pomiarowe	59
6.3. Elementy sterowania	59
6.4. Wskaźniki	59
6.5. Pożyteczne dodatki	60
6.6. Zamiast zakończenia	61

1. Hamowanie pojazdu - teoria

Układ hamulcowy jest jednym z podstawowych układów każdego pojazdu. Prawidłowe działanie tego układu zapewnia bezpieczne poruszanie się pojazdu po drodze; kontrola stanu układu jest podstawową czynnością kontrolno-diagnostyczną, wykonywaną podczas okresowej obsługi pojazdu i badania technicznego w SKP.

Do czego służą hamulce?

Pytanie jest pozornie tak proste, jak i najczęściej udzielana odpowiedź: do zatrzymania pojazdu.

Jest to jednak tylko część prawidłowej odpowiedzi. W rzeczywistości zagadnienie hamowania pojazdu jest bardziej złożone i dotyczy zarówno zagadnień teoretycznych, związanych z ruchem pojazdu, jak i praktycznych, związanych z konstrukcją pojazdu.

Uwzględniając mocno zarysowany problem bezpiecznego ruchu pojazdu, istotne są również użyt-

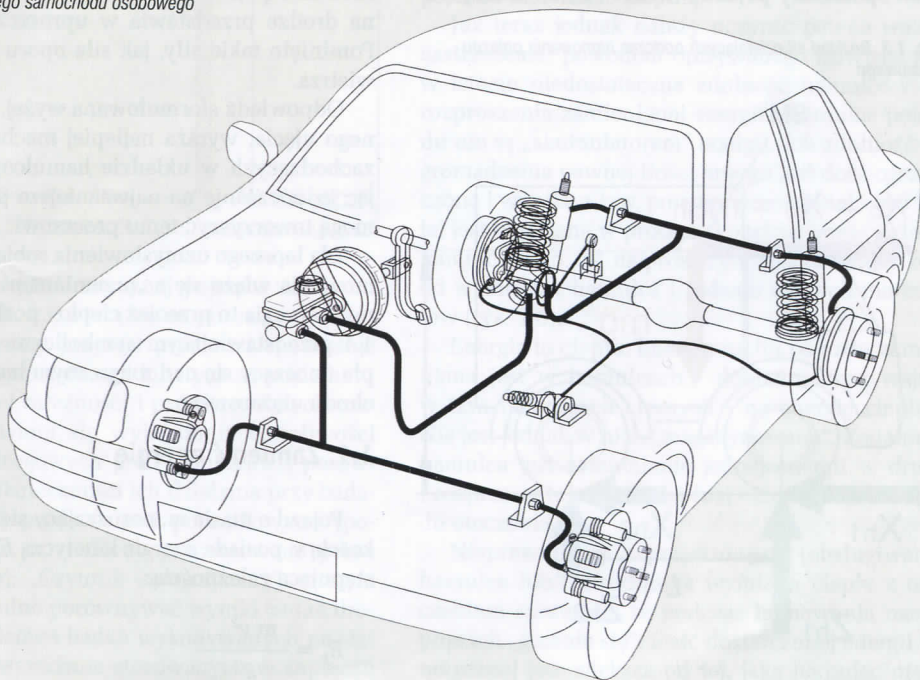
kowanie i technologia procesu obsługi i napraw, zapewniająca właściwe parametry eksploatacyjne układu, a zwłaszcza jego niezawodność i trwałość.

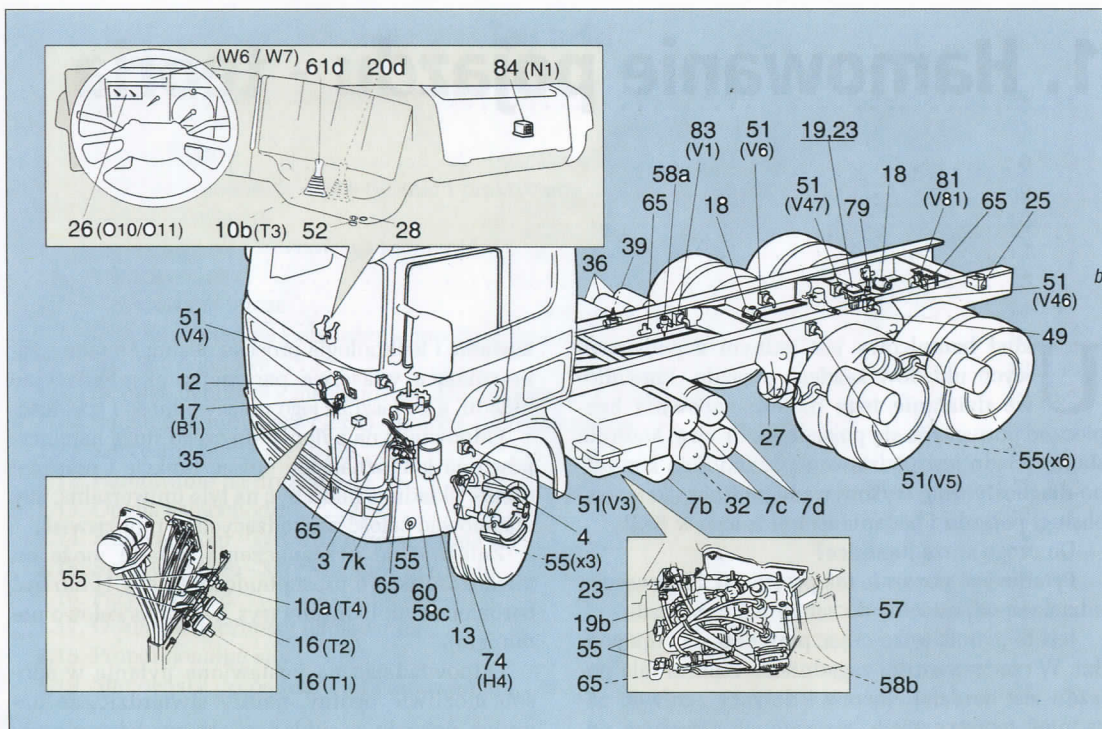
Odpowiedź na pytanie: do czego służą hamulce, powinna jednoznacznie opisać funkcję i przeznaczenie układu, a także być na tyle uniwersalna, aby obejmować całość zachodzących w nim zjawisk.

Zależnie od przeznaczenia układu może on mieć stosunkowo prostą budowę (rys. 1.1) lub być bardziej skomplikowany (rys. 1.2 - opis celowo pominięto).

Odpowiadając na postawione pytanie w sposób możliwie ogólny, należy stwierdzić, że hamulce pojazdu są układem, który dokonuje zamiany energii kinetycznej pojazdu (wynikającej z jego ruchu) na energię cieplną, rozpraszaną do otoczenia. Należy zauważyć, że hamulce pojazdu służą nie tylko do zatrzymania, ale przede

Rys. 1.1. Przykład budowy najprostszego - hydraulicznego układu hamulcowego samochodu osobowego

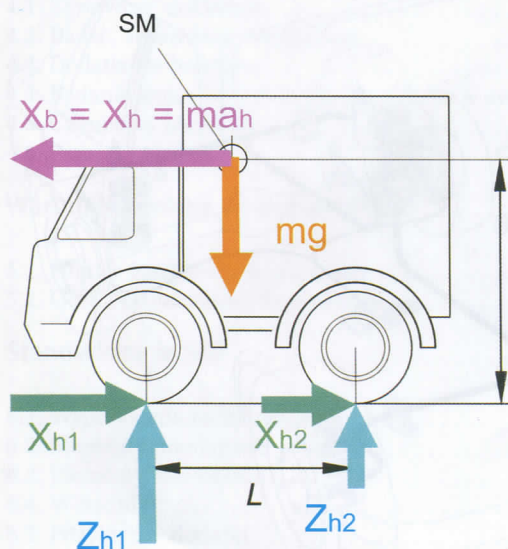




Rys. 1.2. Przykład budowy - rozmieszczenia elementów w pneumatycznym układzie uruchamiania hamulców samochodu użytkowego

wszystkim do zmiany prędkości pojazdu (zatrzymanie jest więc przypadkiem ogólnym, kiedy prędkość końcowa jest równa zero). Rozpatrując ruch opóźniony pojazdu (hamowanie), należy od-

Rys. 1.3. Rozkład sił działających podczas hamowania pojazdu 2-osiowego



nieść się do sił działających na pojazd w tak określonych warunkach.

Ilustrację rozkładu sił działających podczas hamowania pojazdu 2-osiowego (tzw. model płaski) na drodze przedstawia w uproszczeniu rys. 1.3. Pominięto takie siły, jak siła oporu toczenia i powietrza.

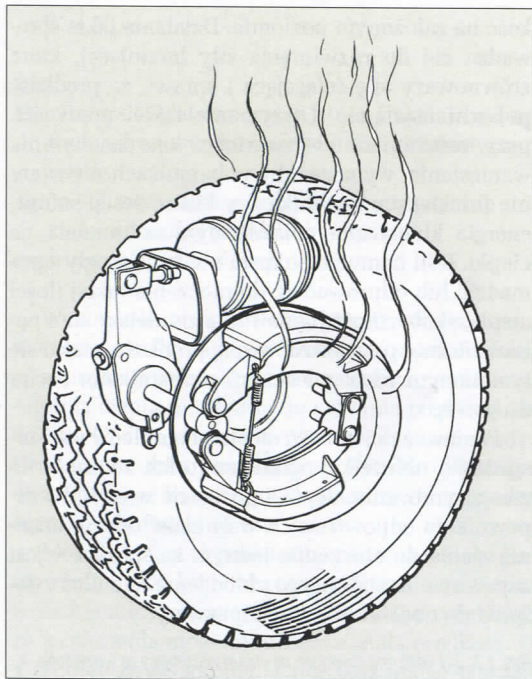
Odpowiedź sformułowana wyżej, pomimo ogólnego ujęcia, wyraża najlepiej mechanizm zjawisk zachodzących w układzie hamulcowym, wskazując jednocześnie na najważniejsze problemy, jakie mogą towarzyszyć temu procesowi.

Dla lepszego uzmysłowania sobie, że proces hamowania wiąże się z „przemianami energetycznymi” - energia to przecież ciepło - posłużymy się rys. 1.4 przedstawiającym symbolicznie strumień ciepła unoszący się nad rozgrzanym hamulcem samochodu ciężarowego.

1.1. Zamienić energię

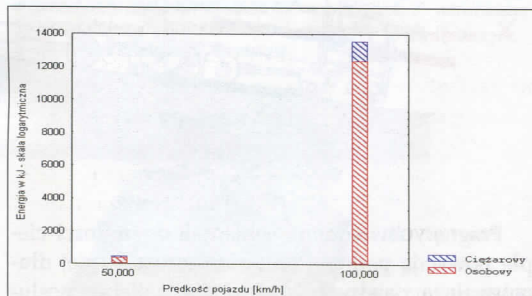
Pojazd o masie m , poruszający się z pewną prędkością v , posiada energię kinetyczną E_k wyrażoną następującą zależnością:

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



Rys. 1.4. Symboliczne przedstawienie strumienia ciepła unoszącego się nad rozgrzanym hamulcem samochodu ciężarowego

Rys. 1.5. Porównanie ilości ciepła wytwarzanego podczas dwóch prób hamowania



Wartość energii kinetycznej pojazdu zależy od kwadratu prędkości, z jaką się on porusza, co oznacza, że dwukrotny przyrost prędkości spowoduje czterokrotny wzrost energii kinetycznej pojazdu.

W tej prostej zależności i przedstawionych rozważaniach zawiera się wyjaśnienie wątpliwości dotyczących drogowych prób hamulców i porównywania tzw. skuteczności ich działania przy badaniu z różnymi prędkościami początkowymi (porównania takie są niekiedy prezentowane przez prasę fachową). „Czynnik energetyczny” sprawia również, że trudno porównywać wyniki badań drogowych hamulców i badań wykonywanych na stanowiskach powszechnie stosowanych w zapleczu motoryzacji. Zagadnienie to będzie opisane dalej.

Układ hamulcowy samochodu, wykazujący dobrą skuteczność podczas próby hamowania przy prędkości początkowej np. 60 km/h (aż do zatrzymania), może wykazać pozornie trudną do zinterpretowania niską skuteczność podczas próby, w której prędkość początkowa została zwiększona np. do 100 km/h.

Dla lepszego określenia ilości ciepła powstającego podczas hamowania pojazdów, dokonano obliczenia wartości energii wytworzonej podczas hamowania dwóch rodzajów samochodów: osobowego - o masie 1000 kg i użytkowego (ciężarowego o masie całkowitej 32 t), hamujących do zatrzymania od prędkości początkowej 50 i 100 km/h.

Ilość powstającego ciepła najlepiej odnieść do ciepła niezbędnego do zagotowania określonej liczby litrów wody o temperaturze początkowej 293°K (20°C). Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 1 oraz na rys. 1.5. Obliczenie objętości wody, jaką można zagotować dostarczając obliczonej ilości ciepła, pozostawiamy Czytelnikom.

Tablica 1

Numer próby	Hamowanie 50	Hamowanie 100
Pojazd 1 - osobowy	96388 J	385694 J
Pojazd 2 - ciężarowy	3084444 J	12342222 J

Dokonując pewnego uproszczenia można założyć, że podstawową przyczyną tak opisanego zjawiska jest brak dostatecznie dobrej zamiany energii pojazdu na energię cieplną.

Już teraz jednak należy uczynić pewne ważne zastrzeżenie: powodem opisywanego zjawiska jest w istocie niedostateczna zdolność hamulców do rozproszenia zamienianej energii - hamulce pojazdu nie są „akumulatorem” energii. Ich zdolność do gromadzenia pewnej ilości energii jest dość ograniczona i wynika z tzw. pojemności cieplnej - ta z kolei jest określana w procesie konstruowania układu hamulcowego. W najprostszym ujęciu zależy ona od wymiarów hamulca i rodzaju użytych materiałów (rys. 1.6).

Energia to ciepło. Energia ruchu pojazdu zamieniana jest w hamulcach - dokładnie nazywając: w tzw. hamulcach ciernych - na energię cieplną. Nie jest jednak w nich „magazynowana”. Zadaniem hamulca jest zamienianie jednej energii w drugą i rozpraszanie energii cieplnej - ciepła - na bieżąco do otoczenia.

Nieprawidłowo zaprojektowane (obsługiwane) hamulce lub/i utrudniona wymiana ciepła z otoczeniem sprawiają, że podczas hamowania następuje ich „grzanie się”. Ilość dostarczonej energii kinetycznej jest większa od tej, jaką hamulec może wypromieniować do atmosfery. Zwiększa się więc



Rys. 1.6. Budowa nowoczesnego hamulca tarczowego wykorzystującego kompozyt węglowy do budowy tarczy

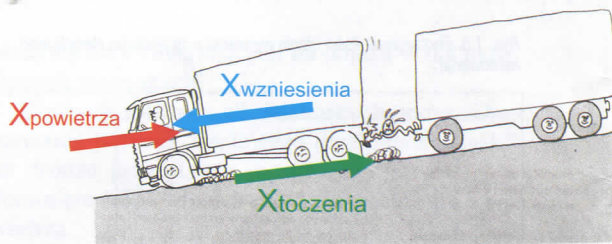
temperatura hamulca, a w ślad za tym obniża się zdolność hamulca do zamiany energii kinetycznej w energię cieplną. Tak opisany proces tworzy przysłowiowe „zamknięte koło”: obniżone możliwości zamiany energii powodują wzrost temperatury, wzrost temperatury zmniejsza możliwości zamiany energii - efektem jest gwałtowne zmniejszenie skuteczności działania hamulców, prowadzące w skrajnych przypadkach nawet do zaniku siły hamującej. Przytoczone zjawisko stało się podstawą stworzenia specjalnych konstrukcji hamulców przeznaczonych dla dużych (ciężkich) pojazdów użytkowych, które poruszają się po trasach o długich zjazdach, wymuszających użycie hamulców nie do zatrzymania pojazdu, a do utrzymania stałej, założonej prędkości jazdy.

Przypomnijmy, że pojazd zjeżdżający z wzniesienia (rys. 1.7) jest poddany działaniu sił wzdłużnych: siły oporu toczenia, siły oporu powietrza, siły oporu wzniesienia. Jeśli suma sił oporów powietrza i toczenia będzie mniejsza od siły ściąągającej ($X_p + X_t < X_w$), pojazd zacznie przyspieszać aż do chwili, gdy wymienione siły zrównoważą się. W wielu sytuacjach drogowych kierowca nie może dopuścić, aby pojazd rozwinął zbyt dużą prędkość. Musi zatem używać hamulców i utrzymywać prę-

kość na założonym poziomie. Działanie takie spowoduje się do rozwinęcia siły hamującej, która zrównoważy siłę ściągającą i sprawi, że prędkość pojazdu ustali się. Utrzymanie takiej prędkości, przy założeniu stałej wartości kąta nachylenia wzniesienia, wymaga, aby w hamulcach nieustannie (niekiedy przez kilka czy kilkadziesiąt minut) energia kinetyczna pojazdu była zamieniana na ciepło. Jeśli hamulce pojazdu nie będą mogły zgromadzić lub odprowadzić do otoczenia takiej ilości ciepła, skuteczność hamowania zmniejszy się i pojazd zacznie powiększać swoją prędkość, stając się tym samym niebezpiecznym uczestnikiem ruchu drogowego.

Ponieważ pojemność cieplna hamulców jest stosunkowo niewielka, ogranicza to ich zdolność do zmagazynowania ciepła - pozostaje więc tylko zapewnienie odpowiednich warunków odprowadzenia ciepła do otoczenia. Jednym ze sposobów jest zapewnienie właściwego chłodzenia hamulca i dążenie do obniżenia jego temperatury.

Rys. 1.7. Siły wzdłużne działające na pojazd zjeżdżający ze wzniesienia: X_t - siła oporu toczenia, X_p - siła oporu powietrza, X_w - siła oporu wzniesienia (zwrócona przeciwnie do dwóch wymienionych wyżej) nazywana w tym przypadku siłą „ściągającą”



Pragnąc uświadomić sobie, jak duże ilości ciepła powstają podczas omawianego wcześniej długotrwałego zjazdu ze wzniesienia, najlepiej posłużyć się odpowiednim przykładem liczbowym. Dociekliwości Czytelnika należy polecić wykonanie obliczeń dla pojazdu o masie całkowitej $m = 32$ t, zjeżdżającego ze wzniesienia o kącie nachylenia $\varphi = 5^\circ$ i długości $s = 5$ km z założoną stałą prędkością $v = 40$ km/h ($f_0 = 0,012$). Siłę oporu powietrza przy tak niskiej prędkości można uznać za pomijalnie małą. W przypadku większych prędkości pojazdu, nie powinno się pomijać sił oporów toczenia. Jedyną siłą przeciwstawiającą się sile ściągającej X_w będzie siła oporu toczenia. Różnica siły ściągającej - oporu wzniesienia i oporu toczenia umożliwi obliczenie siły hamującej X_h , którą będą musiały rozwinąć hamulce pojazdu tak, aby jego prędkość była stała. Dalsze obliczenia należy przeprowadzić w sposób przedstawiony niżej:

$$W = X_h \times s$$

gdzie:

W - praca sił tarcia (energia), która powstaje w hamulcach w wyniku zamiany energii kinetycznej na ciepło

X_h - siła hamowania, niezbędna do utrzymania stałej założonej prędkości

s - droga, jaką przebywa pojazd

Wykonanie obliczeń doprowadzi do wyniku, którego wartość najlepiej porównać z wielkością, jaką można wyobrazić sobie stosunkowo najłatwiej - ilością ciepła niezbędną do ogrzania o 80° (od 20 do 100°C) i zagotowania pewnej objętości wody. Ilość ciepła, jaka powstanie w wyniku opisanego wyżej procesu hamowania, wystarczy do tego, aby ogrzać i zagotować 45 dm³ wody.

Moc ($P = X_h \times v$) powstająca podczas takiego hamowania to 262 kW - taką trwałą (!) moc muszą rozwijać hamulce omawianego pojazdu, aby zjeżdżając ze wzniesienia mógł on utrzymać stałą prędkość.

Ponieważ wspomniana już pojemność cieplna hamulców jest zbyt mała, aby mogły one zgromadzić tak dużą wartość mocy (trudne byłoby również zapewnienie takich warunków pracy, w któ-

rych tak duża moc byłaby efektywnie rozpraszana do otoczenia), stosowane są specjalne mechanizmy ułatwiające pracę hamulców i przejmujące znaczną część mocy powstającej podczas długich zjazdów, np. w terenie górzystym.

Mechanizmy takie są nazywane zwalniczami lub zgodnie z terminologią anglojęzyczną - retarderami. Nie wnikając w szczegóły, są to hamulce hydrokinetyczne, które rozwijają określoną, regulowaną wartość momentu hamującego (rys. 1.8).

Hamulec hydrokinetyczny jest hamulcem „cieczowym” - czynnikiem roboczym jest ciecz wirująca w specjalnie profilowanych przekrojach, umożliwiającą efektywne rozproszenie dużej mocy. Zaletą takich mechanizmów jest minimalne tarcie występujące pomiędzy współpracującymi częściami. Praktycznie występuje ono tylko w łożyskowaniu elementów. Pożądany wysoki moment oporów osiągany jest „beztarciowo” - za pomocą strumienia wirującej cieczy.

Przytoczone rozważania, podkreślające energetyczny charakter zjawisk zachodzących w hamulcach, skłaniają do sformułowania bardzo ważnego stwierdzenia: badanie hamulców, niezależnie od tego, czy odniesione tylko do elementów ciernych, czy też do całego układu, powinno uwzględniać zagadnienia wymiany ciepła.

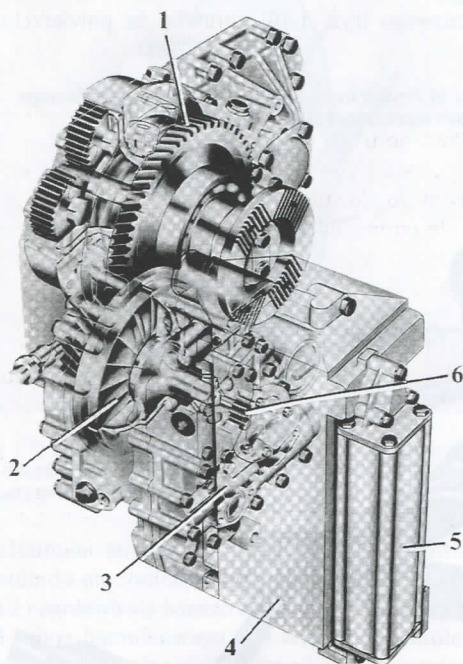
1.2. Ciepło w hamulcach - teoretycznie i praktycznie

Ciepło powstające w hamulcach jest naturalną konsekwencją zamiany energii z jednej postaci w drugą. Ciepło jest więc nieodłącznym „efektem” pracy hamulca, stanowiącym nieomal o istocie jego działania, wielkością, której nie sposób wyeliminować lub nawet zmniejszyć jej wartość osiąganą w procesie hamowania samochodu.

Jak wiadomo, ilość ciepła zgromadzona w hamulcu jest ograniczona, co wynika z omówionych wyżej cech konstrukcyjnych. Próba powiększenia pojemności cieplnej hamulca nie znajduje uzasadnienia zarówno technicznego (hamulce nie magazynują energii), jak i ekonomicznego - duży hamulec to ciężki i drogi hamulec (powodujący dodatkowo zwiększenie tzw. masy nieresorowanej zawieszenia).

Konieczne jest więc dobre odprowadzenie ciepła do otoczenia. Idealem byłoby odprowadzenie na tyle skuteczne, aby hamulec utrzymywał stałą, możliwie niską temperaturę - niestety, spełnienie takich założeń w praktyce staje się prawie niewykonalne. Powodem są przede wszystkim zmienne w czasie warunki chłodzenia. Rozpatrując jednokrotne hamowanie możemy stwierdzić, że przy wy-

Rys. 1.8. Przykład budowy zwalnicza hydrokinetycznego zastosowanego w samochodzie użytkowym: 1 - para kół napędzających, 2 - wirnik/stojan, 3 - moduł sterowania hydraulicznego, 4 - wymiennik ciepła, 5 - akumulator hydrauliczny, 6 - pompa



sokiej 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. Efekty są więc odwrotne do oczekiwanych: zimny hamulec jest chłodzony intensywnie, gorący - bardzo słabo. Wiele zależy od rodzaju hamulca ciernego (tarczowy/bębnowy), parametrów konstrukcyjnych (użytych materiałów) oraz technologii wykonania.

1.3. Hamulce tarczowe

Rozważania nad wyższością jednego rodzaju hamulca nad drugim należy pozostawić odrębnemu opracowaniu. Pomimo często podawanego uzasadnienia wskazującego na przewagę jednego hamulca nad drugim, najbardziej właściwe wydaje się być uzupełnienie rozważań o dodatkowe kryterium wyrażające się w odpowiedzi na pytanie o zakres zastosowania hamulca.

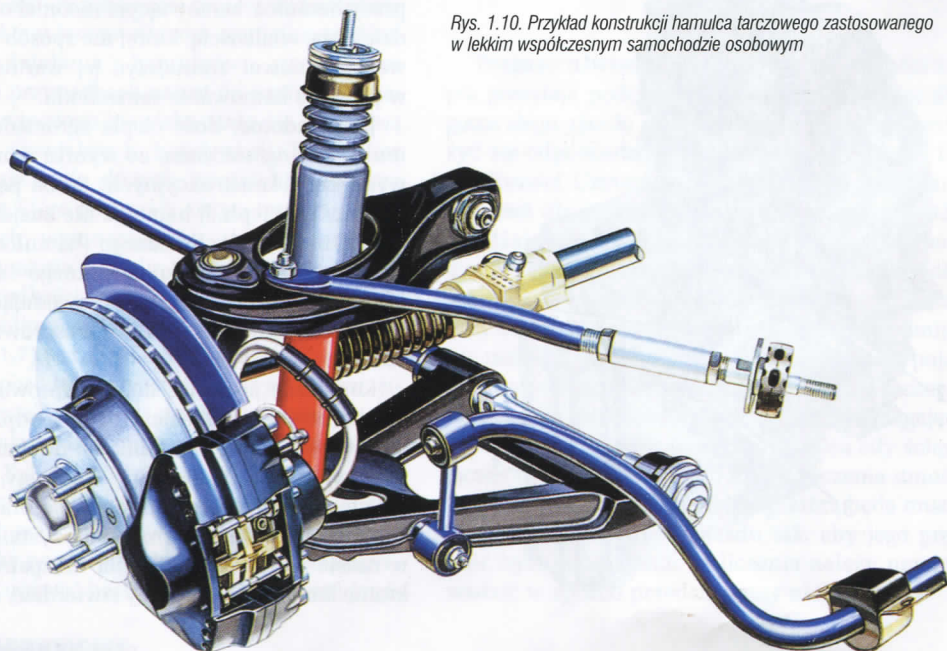
Podobnie ostrożnie należy traktować porównanie skuteczności działania hamulców - wszystko zależy od kryterium. Jeśli uwzględnimy tylko współczynnik intensywności hamowania γ_h , rozumiany jako stosunek opóźnienia hamowania do przyspieszenia ziemskiego ($\gamma_h = a_h/g$), to może okazać się, że hamulce bębnowe osiągają wartości porównywalne z hamulcami tarczowymi. Warto przy tym pamiętać, że jeszcze na przełomie lat 50. i 60. hamulce bębnowe były stosowane w samochodach



Rys. 1.9. Jedna z pierwszych konstrukcji zacisku hamulca tarczowego opracowana przez firmę Dunlop (1953 r.)

i motocyklach wyścigowych poruszających się z prędkościami ponad 200 km/h (rys. 1.9).

Istotna zaleta hamulca tarczowego nie wynika wprost ze skuteczności pojedynczego (jednorazowego) hamowania. „Otwarta” konstrukcja hamulca tarczowego (rys. 1.10) sprawia, że powierzchnia



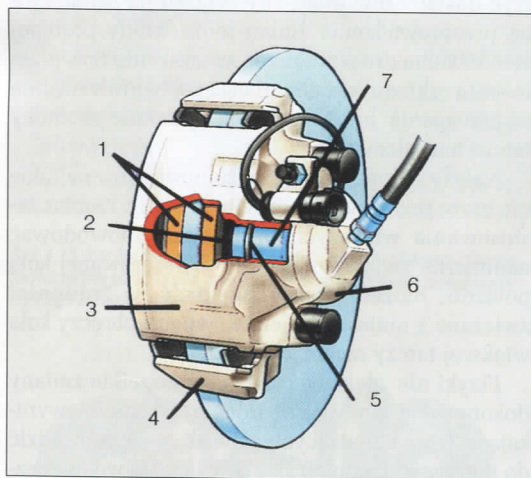
Rys. 1.10. Przykład konstrukcji hamulca tarczowego zastosowanego w lekkim współczesnym samochodzie osobowym



Rys. 1.11. Wentylowana tarcza hamulcowa widoczna zza „szprych” obręczy koła

tarczy ma ułatwiony kontakt z opływającym ją powietrzem - zapewnia to większą intensywność chłodzenia, powodując obniżenie temperatury współpracujących elementów (rys. 1.11). Niższa temperatura umożliwia utrzymanie stałej (lub bliskiej stałej) wartości współczynnika tarcia.

Efekty są jednoznaczne - obniżenie temperatury współpracujących elementów umożliwia osiągnięcie „prawie” stałej siły tarcia pomiędzy elementami. Uzyskano dzięki temu ustabilizowane (w pewnym zakresie temperatur i częstotliwości hamowania) wartości siły i momentu hamującego dla kolejno powtarzających się hamowań lub/i dla hamowania długotrwałego.



Rys. 1.12. Schematyczna budowa hamulca ciernego - tarczowego:
1 - okładziny ciernie, 2 - osłona przeciwpylowa, 3 - zacisk, 4 - wspornik,
5 - uszczelka, 6 - obudowa tłoka, 7 - tłok

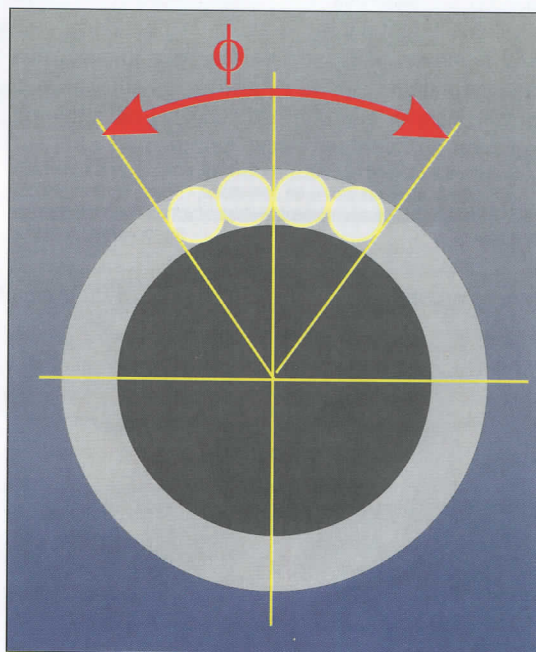
Hamulec tarczowy (rys. 1.12) lepiej odprowadza ciepło do otoczenia. Jest lepiej chłodzony i nawet, jeśli nagrzewa się bardzo szybko (niekiedy szybciej od bębna hamulcowego - ze względu na mniejszą pojemność cieplną), szybciej również stygnie. To

przede wszystkim sprawia, że zachowuje on przewagę nad hamulcem bębnowym, który wprawdzie nagrzewa się wolniej (gromadzi też w sobie więcej ciepła), równie wolniej stygnie. Jeśli hamowanie będzie powtarzało się cyklicznie, część ciepła z poprzedniego procesu pozostanie wewnątrz - każde kolejne hamowanie będzie rozpoczynało się przy wyższej temperaturze początkowej, prowadząc do całkowitego zaniku siły hamowania.

Nie znaczy to jednak, że hamulce tarczowe pozbawione są tej cechy. Tutaj również może zaistnieć takie samo zjawisko - wszystko zależy od rozwijanej intensywności i częstotliwości hamowania.

Hamulce tarczowe okazały się przy tym bardzo podatne na modyfikacje, wynikające przede wszystkim z wymagań konstruktorów dotyczących zmniejszania masy nieresorowanej hamulca ciernego przy zachowaniu wymaganej skuteczności hamowania. Zabiegiem takim towarzyszy pewien kompromis dość trudny do osiągnięcia, zwłaszcza w samochodach małolitrażowych - lekkich i tanich. Mała tarcza hamulcowa jest lekka (mała masa nieresorowana), wytwarza jednak relatywnie mały moment hamowania. Powiększenie tarczy nie jest możliwe, ponieważ musi być umieszczona wewnątrz obręczy koła o małej średnicy. Dążąc do osiągnięcia odpowiedniego momentu hamującego wymagane jest rozwinięcie dużej siły tarcia - w tym przypadku osiągane jedynie przez zastoso-

Rys. 1.13. Schematyczny wygląd tarczy hamulcowej z zaznaczonym kątem „opasania”



wanie dużej siły nacisku okładziny, tzw. klocka na tarczę. Dla danej (niewielkiej) średnicy tarczy powierzchnia okładziny nie może być duża (rys. 1.13). Kąt „opasania” - działania okładziny ciernej w niektórych rozwiązaniach jest równy kątowi działania tłoczków siłowników. Chcąc zachować dużą powierzchnię „klocka” trzeba zwiększyć kąt „opasania”. Przy małej i wąskiej tarczy tłok siłownika jest również niewielkiej średnicy - oddziałuje na okładzinę i tarczę prawie „punktowo”, pozostała część okładziny nie jest już dociskana z tą samą siłą (okładziny nie są wykonane z materiału doskonale sztywnego), a nawet nie przylega prawidłowo do tarczy. Tworzy się lokalne skupienie siły nacisku i temperatury, co sprzyja dodatkowo odkształcaniu się okładziny - rzeczywista siła tarcia (moment hamujący) jest mniejsza od obliczonej. Sposobem na rozwiązanie tego problemu jest zwiększanie liczby tłoczków siłowników. Hamulce tarczowe pojazdów wyczynowych mają nawet po osiem tłoczków.

1.4. Równowaga sił - równowaga momentów

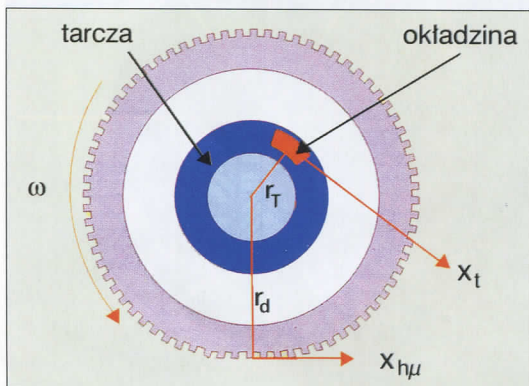
Zagadnienie dobrze ilustruje rys. 1.14, przedstawiający równowagę sił i momentów działających na hamowane koło.

Jeśli do naszych rozważań wykorzystamy analizę rysunku, to zapiszemy:

$$X_{hu} \times r_d = X_t \times r_T$$

Zapis ten oznacza, że moment pochodzący od siły hamowania X_{hu} , działającej na ramieniu równym promieniowi koła r_d , jest równy sile tarcia X_t , powstającej w hamulcu i działającej na ramieniu równym promieniowi tarczy hamulcowej r_T .

Rys. 1.14. Równowaga sił i momentów działających na koło i hamulec tarczowy



Możemy też zmienić zapis i przedstawić go w postaci:

$$X_t = \frac{r_d}{r_T} X_{hu}$$

Założmy teraz, że do zahamowania pojazdu potrzebna jest określona siła hamująca X_{hu} . Siłę tę uzyskujemy przez zaciśnięcie okładzin ciernych na tarczy hamulca i wytworzenie odpowiedniej siły tarcia. Im mniejsza będzie tarcza, tym większa będzie potrzebna siła tarcia, która pozwoli na otrzymanie założonej siły hamującej. Sytuacja będzie również odwrotna - im większa będzie tarcza, tym mniejsza siła tarcia spowoduje zamierzony efekt.

Dodatkowo uzyskujemy także działanie niezwykle istotne w przypadku pojazdów wyczynowych: mniejsza siła tarcia to mniejsze nagrzewanie się tarczy i okładzin, a tym większa odporność na obciążenia termiczne. Większa średnica tarczy to także większy obwód, a to z kolei sprawia, że poprawiają się warunki jej chłodzenia.

Wiemy już, że siła tarcia wytwarzana przez hamulec tarczowy zależy od siły nacisku okładzin na tarczę. Większa siła nacisku okładzin to również wynik działania większej siły nacisku na pedał hamulca. Może się jednak okazać, że parametry układu hamulcowego okażą się na tyle niewłaściwie dobrane, że człowiek nie będzie w stanie wytworzyć dostatecznie dużej siły nacisku na pedał. Próba przeprowadzenia zmian może wtedy postępować kilkoma drogami: przez zwiększenie tzw. przełożenia układu uruchamiającego, wprowadzenie wspomagania lub właśnie zwiększenie średnicy tarczy hamulcowych.

Należy jednak pamiętać, że postępowanie takie nie może przebiegać w sposób dowolny. Zamiar zastosowania większych tarcz może spowodować nadmierne zwiększenie masy nieresorowanej koła pojazdu, możemy także napotkać na trudności związane z umieszczeniem wewnątrz obręczy koła większej tarczy razem z zaciskiem.

Fizyki nie „daje się oszukać” - wszelkie zmiany dokonywane bez uwzględnienia zależności wynikających z zachodzących zjawisk mogą prowadzić do nieprzewidywanych skutków i być nawet niebezpieczne.

Nie wnikając głębiej w przedstawione zależności matematyczne, należy stwierdzić, że im większa jest różnica pomiędzy promieniem dynamicznym opony hamowanego koła i promieniem działania siły tarcia w zacisku, tym (dla danej siły hamującej) wymagana jest większa siła tarcia. Większa siła tarcia, dla ustalonego zakresu współczynnika tarcia, może być osiągnięta tylko dzięki większej si-

le nacisku okładzin na tarczę. Większa siła nacisku to również większe naciski jednostkowe, których wartość wiąże się bezpośrednio z powstawaniem większej temperatury pomiędzy trącymi elementami. Wyższa temperatura to mniejsza siła tarcia - i w ten sposób obieg zamyka się.

Sposobem przeniesionym z pojazdów wyczynowych jest zwiększenie intensywności chłodzenia elementów hamulca - tarcze są elementem szczególnie podatnym na podobne zabiegi konstruktorskie.

Stosowanie specjalnych materiałów, np. tarcz wykonanych z kompozytu grafitowego (rys. 1.6), ogranicza się do pojazdów wyczynowych (np. Formuły 1), przede wszystkim ze względu na cenę. W samochodach powszechnego użytku materiałem stosowanym na tarcze i bębny hamulcowe (zarówno w samochodach osobowych, jak i użytkowych) jest żeliwo szare. W wyjątkowych przypadkach stosowane są inne stopy.

1.5. Materiały

Jak wspomniano, podstawowym materiałem stosowanym na tarcze i bębny hamulcowe jest żeliwo szare. Wynika to z kilku podstawowych właściwości tego materiału. Podstawowe właściwości

fizyko-chemiczne podstawowych stopów żelaza, które mogą być uwzględnione przy konstruowaniu tarcz/bębnow, zestawiono w tablicy 2.

Decydując się na wybór materiału, z którego będą wykonane tarcze/bębny hamulcowe, należy uwzględnić wiele parametrów decydujących zarówno o technologii wykonania, jak i o właściwościach użytkowych wyrobu.

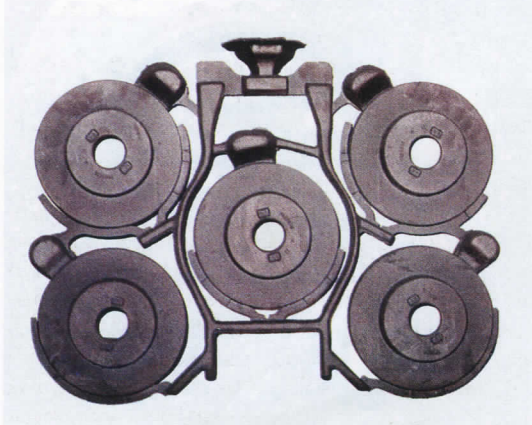
Tarcze i bębny hamulcowe wykonuje się najczęściej jako odlewy (rys. 1.15). Wspomniane już konstrukcje wykonane z kompozytów powstają jako elementy zgrzewane - prasowane w wysokiej temperaturze. Odlewy są poddawane następnie odpowiedniej obróbce skrawaniem. Wygląd rdzenia formy odlewniczej umożliwiającej uzyskanie tzw. wentylowanej tarczy hamulcowej przedstawia rys. 1.16.

Pożądane jest użycie materiału o podwyższonej zawartości węgla (prezentowana na rys. 1.6 tarcza kompozytowa jest wykonana z grafitu - zachowuje dzięki temu dużą odporność na temperaturę jest również twarda, a przede wszystkim lekka). Wysoka zawartość węgla w stopie żelaza zapewnia odporność na temperatury powstające w wyniku działania sił tarcia. Stop taki jest również twardy i odporny na zużycie.

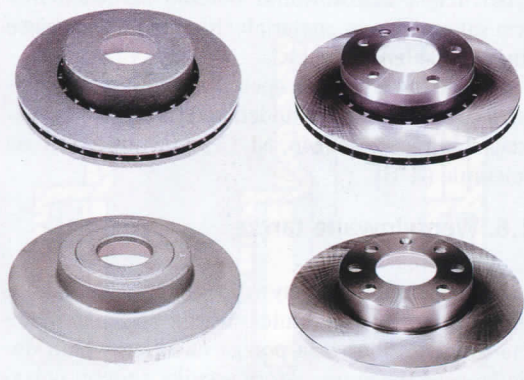
Tablica 2

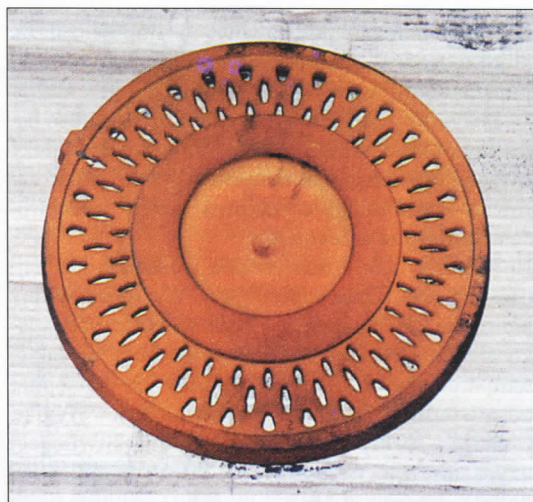
	Zawartość węgla	Dodatki	Temperatura	Twardość wg Brinella
Żeliwo „surówka”	0,1-0,2		1500 C	50
Stal konstrukcyjna	0,4-0,5	1% Mn, 1% Ni, 1% Cr	1450	100-200
Stal narzędziowa	0,8-1,0	2% Mn, 3% Cr	1400	100-200
Stal szybkotnąca	0,2	8% Ni, 18 Cr	1455	320-380
Żeliwo białe	3,0		1300	400-600
Żeliwo szare	3,2-3,7	2% Si, 0,4% Mn	1200	170-270

Rys. 1.15. Wygląd typowego „półfabrykatu” - odlewu z kilkoma tarczami hamulcowymi połączonymi przewodami, które umożliwiają przepływanie płynnego żeliwa od jednej części formy do drugiej



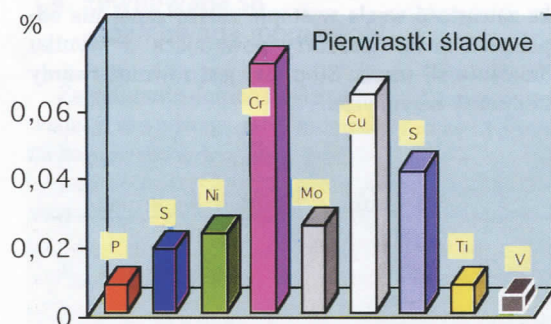
Rys. 1.15a. Wygląd tarczy hamulcowej przed i po obróbce skrawaniem (zdjęcia po lewej stronie - półfabrykat, po prawej tarcza po zakończonej obróbce - widoczne „rysy” na powierzchni tarczy są wynikiem pracy narzędzia skrawającego)





Rys. 1.16. Wygląd rdzenia formy odlewniczej umożliwiającej uzyskanie tzw. wentylowanej tarczy hamulcowej

Rys. 1.17. Żeliwo szare, wzbogacone dodatkami



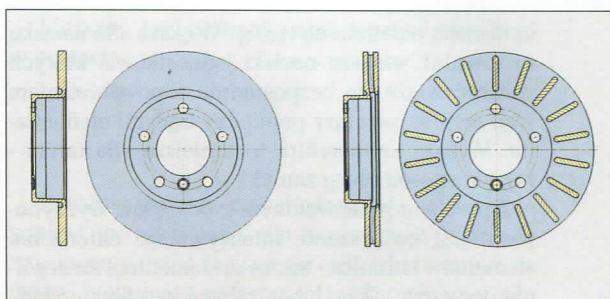
Biorąc pod uwagę tylko temperaturę i twardość, najlepszym materiałem wydaje się być żeliwo białe. Niestety, jest to materiał kruchy i ze względu na swoją twardość bardzo trudny do obróbki mechanicznej.

Stal jest materiałem doskonałym, jednak wykonanie tarczy/bęba hamulcowego byłoby możliwe tylko dzięki zastosowaniu obróbki skrawaniem - tym samym drogą, materiałochłonne i wymagające dużych nakładów pracy.

Większość wymagań spełnia natomiast tzw. żeliwo szare, wzbogacone dodatkami (rys. 1.17) zwiększającym twardość (Mn, Ni, Cr) oraz odporność na ścieranie (P, Ti).

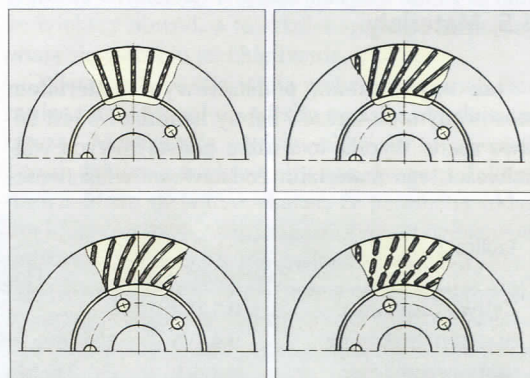
1.6. Wentylowane tarcze

Zwiększenie intensywności chłodzenia elementów ciernych hamulca można osiągnąć dwiema drogami. Pierwsza polega na skierowaniu dodatkowego (poza tym, który wynika z ruchu pojaz-



Rys. 1.18. Różnica w budowie „zwykłej” i wentylowanej tarczy hamulcowej

du) strumienia powietrza na zacisk i fragment tarczy lub/i, druga - na zwiększeniu powierzchni wymiany ciepła z otoczeniem i wykorzystaniu ruchu wirowego tarczy do zwiększenia prędkości przepływu powietrza.



Rys. 1.19. Przykłady rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych, których zadaniem jest zwiększenie intensywności przepływu strumienia powietrza

Rys. 1.20. Wygląd tarczy hamulcowej z wykonanymi otworami osiowymi, przeznaczonej dla samochodu wyczynowego



Na rys. 1.18 przedstawiono schematycznie różnicę w budowie „zwykłej” i wentylowanej tarczy hamulcowej, a na rys. 1.19 przykłady rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych, których zadaniem jest zwiększenie intensywności przepływu strumienia powietrza.

Obydwa wymienione sposoby zostały opracowane i nadal są stosowane w pojazdach wyczynowych. Potrzeby były oczywiste: intensywne i częste hamowania prowadziły do znaczącego wzrostu temperatury hamulca, co, jak wspomniano, prowadzi do zmniejszenia jego skuteczności. Historyczna zmiana konstrukcyjna, polegająca na umieszczeniu kół wewnątrz nadwozia pojazdu, utrudniła dodatkowo chłodzenie naturalnie przepływającą strugą powietrza. Podobnie zastosowanie przednich spoilerów ograniczyło ilość powietrza przedostającego się pod nadwozie i docierającego do wnętrza kół. Zaradzono temu, łącząc za pomocą elastycznej rury o średnicy ok. 100 mm spoiler pojazdu (obszar podciśnienia) z wybranymi elementami ciernymi hamulca.

Powietrze wtłaczane do rury przymocowanej do odpowiednio ukształtowanego spoileru przepływało np. do zacisku hamulca tarczowego, wydlatnie obniżając jego temperaturę.

Chłodzenie tego typu miało jednak pewną wadę - intensywność chłodzenia zmniejszała się wraz z obniżeniem prędkości pojazdu. Aby temu zapobiec pojawiły się pojazdy z obiegiem powietrza wymuszonym za pomocą wentylatorów tłoczących powietrze do hamulca. Intensywność chłodzenia zmniejszała się wprawdzie ze zmniejszeniem prędkości pojazdu, niemniej pozostawała na poziomie zapewniającym chłodzenie również przy małej prędkości pojazdu - tuż przed jego zatrzymaniem. Wtedy, gdy naturalne chłodzenie wywołane ruchem pojazdu było najmniejsze, a jednocześnie najbardziej potrzebne - hamulec po dłuższym ha-



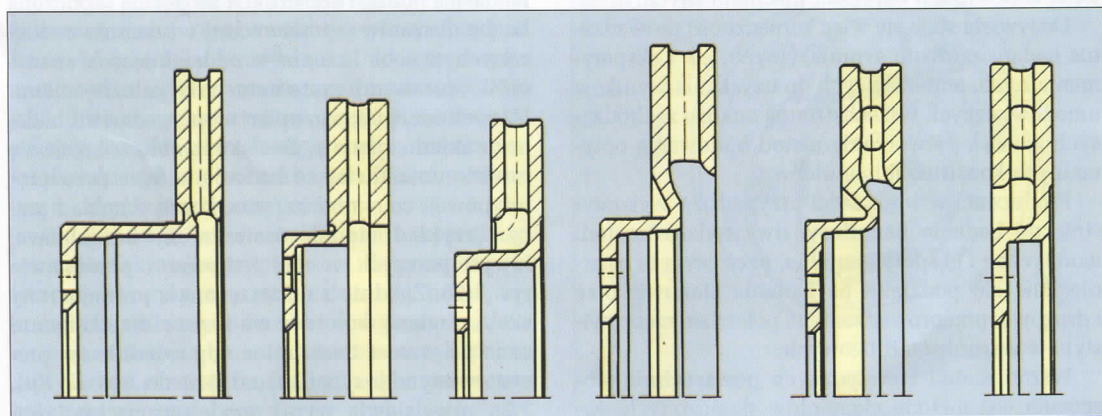
Rys. 21. Zastosowanie podwójnej liczby tarcz hamulcowych i zacisków

mowaniu rozgrzewał się najbardziej i wtedy właśnie intensywne chłodzenie okazywało się najbardziej pożądane. Rozwiązanie takie, pomimo rozbudowanej konstrukcji, jest stosowane do dzisiaj głównie w pojazdach wyścigowych o kołach umieszczonych wewnątrz nadwozia.

Drugi ze sposobów zakładał wykonanie w tarczy otworów osiowych lub/i promieniowych ułatwiających przepływ powietrza „wewnątrz” tarczy (rys. 1.18, 1.19). Osiągnięto dzięki temu zwiększenie powierzchni wymiany ciepła (zwłaszcza dla otworów promieniowych).

Trudno o wyrokowanie, który ze wspomnianych sposobów należy uznać jako pierwszy; podobnie trudno rozsądzić, który z rodzajów otworów (kana-

Rys. 22. Częściowy przekrój przez tarcze hamulcowe z różnym rozmieszczeniem kanałów wentylacyjnych



łów) wentylowanych pojawił się wcześniej: otwory wykonane w tarczy prostopadle do jej powierzchni (rys. 1.20) równoległe do osi tarczy, czy otwory promieniowe (rys. 1.19), zamieniające tarcze w swoisty „wentylator” wymuszający przepływ przez kanały.

Można jedynie domyślać się, że wentylowane otworami osiowymi tarcze zastosowano najpierw w motocyklach wyczynowych, powodując dodatkowo obniżenie masy tarczy i ułatwiając samoczynne oczyszczenie okładziny z cząstek mechanicznych (kurz, itp.). Dopiero później pojawiły się w samochodach.

W konstrukcjach silnie obciążonych cieplnie stosowane są obydwie rodzaje kanałów wentylacyjnych. Podwojona jest także liczba tarcz hamulcowych i zacisków (rys. 1.21). Rozwiązanie takie pozwala uzyskać nie tylko mniejsze obciążenia cieplne, ale również mechaniczne, w tym przede wszystkim naciski jednostkowe, przyczyniając się do zmniejszenia zużycia okładzin i zwiększenia trwałości tarczy hamulcowej.

Na rys. 1.22 przedstawiono częściowy przekrój (płaszczyznę przechodzącą przez jej oś obrotu) przez tarcze hamulcowe z różnym rozmieszczeniem kanałów wentylacyjnych, co pozwala prześledzić przebieg „promieniowych” kanałów wentylacyjnych oraz daje możliwość obejrzenia kształtu kanałów, zwłaszcza w obszarze bliskim piąście koła.

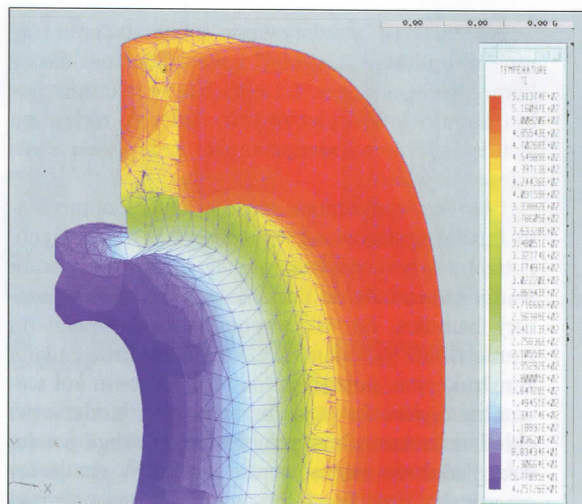
1.7. Obciążenia cieplne - obciążenia mechaniczne

Panujące w płaszczyźnie kontaktu tarcza-okładzina wysokie temperatury i występujące gwałtowne ich obniżenie poza tym obszarem sprawiają, że tarcza hamulcowa poddawana jest działaniu znacznych obciążeń mechanicznych powodujących istotne odkształcenia tarczy, które wpływają dodatkowo na lokalne zwiększenie temperatury elementów ciernych. Te z kolei prowadzą do nasilenia koncentracji naprężeń mechanicznych.

Oczywista staje się więc konieczność prowadzenia badań, zarówno symulacyjnych, jak i eksperymentalnych, zmierzających do uzyskania wyników umożliwiających wszechstronną analizę zachodzących zjawisk i stworzenia metod budowania optymalnych konstrukcji hamulców.

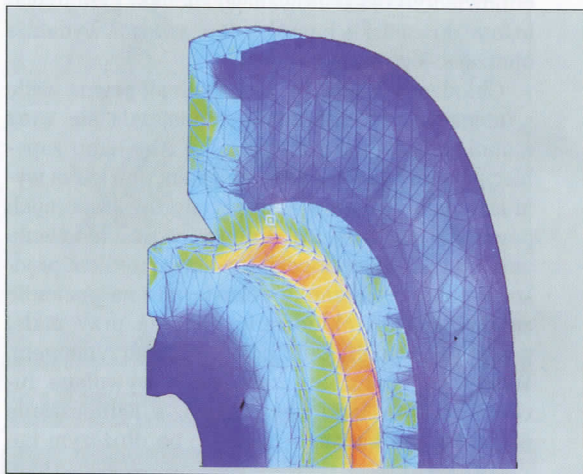
Producenci w większości przypadków wykorzystują do badania hamulców dwa rodzaje metod: teoretyczne i eksperymentalne, przy czym te ostatnie dają się podzielić na badania stanowiskowe i drogowe, przeprowadzane na pojeździe rzeczywistym w warunkach drogowych.

Wśród metod teoretycznych powszechnie stosowana jest metoda elementów skończonych, za-

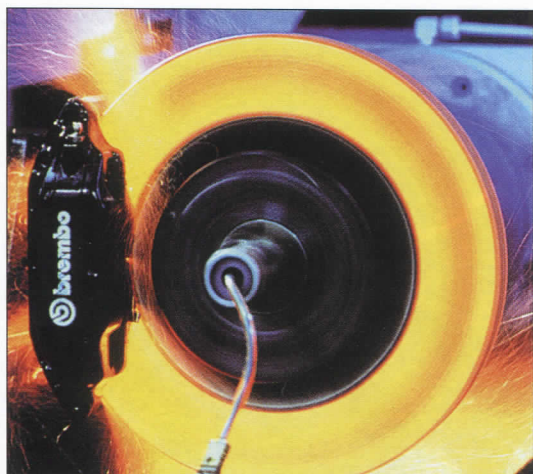


Rys. 1.23. Przykład modelowania tarczy hamulcowej i występujących w niej temperatur

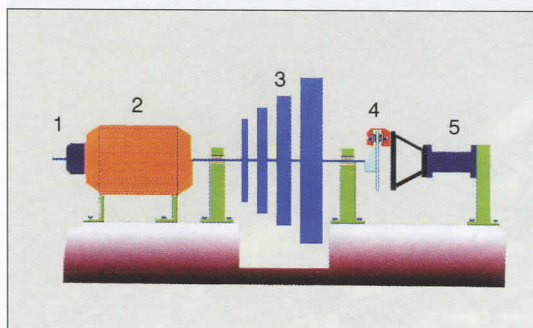
Rys. 1.24. Wynik modelowania obciążeń mechanicznych występujących podczas naciskania okładzin na powierzchnię tarczy



kładająca podział konstrukcji na pewną skończoną liczbę obszarów - powierzchni wzajemnie powiązanych ze sobą i na siebie oddziałujących znanymi i opisanymi matematycznie zależnościami. Uzupełnienie takiego opisu o opis geometrii badanego układu sprawia, że efektem obliczeń stają się modele umożliwiające badanie w fazie przedprototypowej, co ogranicza czas, koszty i nakład pracy. Przykład modelowania tarczy hamulcowej i występujących w niej temperatur przedstawia rys. 1.23. Zgodnie z umieszczoną z prawej strony skalą, zmiana kolorów od fioletu do czerwieni oznacza wzrost temperatur odpowiednio (w prezentowanym przypadku) od 318 do 804 K. Rys. 1.24 przedstawia wynik modelowania obciążeń



Rys. 1.25. Tarcza hamulcowa z zaciskiem standardowym badana na stanowisku do oceny wpływu temperatury na parametry pracy hamulca



Rys. 1.26. Schematyczny wygląd stanowiska, w którym podstawową funkcję spełnia masa wirująca o dobranym momencie bezwładności: 1 - prędkościomierz tachometryczny, 2 - silnik prądu stałego, 3 - masy bezwładne, 4 - tarcza hamulcowa z zaciskiem, 5 - czujnik momentu obrotowego

mechanicznych występujących podczas naciskania okładzin na powierzchnię tarczy - im większa koncentracja naprężeń, tym „cieplejszy” kolor na rysunku.

Na rys. 1.25 przedstawiono wygląd tarczy hamulcowej z zaciskiem standardowym, badanej na stanowisku badawczym służącym do oceny wpływu temperatury na parametry pracy hamulca. Rys. 1.26 ilustruje schematyczny wygląd stanowiska, w którym podstawową funkcję spełnia masa wirująca o dobranym momencie bezwładności, symulującym energię kinetyczną pojazdu.

Dla lepszego wyobrażenia skali występujących zjawisk, najlepiej posłużyć się prostymi obliczeniami wykazującymi zależność pomiędzy energią hamującego pojazdu i energią symulowaną przez wirującą masę. Ponieważ energie pojazdu i wirującej masy muszą być sobie równe, należy zapisać:

$$E_{k \text{ pojazdu}} = E_{\text{masy bezwładnej}}$$

$$\frac{m v^2}{2} = \frac{I \omega^2}{2}$$

gdzie:

I - moment bezwładności masy wirującej

ω - prędkość kątowna wirowania

$$I = \frac{MR^2}{2}$$

M - masa bezwładna („koło zamachowe”)

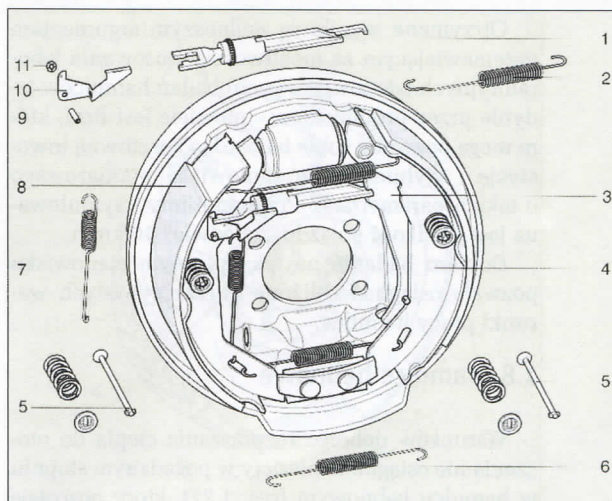
R - promień „koła zamachowego”

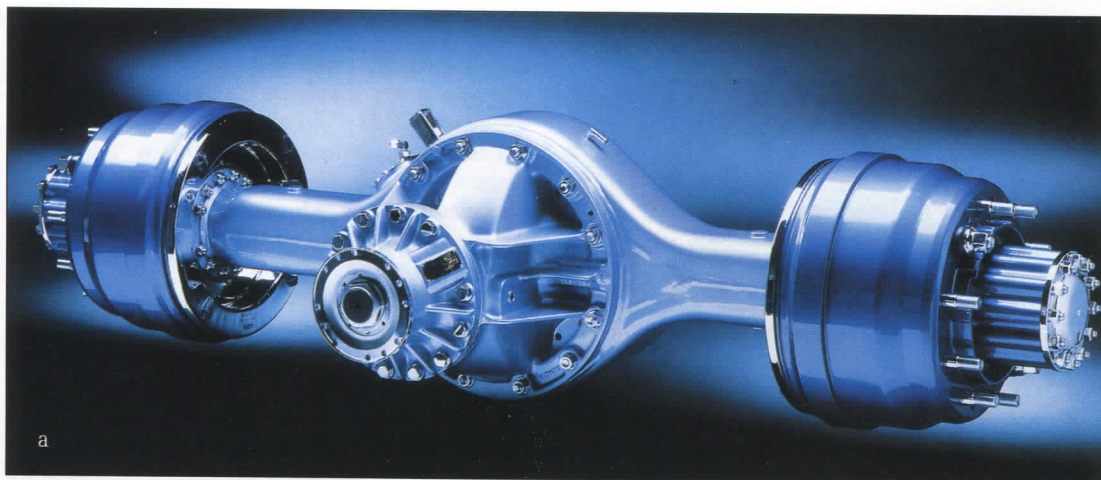
Aby uświadomić sobie wartości, z jakimi mamy do czynienia, posłużmy się danymi liczbowymi z przykładu przytoczonego wyżej: pojazd ma masę $m = 32000 \text{ kg}$, zatrzymuje się z prędkości początkowej $v = 40 \text{ km/h}$ ($11,11 \text{ m/s}$). Zakładając, że cała energia kinetyczna rozpraszana jest w postaci ciepła, możemy obliczyć $E_k = 1974913 \text{ J}$.

Przyjmując, że hamulce każdego koła jednej z pięciu osi hamują tak samo, obliczymy, że hamulec jednego koła rozprasza energię 197491 J . Taką samą energię musi rozprószyć układ wirującej masy bezwładnej. Dokonując uproszczenia $v = \omega r$, możemy obliczyć początkową prędkość kątową kół pojazdu o promieniu $r = 0,571 \text{ m}$. Z taką samą prędkością będzie obracała się masa bezwładna napędzana silnikiem elektrycznym stanowiska pomiarowego. Po obliczeniu $\omega = 19,45 \text{ 1/s}$ (185 obr/min).

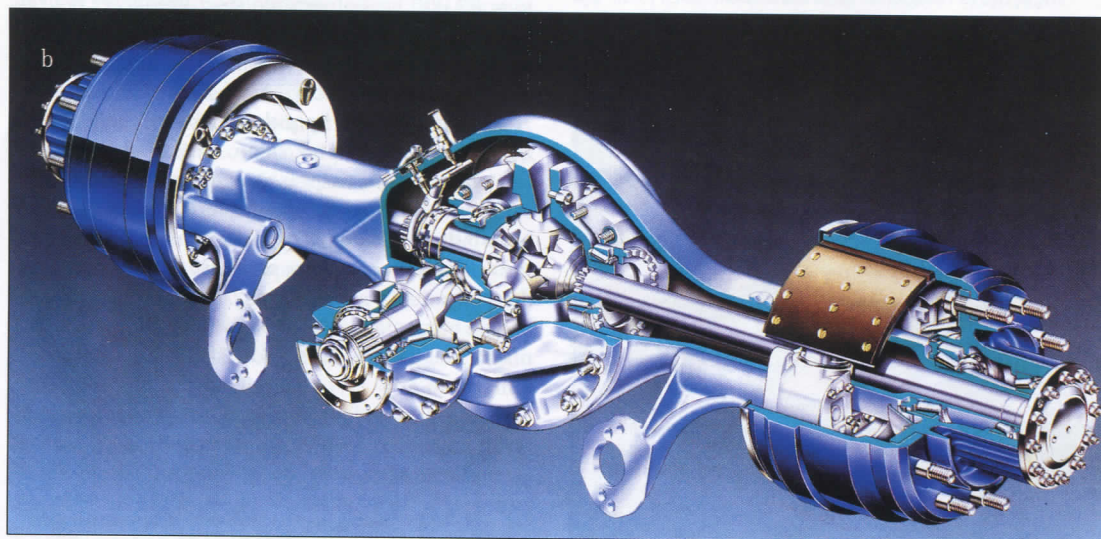
Przeprowadzając obliczenia (przyjmując średnicę wirującego elementu bezwładnościowego $R = 1 \text{ m}$) otrzymamy $M = 2088 \text{ kg}$.

Rys. 1.27. Przykład budowy hamulca bębnowego stosowanego w lekkim samochodzie osobowym (opis pominięto)





Rys. 1.28. Tylina oś napędowa samochodu użytkowego dużej ładowności z widocznymi bębnami i okładzinami hamulcowymi (a - widok, b - przekrój)



Otrzymane wyniki są najlepszym argumentem przemawiającym za możliwością stosowania laboratoryjnych (stanowiskowych) badań hamulców jedynie przez producentów - niewiele jest firm, które mogą pozwolić sobie na bardzo kosztowną inwestycję i wybudowanie stanowiska pomiarowego o takich parametrach. Przypomnijmy - symulowana jest prędkość pojazdu „zaledwie” 40 km/h.

Dopiero badanie na tak opisanym stanowisku pozwala osiągnąć zbliżone do rzeczywistych warunki pracy hamulca.

1.8. Hamulce bębnowe

Warunków dobrego rozpraszania ciepła do otoczenia nie osiągnięto niestety w pożądanym stopniu w hamulcu bębnowym (rys. 1.27), który pozostaje

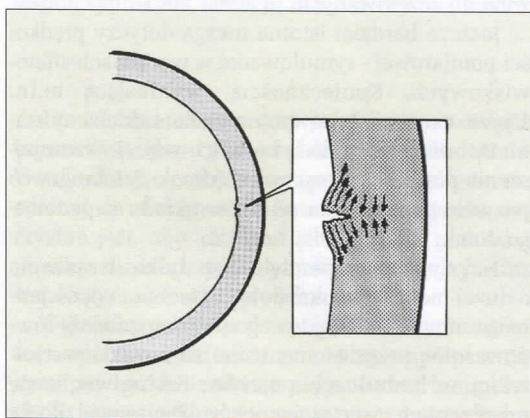
konstrukcją „zamkniętą” (rys. 1.28), gdzie odprowadzenie ciepła pozostaje na relatywnie niższym poziomie w odniesieniu do hamulca tarczowego.

Zamknięta, a niekiedy wręcz szczelna konstrukcja hamulca bębnowego jest jednak jego wielką zaletą - w pojazdach poruszających się po drogach gruntowych o dużym zapyleniu (pokrytych warstwą błota), zmuszonych do pokonywania brodów, hamulec bębnowy wykazuje znacznie większą trwałość i niezawodność w odniesieniu do hamulca tarczowego.

Wynika stąd dość „nieformalny” podział: hamulce bębnowe stosowane są przeważnie w samochodach użytkowych przeznaczonych do poruszania się w tzw. trudnym terenie, w samochodach osobowych (zwłaszcza tych rozwijających wysokie prędkości) stosuje się hamulce tarczowe. Przedstawiony podział nie wyklucza zastosowania wymie-

nionych rodzajów hamulców zgodnie w zamiarem konstruktora: coraz częściej hamulce tarczowe są stosowane w autobusach komunikacji międzymiastowej, pojawiają się również w lepszych wersjach samochodów terenowych.

Typowa konstrukcja w dużej liczbie samochodów osobowych - z przodu hamulce tarczowe, z tyłu bębnowe - wynika z kilku powodów. Po pierwsze, hamulce kół osi przedniej przenoszą większe siły hamowania, po drugie - ze względu na szczelność zachowują skuteczność działania nawet pod wpływem wody i pyłu wzbijanego przez koła osi przedniej, po trzecie - umożliwiają łatwiejsze (tańsze) skonstruowanie mechanizmu sterującego hamulcem „pomocniczym” (w większości pojazdów hamulec ten działa na koła osi tylnej).



Rys. 1.29. Kierunek działania naprężeń mechanicznych w części wewnętrznej i zewnętrznej bębna

Wspomniana wyżej większa masa bębnow hamulcowych stanowi pewien „akumulator” energii cieplnej. Zmieniające się warunki termiczne na powierzchniach współpracujących elementów są przyczyną znaczącej koncentracji naprężeń mechanicznych powodujących pękanie materiału bębna. Zjawisko to ilustruje poglądowy rys. 1.29 przedstawiający kierunek działania naprężeń mechanicznych w części wewnętrznej i zewnętrznej bębna (o przeciwnych zwrotach), powodujących miejscowe pęcznienie materiału oraz efekt działania tych naprężeń w postaci pęknięcia tworzącej powierzchnię walcowej bębna.

Hamulce bębnowe charakteryzują się znacznie większą powierzchnią okładzin ciernych (rys. 1.28b). Okładzina jest przymocowana do szczęki hamulcowej za pomocą trzech rzędów nitów, co ułatwia wymianę samej okładziny, wymaga jednak stosowania specjalnych maszyn umożliwiających „obtoczenie” kompletnego zestawu: piasta-szczęki-okładzina, tak, aby otrzymać możliwie najbliższy

idealnemu kształtowi walcowemu. W samochodach osobowych mocowanie okładziny jest wykonywane najczęściej za pomocą klejenia.

Wymiana samych okładzin hamulcowych w samochodach użytkowych wynika przede wszystkim z dużych sił „odrywających” okładzinę od szczęki, kosztów elementów i trudności w zapewnieniu prawidłowego procesu klejenia na dużej powierzchni.

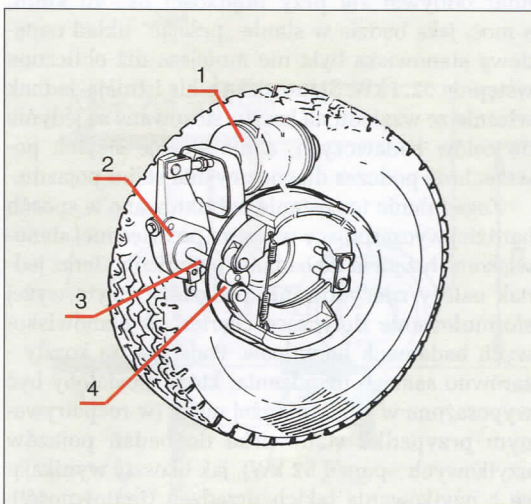
1.9. Hamulce bębnowe - mechanizmy uruchamiania

Stosunkowo prosty mechanizm uruchamiania hamulca bębnowego składa się w samochodach osobowych (rys. 1.27) z tzw. rozpieracza hydraulicznego, którego trzpienie oddziałują na utwardzone powierzchnie szczęki hamulcowej, osadzonej z drugiej strony, w sposób umożliwiający jej obracanie się lub obracanie i przesuwanie. Sprawia to, że poddana działaniu rozpieracza szczeka jest dociskana do wewnętrznej powierzchni bębna i rozwija potrzebną siłę tarcia.

W przypadku samochodów użytkowych (rys. 1.30) mechanizm ten jest jeszcze prostszy i łączy w sobie cechy mechanizmu pneumatycznego i mechanicznego. Widoczny na rysunku siłownik pneumatyczny oddziałuje na dźwignię popychacza rolkowego połączonego z krzywką, która obracając się wokół własnej osi powoduje „rozsunięcie” szczęk hamulcowych.

Należy zauważyć, że układy uruchamiania hamulców w samochodach użytkowych są w zdecydowanej liczbie rozwiązań układami, w których czynnikiem roboczym jest powietrze. Pozwala to spełnić podstawowe wymaganie stawiane układom tego ty-

Rys. 1.30. Mechanizm uruchamiania hamulca bębnowego w samochodach użytkowych: 1 - siłownik pneumatyczny, 2 - dźwignia popychacza, 3 - krzywka, 4 - popychacz rolkowy



pu - zapewnienie okresowego „rozszerzenia” układu. Jest to niezbędne dla takich pojazdów, jak ciągniki siodłowe lub/i pojazdy ciągnące przyczepy. Zastosowanie układu hydraulicznego wiązałoby się z koniecznością każdorazowego odpowietrzenia układu, co wobec stopnia komplikacji skutecznie ogranicza zastosowanie takiego rozwiązania.

Omówienie specyfiki budowy i działania układów uruchamiania hamulców w samochodach użytkowych jest zagadnieniem na tyle szerokim, że wykracza poza przedmiot tego opracowania. Zainteresowanych można odesłać do literatury fachowej lub innych opracowań autora.

1.10. Badanie hamulców - ciepło - krótkie podsumowanie

Pomijanie problematyki wymiany ciepła znacznie upraszcza mechanizmy powstających zjawisk, co w konsekwencji utrudnia ich interpretację i może prowadzić do błędnego wnioskowania.

Celowe zaniedbywanie zagadnień energetycznych stanowi jednak pewną konieczność stosowania wielu metod badawczych. Przyczyna leży w nakładach finansowych niezbędnych do stworzenia takich metod pomiaru, które pozwoliłyby odtworzyć w warunkach badawczych zjawiska zachodzące podczas rzeczywistego ruchu pojazdu.

Przypomnijmy - hamowanie samochodu ciężarowego opisanego wyżej wymaga rozproszenia mocy 262 kW. Zakładając, że rozdział sił hamowania (opisany dalej) jest jednakowy i każda z osi (np. pięciu) hamuje tak samo - każda rozprasza moc 52,4 kW. Pragnąc przeprowadzić pomiar siły hamowania symulujący warunki drogowe na stanowisku rolkowym (podobne spotykane są w stacjach diagnostycznych lub SKP), należy sprawić, aby pomiar odbywał się przy prędkości ok. 40 km/h, a moc, jaką będzie w stanie „przejąć” układ napędowy stanowiska była nie mniejsza niż obliczone wstępnie 52,4 kW. Stanowiska takie istnieją, jednak właśnie ze względu na koszty, stosowane są jedynie do celów badawczych, a nie stosuje się ich powszechnie podczas diagnozowania stanu pojazdu.

Zagadnienie to zostanie potraktowane w sposób bardziej wyczerpujący w części poświęconej stanowiskom służącym do badania hamulców. Teraz jednak należy zdecydowanie podkreślić użyte wyżej sformułowanie dotyczące „barier” w stanowiskowych badaniach hamulców. Podstawą są koszty - zarówno samego urządzenia, które musiałoby być wyposażone w silnik o dużej mocy (w rozpatrywanym przypadku stanowiska do badań pojazdów użytkowych - ponad 52 kW), jak i koszty wynikające z użytkowania takich urządzeń (rentowność!).

Istotne są również zagadnienia związane z podłączeniem do sieci energetycznej i tzw. przydziałem mocy - zamontowanie takiego urządzenia powodowałoby „zużycie” znaczącej mocy przydzielanej dla całego obiektu.

Takie wyjaśnienie przynajmniej w części powinno uzasadnić nieliczne przykłady wykorzystania podobnych urządzeń - posługują się nimi ośrodki badawcze i producenci. W opisie tym kryje się jednak pewna istotna uwaga dotycząca prędkości pomiaru i mocy układu napędowego typowego stanowiska diagnostycznego: jedynie stanowiska o dużej (możliwie największej - adekwatnej do mocy sił hamowania powstającej w warunkach rzeczywistych) mocy silników napędzających rolki stanowiska, mogą zapewnić warunki pomiaru najbardziej zbliżone do oczekiwanych.

Jeszcze bardziej istotna uwaga dotyczy prędkości pomiarowej - symulowanej w warunkach stanowiskowych. Koniecznością, wynikającą m.in. z przeznaczenia typowych urządzeń do oceny stanu technicznego układu hamulcowego, jest zmniejszenie prędkości pomiarowej (do ok. 3-5 km/h), co pozwala obniżyć moc silników układu napędowego do ok. 15-20 kW.

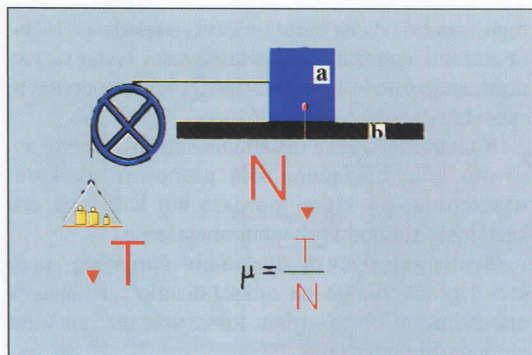
Należy jednak pamiętać, że tylko urządzenia o dużej mocy są zdolne do wytworzenia odpowiedniego momentu napędowego (siły napędowej) równoważonej przez moment/siłę hamowania wytwarzaną w hamulcach pojazdu. Posługiwanie się urządzeniem mniejszej mocy będzie prowadziło do zrównoważenia się wymienionych sił w znacznie mniejszym zakresie. Nie będzie tym samym możliwe wykorzystanie pełnej (wymaganej przez odpowiednie przepisy) siły hamowania, zapewniającej dostatecznie dużą skuteczność hamowania.

1.11. Korzystne tarcie

Zamiana energii kinetycznej na energię cieplną następuje w wyniku siły tarcia powstającej pomiędzy elementami konstrukcyjnymi hamulca - stąd bardzo często stosuje się nazwę: hamulec cierny - tarciony.

Siła tarcia powstająca w przestrzeni kontaktu dwóch współpracujących części odgrywa w przypadku hamulców samochodów podstawową i pozytywną rolę. W przeciwieństwie do wielu mechanizmów, w których tarcie jest zjawiskiem niepożądanym, w hamulcach dąży się do uzyskania jak największej siły tarcia o wartości możliwie stałej - niezależnej od temperatury. Mechanizm powstawania siły tarcia pomiędzy dwiema stykającymi się powierzchniami najlepiej ilustruje rys. 1.31.

Wartość siły tarcia T , powstającej jako styczna do współpracujących powierzchni, zależy od ro-



Rys. 1.31. Mechanizm powstawania w hamulcach siły tarcia pomiędzy dwiema stykającymi się powierzchniami

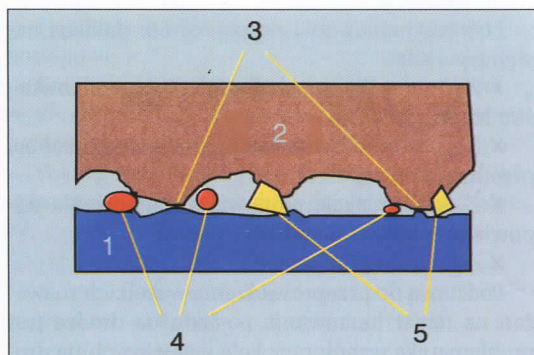
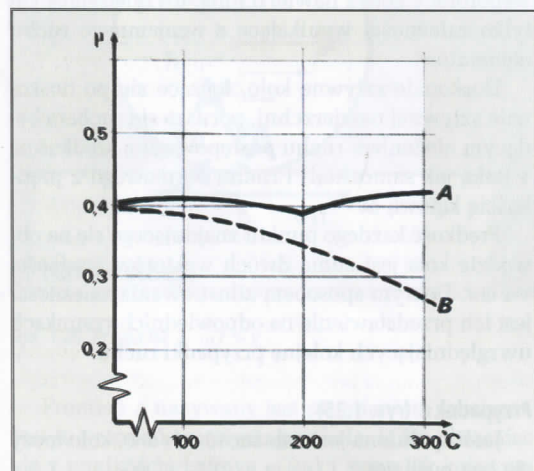
dzaju tych powierzchni (charakteryzowanego współczynnikiem tarcia μ) oraz od siły nacisku N :

$$T = \mu \cdot N$$

Im większa siła nacisku lub/i większy współczynnik tarcia, tym większa jest siła tarcia. Uwzględniając potrzebę osiągania dużej siły tarcia, zdolnej do efektywnego hamowania pojazdu, korzystne jest, aby zarówno siła nacisku pomiędzy powierzchniami, jak i rozwijany między nimi współczynnik tarcia były jak największe.

Dążenie i potrzeba do osiągania dużych wartości współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami staje się powodem komplikacji w procesie konstruowania rzeczywistych hamulców. Wartość współczynnika tarcia jest mocno zależna od rodzaju użytych materiałów, duży wpływ ma również temperatura - w przypadku większości współcześnie stosowanych materiałów zachodzi zależność: im wyższa, tym mniejszy jest

Rys. 1.32. Wpływ temperatury na współczynnik tarcia



Rys. 1.33. Zjawisko powstawania siły tarcia: 1 - tarcza hamulcowa, 2 - okładzina hamulcowa, 3 - nierówności kształtu okładziny, 4 - „ciało trzecie” (kurz, pył), 5 - wtręty metaliczne

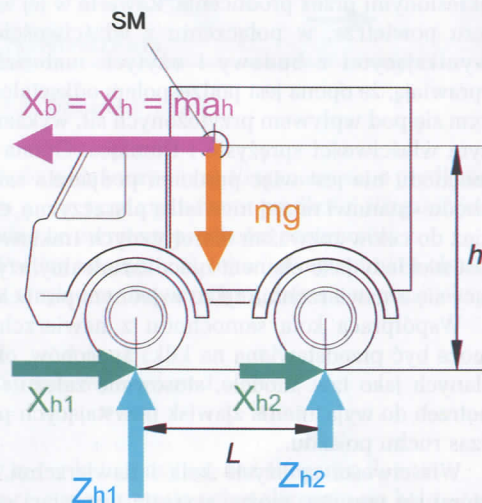
współczynnik tarcia (rys. 1.32). Oczekiwania i potrzeby są jednak odmienne - pożądanym byłoby, aby współczynnik tarcia nie zmniejszał swojej wartości przy wzroście temperatury, a jego wartości przebiegały np. tak, jak przedstawia krzywa A. Niestety większość stosowanych materiałów charakteryzuje się przebiegiem zależności $\mu(T)$ takim jak przedstawiona krzywa B.

Analizując mechanizm powstawania sił tarcia pomiędzy współpracującymi częściami można posłużyć się rysunkiem ilustrującym fizykę zjawiska powstawania siły tarcia (rys. 1.33).

1.12. Hamowanie na drodze

Rozpatrując zachowanie się pojazdu na drodze, można przyjąć uproszczony „płaski” model samochodu (rys. 1.34).

Rys. 1.34. Działanie sił podczas hamowania w uproszczonym „płaskim” modelu samochodu



Podczas hamowania na pojazd ten działają następujące siły:

✗ X_b - siła bezwładności równa całkowitej sile hamowania X_h

✗ $X_{h1,2}$ - siła hamowania odpowiednio kół osi przedniej i tylnej

✗ $Z_{h1,2}$ - reakcje pionowe sił hamowania odpowiednio kół osi przedniej i tylnej

✗ mg - ciężar pojazdu

Podstawą do przeprowadzenia wszelkich rozważań na temat hamowania pojazdu na drodze jest problematyka współpracy koła z nawierzchnią drogi. Przyjęcie tzw. płaskiego modelu pojazdu i założenie o jego ruchu prostoliniowym, na gładkiej, równej nawierzchni, znacząco ułatwia prowadzenie rozważań na ten temat. W rzeczywistości siły działające na koło oddziałują w układzie przestrzennym - pojawia się siła poprzeczna, wynikająca z kąta poprzecznego pochylenia drogi. Pierwszorzędne znaczenie mają również siły wynikające ze współpracy koła z nawierzchnią nierówną. Opis ten komplikuje dodatkowo odstępstwo od ruchu prostoliniowego i rozpatrywanie ruchu pojazdu po łuku o znanym promieniu R .

Konieczne jest więc określenie podstawowych parametrów związanych z określeniem warunków współpracy koła z nawierzchnią, wyrażonych przez tzw. poślizg koła $S_{h,n}$, gdzie symbol h dotyczy hamowania pojazdu.

1.13. Opona samochodu

Opona, wykonana z odpowiedniego rodzaju gumy oraz tworzyw zapewniających jej utrzymanie właściwego kształtu i zdolności do przenoszenia wspomnianych wcześniej sił, jest napęczniona powietrzem (napompowana) zgodnie z warunkami określonymi przez producenta. Zawarte w jej wnętrzu powietrze, w połączeniu z właściwościami wynikającymi z budowy i użytych materiałów sprawiają, że opona jest podzespołem odkształcającym się pod wpływem przyłożonych sił, wykazującym właściwości sprężyste i tłumiące. Opona samochodu nie jest więc punktem podparcia samochodu - stanowi raczej niewielką płaszczyznę, chociaż do celów rozważań teoretycznych traktowana jest niekiedy jako element nieodkształcalny, stykający się z nawierzchnią tylko w jednym punkcie.

Współpraca koła samochodu z nawierzchnią może być przedstawiana na kilka sposobów, określanych jako tzw. modele, stosowane zależnie od potrzeb do wyjaśnienia zjawisk powstających podczas ruchu pojazdu.

Właściwości sprężyste koła i nawierzchni, po której się porusza, można wyrazić w postaci cze-

rech zasadniczych charakterystyk, zakładając, że parametrami wyrażającymi właściwości będą: sztywność, sprężystość i plastyczność. I tak, w przyjętym sposobie możemy wyróżnić:

✗ charakterystykę doskonale sztywną, kiedy zarówno koło obciążone siłą pionową, jak i nawierzchnia, po której porusza się koło, nie odkształcają się pod wpływem obciążenia

✗ charakterystykę doskonale sprężystą, przy której praca zużyta na odkształcenie i wywołana przyłożonym obciążeniem jest zwracana bez strat po ustaniu obciążenia

✗ charakterystykę częściowo sprężystą, przy której praca zużyta na odkształcenie i wywołana przyłożonym obciążeniem jest zwracana ze stratami

✗ charakterystykę plastyczną, przy której praca wywołana przyłożonym obciążeniem jest zużywana na trwałe odkształcenie nawierzchni, np. podczas jazdy po miękkim gruncie (błoto) lub po śniegu

Dla celów praktycznych przyjmuje się, że poruszanie się typowego koła samochodowego po twardej nawierzchni drogi odpowiada sytuacji, w której nawierzchnia jest doskonale sztywna, a koło częściowo sprężystość odkształcalne.

Przyjęcie częściowej, a nie doskonałej sprężystości koła, wynika z potrzeby uwzględnienia strat, jakie powstają podczas odkształceń koła w obszarze kontaktu z nawierzchnią (koło ugina się, a następnie powraca do stanu początkowego). Powstające straty wyrażają właściwości tłumiące koła i są zależne zarówno od parametrów konstrukcyjnych, jak i eksploatacyjnych opony.

1.14. Sztywne koło - sztywna nawierzchnia

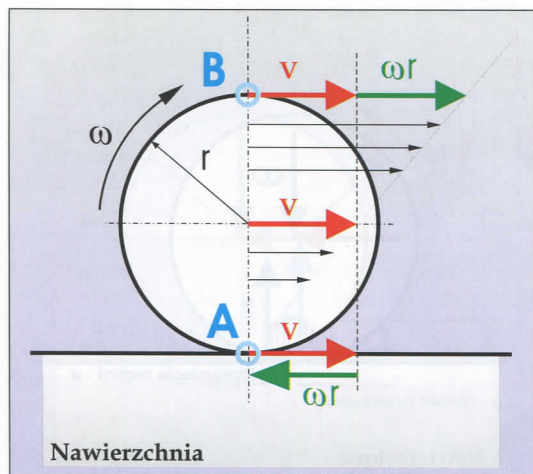
Dla prawidłowego zrozumienia niektórych zjawisk towarzyszących ruchowi samochodu, konieczne jest posłużenie się najprostszym modelem współpracy koła z nawierzchnią, uwzględniającym tylko zależności wynikające z wzajemnego ruchu elementów.

Doskonale sztywne koło, toczone się po doskonale sztywnej nawierzchni, porusza się ruchem będącym złożeniem ruchu postępowego z prędkością v (taką jak samochód) i ruchu obrotowego z prędkością kątową ω .

Prędkość każdego punktu znajdującego się na obwodzie koła jest sumą dwóch wektorów prędkości v i ωr . Dobrym sposobem zilustrowania zależności jest ich przedstawienie na odpowiednich rysunkach uwzględniających kolejne przypadki ruchu.

Przypadek 1 (rys. 1.35)

Jeśli spełniona jest zależność $v = \omega r$, koło toczy się bez poślizgu.

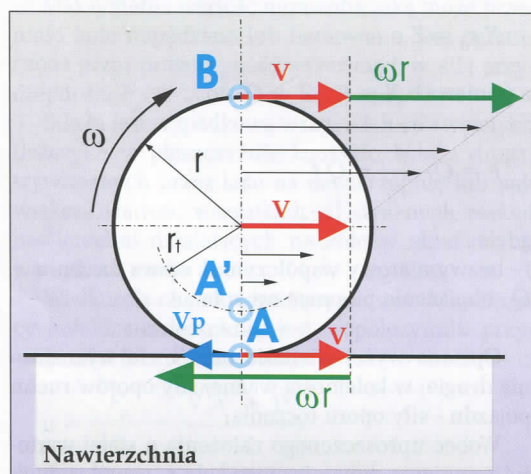


Rys. 1.35. Przypadek 1: $v = \omega r$

W punkcie B wektor prędkości obwodowej ωr ma zwrot zgodny z prędkością v , a więc prędkość całkowita tego punktu jest sumą dwóch prędkości $v_B = v + \omega r$. W punkcie A prędkości v i ωr mają zwroty przeciwne, a więc $v_A = 0$. Punkt A jest chwilowym środkiem obrotu koła.

Przypadek 2 (rys. 1.36)

Jeśli spełniona jest zależność $\omega r > v$, koło jest napędzane, a chwilowym środkiem obrotu staje się punkt A' położony w odległości wyznaczonej przez teoretyczny promień r_t ($\omega r_t = v$).



Rys. 1.36. Przypadek 2: $\omega r > v$

Promień r_t nazywany jest promieniem tocącym. Jest to promień teoretycznego koła, które obracając się z prędkością kątową ω (taką samą jak koło roz-

patrywane) toczyłoby się bez poślizgu z prędkością postępową v .

Koło takie toczy się z poślizgiem o prędkości $v_p = v - \omega r$, przy czym zwrot prędkości poślizgu jest przeciwny do zwrotu prędkości postępowej v .

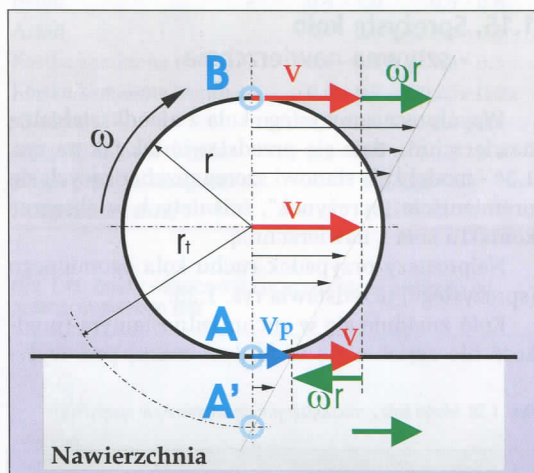
Poślizg względny S_n (chwilowego punktu obrotu koła względem nawierzchni) daje się zapisać jako:

$$S_n = \frac{v - \omega r}{-\omega r} = 1 - \frac{r_t}{r}$$

gdy $r_t = 0$ występuje pełny poślizg $S_n = 1$, gdy $r_t = r$ - występuje toczenie się koła bez poślizgu, tzn. $S_n = 0$.

Przypadek 3 (rys. 1.37)

Jeśli spełniona jest zależność $\omega r < v$, koło jest hamowane, a chwilowym środkiem obrotu staje się punkt A' położony w odległości wyznaczonej podobnie jak poprzednio przez teoretyczny promień r_t ($\omega r_t = v$).



Rys. 1.37. Przypadek 3: $\omega r < v$

Koło takie toczy się ze ślizganiem o prędkości $v_p = v - \omega r$, przy czym zwrot prędkości ślizgania jest zgodny ze zwrotem prędkości postępowej v .

Poślizg względny S_h (chwilowego punktu obrotu koła względem nawierzchni) daje się zapisać jako:

$$S_h = \frac{v - \omega r}{v} = 1 - \frac{r_t}{r}$$

gdy $r_t = r$ koło toczy się bez ślizgania $S_h = 0$, gdy $r_t \rightarrow \infty$ występuje pełne ślizganie się koła.

Sens fizyczny poślizgu i ślizgania się jest taki sam, różnica występuje jedynie w zwrocie prędkości poślizgu. Stąd obydwa zjawiska określane są często, bez rozróżnienia, wspólną nazwą poślizgu. Poślizg koła można wyznaczyć doświadczalnie. Najprostszym sposobem jest pomiar drogi przebytej przez koło i znajomość liczby obrotów, jaką koło wykonało przebywając zmierzoną drogę.

Przedstawione rozważania prowadzą do istotnego wniosku - poślizg koła samochodu jest związany z normalnymi warunkami ruchu i zachodzi przez większą część przebiegu pojazdu. Inaczej - ruch koła samochodu bez poślizgu należy do przypadków szczególnych i występuje dość rzadko w specyficznych warunkach. Stwierdzenie to jest o tyle ważne, że odnosi się do zasad działania zaawansowanych układów bezpieczeństwa ruchu pojazdu, jak np. ABS, czyli układ zabezpieczający koło przez zablokowaniem (układy przeciwblokujące - tak nazywane są zarówno w literaturze anglo-, jak i niemieckojęzycznej: Anti (B)lock System oraz Antiblockierungssystem). Omówienie podobnych układów stanowi jednak przedmiot odrębnego opracowania.

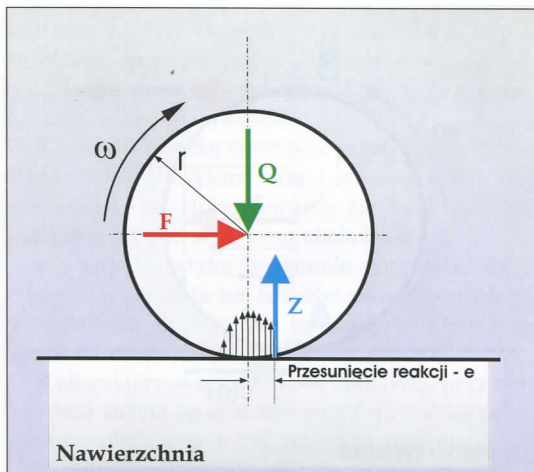
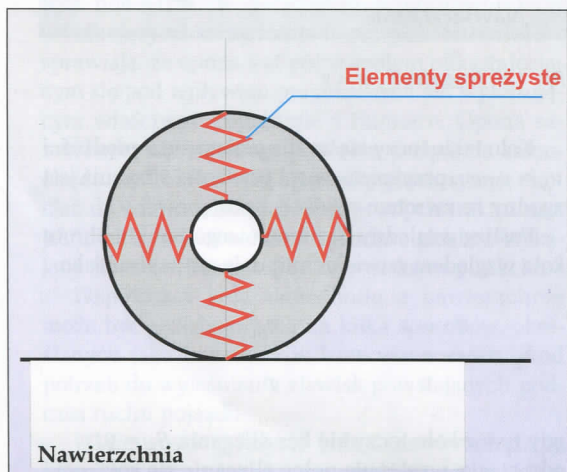
1.15. Sprężyste koło - sztywna nawierzchnia

Współpraca sprężystego koła z nieodkształcalną nawierzchnią daje się przedstawić tak jak na rys. 1.38 - model koła stanowi szereg rozchodzących się promieniście „sprężynek”, ściśniętych w obszarze kontaktu koła z nawierzchnią.

Najprostszy przypadek ruchu koła ogumionego (sprężystego) przedstawia rys. 1.35.

Koło znajduje się w ruchu jednostajnym (prędkość nie zmienia się w funkcji czasu) pod wpły-

Rys. 1.38. Model koła z rozchodzącymi się promieniście sprężynkami



Rys. 1.39. Koło w ruchu jednostajnym

wem siły F przyłożonej do osi koła (rys. 1.39). Koło toczy się, a więc w płaszczyźnie kontaktu z nawierzchnią występuje tarcie (siła tarcia). Gdyby nie było tarcia, koło ślizgałoby się.

Obracanie się koła pozwala domyślać się, że w płaszczyźnie kontaktu występuje reakcja wzdłużna $X = F$, wywołująca moment $T_1 = X r_d$ (r_d - promień dynamiczny koła). Moment ten jest równoważony przez moment T_2 , pochodzący od reakcji pionowej drogi Z i przesunięcia osi jej działania względem osi koła e .

Zrównoważenie działających momentów daje się zapisać w postaci:

$$X r_d = Z e$$

a ponieważ: $X = F$, $Z = Q$ to

$$F = Q \frac{e}{r_d} = Q f$$

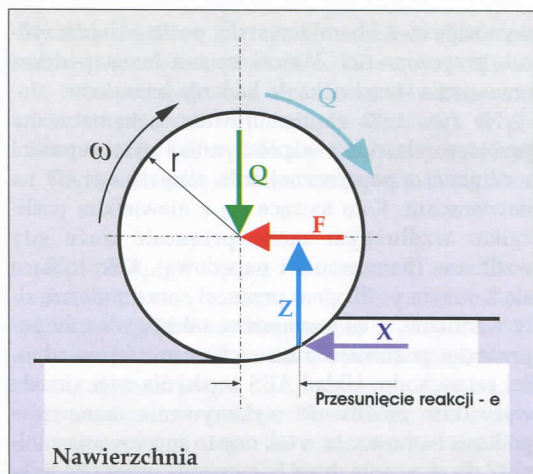
gdzie:

f - bezwymiarowy współczynnik oporu toczenia

Q - obciążenie pionowe osi koła

Opisana wyżej wielkość umożliwia wyznaczenie drugiej w kolejności ważnej siły oporów ruchu pojazdu - siły oporu toczenia.

Wobec uproszczonego założenia o stałej wartości promienia dynamicznego koła r_d współczynnik oporu toczenia f najprościej jest zinterpretować jako wielkość związaną z przesunięciem reakcji pionowej drogi „do przodu” - w kierunku ruchu samochodu. Współczynnik oporu toczenia wynika m.in. z nierówności nawierzchni, po której toczy się koło. Większe nierówności, pojawiające się w pierw-



Rys. 1.40. Ruch koła ogumionego - napędzanego na podłożu plastycznym

szej „fazie” kontaktu koła z nierówną nawierzchnią, powodują, że opona odkształca się w większym stopniu, a reakcja nawierzchni „oddala się” od osi obrotu koła. Im większe nierówności, tym większe przesunięcie, tym większy współczynnik oporu toczenia.

Mechanizm powstawania siły oporu toczenia można porównać do umownej sytuacji „odwrotnej”, w której koło toczy się po podłożu odkształcającym się (plastycznym - np. koleina w śniegu, rys. 1.40).

1.16. Przyczepność

Maksymalna wartość momentu, jaką może przenieść koło napędzane lub hamowane, jest ograniczona przez przyczepność wyrażaną tzw. siłą przyczepności F_{μ} .

Siła ta jest wypadkową wszystkich sił stycznych (leżących w płaszczyźnie kontaktu koła z drogą) wywieranych przez koło na nawierzchnię lub największą wartość wszystkich sił stycznych reakcji nawierzchni działających na koło w określonych warunkach ruchu koła.

Wielkością charakteryzującą warunki współpracy koła z nawierzchnią jest współczynnik przyczepności (oznaczany literą μ):

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{Q} = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{Z}$$

gdzie:

Q - obciążenie pionowe osi koła

X - reakcja styczna nawierzchni drogi zgodna z kierunkiem ruchu samochodu (wzdłużna)

Y - reakcja styczna do nawierzchni drogi prostopadła do kierunku ruchu (poprzeczna)

Z - reakcja pionowa nawierzchni

Jeśli na koło nie działa żadna siła poprzeczna (boczna), to wtedy:

$$Y = 0; \quad \mu = \frac{X}{Y}$$

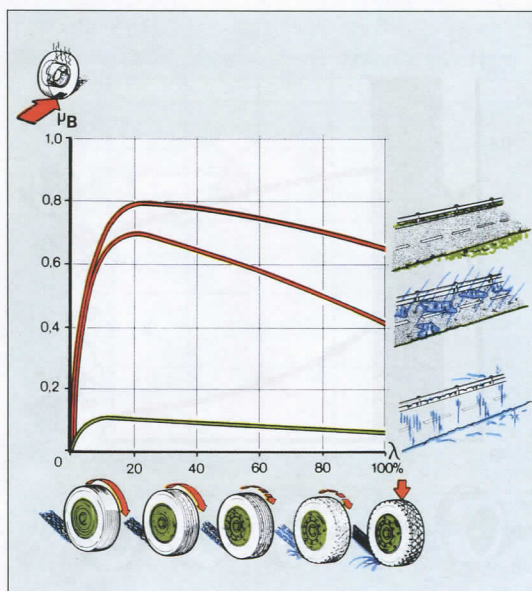
Przyczepność jest zjawiskiem podobnym do tarcia, jednak uwzględniającym „rzeczywiste” warunki toczenia się koła. Określenia „przyczepność” używamy więc jako terminu technicznego, podczas gdy tarcie odnosi się bardziej do wyidealizowanego zjawiska fizycznego. W literaturze zjawiska te są często (niesłusznie) traktowane zamiennie.

Wartość współczynnika przyczepności μ zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj i stan nawierzchni (tabl. 3), poślizgu względnego, rodzaju materiału opony, kształtu rzeźby bieżnika, prędkości jazdy itd.

Tablica 3. Zestawienie różnych wartości współczynnika μ dla różnych rodzajów nawierzchni i koła o znanych parametrach

Rodzaj nawierzchni	Sucha	Mokra
Beton	0,8 - 1,0	0,6 - 0,8
Asfalt	0,7 - 0,8	0,4 - 0,5
Kostka kamienna czysta	0,7 - 0,8	0,4 - 0,5
Kostka kamienna brudna	0,6 - 0,7	0,25 - 0,35
Klinkier	0,7 - 0,8	0,4 - 0,5
Droga gruntowa twarda	0,5 - 0,6	0,3 - 0,4
Droga pokryta śniegiem	0,2 - 0,4	
Droga oblodzona	0,1 - 0,15	

Rys. 1.41. Zmiany współczynnika przyczepności w zależności od poślizgu względnego koła

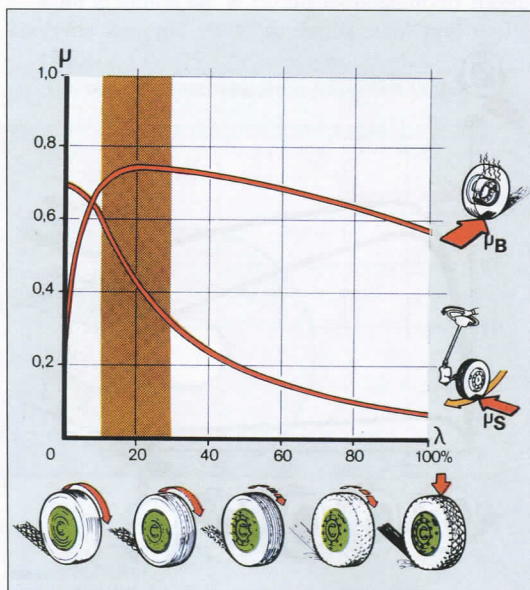


Uwzględniając założenie o stałej prędkości postępowej toczącego się koła i zwiększającym się stopniowo (regulowanym) momencie hamującym, możliwe jest przedstawienie zmian współczynnika przyczepności zależnego od poślizgu względnego koła (rys. 1.41). Zależność ta ma podstawowe znaczenie przy interpretacji zjawisk zachodzących podczas przyspieszania i hamowania pojazdu, tłumacząc zasady działania układów typu ABS i ASR.

Analiza przebiegu zmian współczynnika μ prowadzi do sformułowania uproszczonego, niemniej zasadniczego wniosku: poślizg koła jest zjawiskiem pożądanym - brak poślizgu uniemożliwia rozwinięcie przez koło siły przyczepności warunkującej prawidłowe poruszanie się pojazdu. Poślizg koła powinien być „kontrolowany” tak, aby jego wartość zawierała się w optymalnym przedziale (umożliwiającym osiągnięcie możliwie największej wartości współczynnika przyczepności μ).

Zjawisko to zachodzi zarówno podczas ruchu i hamowania pojazdu na drodze, jak i podczas pomiarów sił hamowania na stanowisku kontrolnym. Przedstawione wyżej rozważania stanowią uzasadnienie stosowania tzw. trzeciej rolki w rolkowych stanowiskach diagnostycznych - rolki, której zadaniem jest mierzenie prędkości obrotowej koła i porównywanie jej z prędkością obrotową rolek. Rolka taka działa więc podobnie jak czujnik układu ABS. Sygnał wynikający z porównania prędkości obrotowej rolki i koła jest miarą jego poślizgu i pozwala zmierzyć wartość największej siły hamowania -

Rys. 1.42. Schematyczny przebieg zależności współczynnika przyczepności wzdłużnej i poprzecznej koła ślizgającego się na nawierzchni



wynikającej z charakterystyki poślizg-współczynnik przyczepności. Więcej na ten temat podczas omawiania stanowiska do badania hamulców.

Na rys. 1.42 zaprezentowano schematyczny przebieg zależności współczynnika przyczepności wzdłużnej i poprzecznej koła ślizgającego się na nawierzchni. Koło toczące się z niewielkim poślizgiem wzdłużnym może przenosić duże siły wzdłużne (hamowania i napędową). Koło toczące się z dużym poślizgiem przenosi coraz mniejsze siły wzdłużne, a co ważniejsze, także małe siły poprzeczne pozwalające na zachowanie kierowności samochodu. Układ ABS zapewnia więc przede wszystkim możliwość wykonywania manewrów podczas hamowania, a tak często sugerowana zdolność do skracania drogi hamowania może być traktowana jedynie w kategoriach przybliżonych.

1.17. Ocena skuteczności hamowania

W świetle obowiązujących przepisów i przyjętego tam sposobu badania oraz wartości granicznych, oceny stanu technicznego hamulców dokonuje się na podstawie wskaźnika (współczynnika) skuteczności (intensywności) hamowania. Nazwy podane w nawiasach odnoszą się do podawanych w literaturze dotyczącej dynamiki pojazdu. Należy tu odwołać się do definicji wskaźnika skuteczności (intensywności) hamowania. W teorii ruchu pojazdu, wskaźnik (współczynnik) intensywności hamowania γ_h - inaczej jednostkowa siła hamowania - wyraża się wzorem:

$$\gamma_h = \frac{X_h}{mg}$$

gdzie:

X_h - suma wszystkich sił hamowania (rys. 1.34)

m - masa pojazdu

Siły hamowania każdej z osi mogą być różne. Na rysunku niektóre siły nie leżą w płaszczyźnie kontaktu koła z nawierzchnią, co wynika jedynie z dążenia do czytelnego przedstawienia rysunku. Do obliczenia - wyznaczenia wartości współczynnika - konieczna jest więc znajomość masy pojazdu i sił hamowania rozwijanych przez każdą z osi pojazdu.

Należy tu sformułować następujące stwierdzenie: uwzględniając technologię badania układu hamulcowego zapisaną we wspomnianych przepisach, konieczne jest dokonanie przed pomiarem tzw. ważenia każdej osi pojazdu, czyli określenie nacisku kół na podłoże. Stanowisko rolkowe przeznaczone do tego rodzaju badania musi mieć „wagę” zdolną do określenia nacisku kół badanej osi.

Bez zmierzenia nacisku nie jest możliwe obliczenie całkowitego ciężaru pojazdu, a tym samym obliczenie interesującego nas wskaźnika. Dyskutowana niekiedy potrzeba wyposażania stanowisk w pomiar nacisków osi wydaje się być „bezdyskusyjna”.

Ponieważ suma sił hamowania wyraża się wzorem:

$$X_h = m a_h$$

gdzie: a_h - opóźnienie hamowania

to współczynnik intensywności hamowania można wyrazić jako:

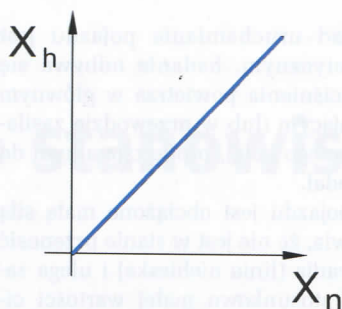
$$\gamma_h = \frac{a_h}{g}$$

Zapis ten jest o tyle ważny, że ujmuje zależność pomiędzy opóźnieniem hamowania a współczynnikiem intensywności hamowania. Jeśli przyjmiemy, że współczynnik intensywności hamowania wynosi 0,5, to obliczona największa możliwa wartość opóźnienia hamowania pojazdu będzie miała wartość ok. 4,9 m/s².

Wyznaczenie wartości opóźnienia hamowania prowadzi do pozornej możliwości obliczenia drogi hamowania. Pozornej dlatego, że droga hamowania obliczona teoretycznie w sposób określony wyżej jest mniejsza od drogi zmierzonej w próbie drogowej. Dociekliwości Czytelnika należy polecić następujące doświadczenie: na dowolnym stanowisku wyznaczyć całkowitą siłę hamowania, następnie współczynnik intensywności hamowania, dalej teoretyczną wartość opóźnienia hamowania i na jego podstawie obliczyć drogę. Dla porównania należy później wykonać próbę drogową na suchej asfaltowej nawierzchni i zmierzyć drogę hamowania, np. dla prędkości początkowej 40 km/h. Zakładając nawet duży błąd pomiarowy, można wyciągnąć interesujące wnioski z tak przeprowadzonego porównania. Uwzględniając istniejące przepisy, które zakładają, że miarą poprawnego działania hamulców jest opóźnienie hamowania, a nie droga, można wykonać pomiar podobny - zmierzyć za pomocą opóźnieniomierza największą wartość opóźnienia i porównać ją z wartością wyznaczoną na stanowisku diagnostycznym.

1.18. Proporcjonalne siły

Dążąc do zapewnienia porównywalności sił hamowania (opóźnienia) wprowadzono dodatkowo pomiar siły nacisku na pedał hamulca. Wszystkie pomiary sił hamowania na stanowisku muszą być



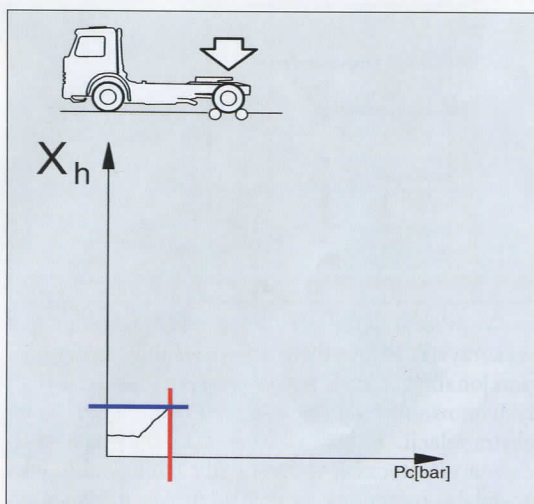
Rys. 1.43. Siła nacisku na pedał hamulca a siła hamowania każdego z kół badanej osi

wykonywane przy jednoczesnym mierzeniu siły nacisku na pedał hamulca.

Obowiązuje bezwzględne zachowanie proporcji pomiędzy siłą nacisku na pedał hamulca X_n i siłą hamowania każdego z kół badanej osi. Tak określona zależność (rys. 43) wynika z przepisów homologacyjnych - nadrzędnych w stosunku do przepisów krajowych stanowiących o badaniu hamulców. Zależność ta jest o tyle ważna, że często wykorzystywana jest podczas badań stanowiskowych, kiedy nie jest możliwe zmierzenie siły hamowania wynikającej z siły nacisku na pedał hamulca zgodnej z przepisami (np. 500 N dla samochodów osobowych i 700 N dla ciężarowych).

Kiedy może nastąpić sytuacja, w której pomiar siły hamowania przy sile nacisku na pedał 500 N nie zostanie zrealizowany? Problem taki pojawia się wtedy, gdy na stanowisku badany jest samochód lekki, o niewielkiej sile nacisku na oś. Problem ten jest szczególnie istotny przede wszystkim dla samochodów użytkowych, takich jak np. ciągniki siodłowe: pojazd przyjeżdża na badanie pusty lub bez naczepy (rys. 1.44).

Rys. 1.44. Pomiar siły hamowania pojazdu użytkowego bez naczepy



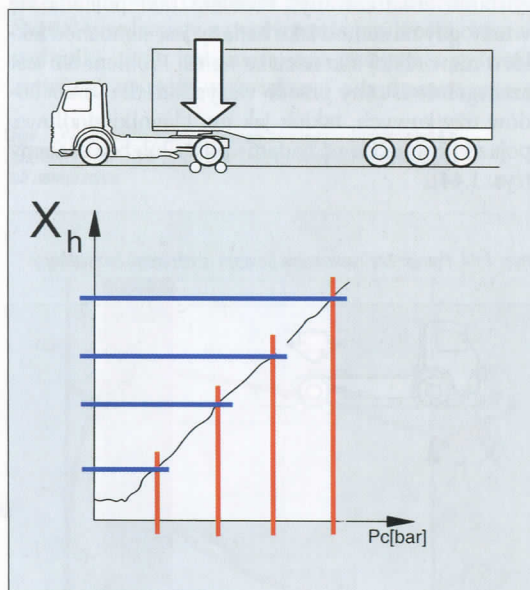
Ponieważ układ uruchamiania pojazdu jest układem pneumatycznym, badanie odbywa się w zależności od ciśnienia powietrza w głównym przewodzie zasilającym (lub w przewodzie zasilającym siłownik danego koła), proporcjonalnym do siły nacisku na pedał.

Badane koło pojazdu jest obciążone małą siłą pionową, co sprawia, że nie jest w stanie przenosić dużej siły hamowania (linia niebieska) i ulega zablokowaniu przy stosunkowo małej wartości ciśnienia (linia czerwona, koło hamowane dużym momentem hamującym). Przewidziana w przepisach siła nacisku 700 N nie jest osiągnięta.

Sytuacja zmieni się, gdy na stanowisko wjedzie pojazd z nacępą (rys. 1.45) obciążoną masą bliską maksymalnej. Możliwa do uzyskania siła nacisku na pedał (bez blokowania kół spoczywających na rolkach) będzie o wiele większa od tej, jaką uzyskano w pierwszym przypadku. Pomiar może być przeprowadzony dla wielu par wartości: siła nacisku-siła hamowania.

Nie można jednak wymagać, aby każdy badany pojazd był specjalnie obciążany tylko na czas badania (dla niektórych pojazdów jest to wręcz niemożliwe).

Rys. 1.45. Pomiar siły hamowania pojazdu z nacępą



W przedstawionej sytuacji rozwiązaniem jest wykorzystanie przytoczonej wcześniej zasady proporcjonalnego przebiegu sił nacisku (ciśnienia) i siły hamowania, a następnie posłużenie się metodą ekstrapolacji, umożliwiającą matematyczne obliczenie teoretycznej wartości siły hamowania, jaka zostałaby osiągnięta, gdyby udało się nacisnąć na

pedał z przewidzianą siłą 700 N. Więcej informacji na temat ekstrapolacji wskazań zawarto w części poświęconej stanowiskom pomiarowym.

1.19. Stanowiska do pomiaru sił hamowania

Stanowiska rolkowe do pomiaru sił hamowania stanowią przeważającą większość w ofercie wielu producentów. Niektórzy z nich nie oferują wręcz urządzeń innych, jak właśnie rolkowe. Są i tacy, dla których urządzenie płytowe stanowi jedynie uzupełnienie oferty.

W przypadku poważnego zaangażowania się w diagnozowanie i serwisowanie np. samochodów ciężarowych, zastosowanie stanowiska rolkowego staje się jedynym możliwym rozwiązaniem. Nie należy jednak sądzić, że stanowiska rolkowe są przypisane branży samochodów użytkowych.

Stanowiska rolkowe stanowią wyposażenie nie tylko wielu stacji kontroli pojazdów, ale również wielu stacji serwisowych samochodów osobowych, dla których rzetelna i wiarygodna ocena rzeczywistego stanu technicznego stają się koniecznością każdego dnia. Obserwuje się przy tym zdecydowaną rozbieżność oczekiwań zależną od potrzeb osoby wykonującej badanie.

Diagnosta na stacji kontroli pojazdów będzie oczekiwał badania, a zwłaszcza sposobu interpretacji wyników, umożliwiającego szybką i - co ważniejsze - wiarygodną diagnozę stanu, sprowadzającą się do stwierdzenia „dobry czy zły”.

Mechanik na stacji obsługi będzie natomiast oczekiwał informacji wskazującej na miejsce niedomagania, dokładne wyrażenie chwilowego stanu układu, a przede wszystkim wskazanie, czy możliwe jest (jak długo?) dalsze użytkowanie pojazdu.

Jakie szczególne cechy sprawiają, że stanowiska rolkowe są najczęściej kupowanym wyposażeniem diagnostycznym? Jakie są ich możliwości pomiarowe? Jakie są wady i zalety?



2. Budowa najprostszego stanowiska

Stanowiska rolkowe do badania hamulców, podobnie jak omawiane wcześniej stanowiska płytowe, umożliwiają pomiar siły hamowania niezależnie wszystkich kół pojazdu: lewej i prawej strony kolejnych osi. Istota budowy stanowiska sprowadza się do umieszczenia koła badanej osi pomiędzy dwoma rolkami odtwarzającymi nawierzchnię drogi (rys. 2.1 i 2.2).

Wystarczy teraz doprowadzić do rolek napęd, aby wprawić je w ruch obrotowy. Spoczywające na nich koło zacznie obracać się swobodnie aż do chwili, gdy zaczniemy wciskać pedał hamulca. Tutaj mała uwaga: siła hamująca koło nie zostanie zmierzona w chwili, gdy rozpoczniemy naciskanie pedału hamulca - istnieje przecież tzw. skok jałowy pedału hamulca.

2.1. Koło na rolkach

Przykład rozważań nad problemem sformułowanym wyżej najlepiej zilustrować rysunkiem przedstawiającym koło znajdujące się pomiędzy rolkami typowego stanowiska diagnostycznego (rys. 2.3). Zaznaczono jedynie te siły i momenty, które stanowią przedmiot prowadzonych rozważań. W sytuacji, gdyby omawiane było zachowanie się całego pojazdu, konieczne byłoby uwzględnienie sił pochodzących od każdej nie badanej osi. Dla uproszczenia naniesiono tylko siły odnoszące się do kontaktu tylko jednej rolki.

Występują takie siły i momenty jak:

$Z_{koła}$ - siła nacisku jednego koła na nawierzchnię
 $N_{koła}$ - składowa siły nacisku



Rys. 2.1. Moduł rolek jako fragment stanowiska do kontroli samochodów użytkowych

$X_{n \text{ rolki}}$ - siła napędowa rozwijana przez jedną rolkę
 $X_{h \text{ koła}}$ - siła hamowania rozwijana przez jedno koło
 $T_{n \text{ rolki}}$ - moment napędowy rozwijany przez jedną rolkę

$T_{h \text{ koła}}$ - moment hamowania rozwijany przez jedno koło

Pomiar siły hamowania wykorzystuje często sto-



Rys. 2.2. Moduł rolek jako samodzielny zespół przed wmontowaniem w fundament stanowiska kontrolnego - widoczna „chropowatość” powłoki pokrywającej rolki

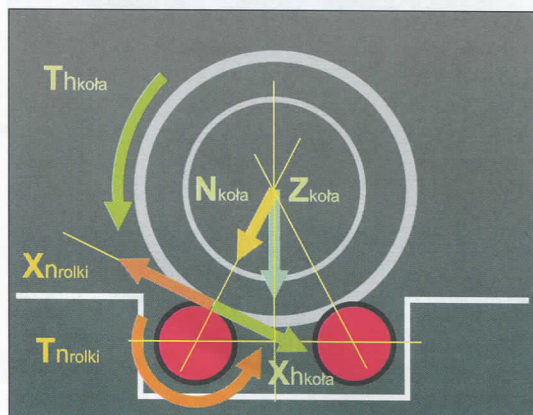
sowaną w mechanice zasadę równowagi sił i momentów: tzw. zasada akcji i reakcji. Ponieważ nie jest możliwe zmierzenie wprost siły (momentu) hamowania, wykorzystanie tej zasady pozwala zmierzyć moment, a następnie siłę reakcji (moment dostarczany przez układ napędowy stanowiska).

Oczywiste w tak zapisanych warunkach jest to, że im większa jest moc (moment) układu napędowego, tym większe siły reakcji - siły hamowania możemy zmierzyć.

Ponieważ pomiędzy siłą hamowania, a siłą nacisku na rolkę zachodzi zależność:

$$X_{h \text{ koła}} = \mu N_{\text{koła}}$$

Rys. 2.3. Siły i momenty działające na koło pomiędzy rolkami typowego stanowiska diagnostycznego



możliwość bezpośredniego (bez korzystania z metody ekstrapolacji) pomiaru dużych wartości siły hamowania osiągnięta jest albo przez zwiększenie siły nacisku koła (zwiększenie obciążenia pojazdu) albo zwiększenie wartości współczynnika przyczepności (wartości maksymalne współczynnika osiągane są dla poślizgu koła ok. 15-20%).

W warunkach warsztatowych i SKP zwiększanie obciążenia pojazdu (osiągane np. przez zwiększenie masy ładunku lub liczby pasażerów) jest kłopotliwe, czasochłonne i kosztowne. Trudno również wymagać, aby badany w SKP ciągnik siodłowy z naczepą był najpierw ładowany szesnastoma tonami ładunku, a następnie rozładowywany. Podobnie badanie samochodu osobowego wymagałoby obecności, co najmniej trzech „rezerwowych” diagnostów stanowiących dodatkowe obciążenie pojazdu.

Istnieją wprowadzone urządzenia przeznaczone dla samochodów użytkowych, umożliwiające zwiększenie docisku badanej osi do rolek i symulowanie zmiennego obciążenia pojazdu, jednak z powodu braku właściwej interpretacji zjawisk zachodzących podczas badania układu hamulcowego i obaw przed ponoszeniem większych kosztów wyposażenia, stosowane raczej niechętnie.

Drugim sposobem jest zwiększenie współczynnika przyczepności pomiędzy kołem i rolką - stąd właśnie konieczność stosowania materiałów o możliwie największym współczynniku przyczepności, które umożliwiają pomiar dużych sił hamowania bez korzystania z metody ekstrapolacji.

Ekstrapolacja jest metodą doskonale nadającą się do oszacowania wartości siły hamowania, którą ze względu na powstanie poślizgu koła trudno jest zmierzyć bezpośrednio. Ekstrapolacja wprowadza jednak pewien błąd, który jest tym większy, im mniejsze wartości siły hamowania udaje się zmierzyć nie doprowadzając do poślizgu koła. Wniosek jest więc oczywisty: należy dążyć do bezpośredniego zmierzenia jak największych wartości sił hamowania bez konieczności stosowania metody ekstrapolacji. W znaczącym stopniu zapewniają to „chropowate” powłoki rolek - niekiedy tak bardzo chropowate, że budzące bezpodstawne obawy przyszłych użytkowników o stan badanego ogumienia.

2.2. Mierzmy siłę hamowania

Naciskając na pedał hamulca z dostatecznie dużą siłą (np. 250 N) sprawiamy, że obracające się na rolkach koło zacznie być hamowane. Wytworzą się warunki równowagi: z jednej strony napędzane silnikiem - obracające się rolki, z drugiej - koło hamowane odpowiednim momentem hamującym.

W wyniku wzajemnego oddziaływania koło-rolka na obudowie mechanizmu napędzającego rolki pojawia się moment reakcyjny. Wystarczy zmierzyć ten moment, „zamienić” go na siłę, a wynik przedstawić w formie przyjaznej dla wykonującego pomiar.

Opis ten tylko pozornie jest skomplikowany.

Aby łatwiej zrozumieć zachodzące zjawiska, powinniśmy wyobrazić sobie sytuację bardzo podobną, tyle, że odnoszącą się do koła znajdującego się na rolkach i pozostającego w spoczynku (koło nie obraca się). Wcisnąc pedał hamulca sprawiamy, że koło jest zahamowane (np. tak, jak podczas zatrzymania pojazdu na wzniesieniu). Chcąc je obrócić musimy przyłożyć do osi rolki stanowiska moment napędowy. Jaki? Taki, aby pokonać siłę (moment) hamowania koła.

Oczywiście, moment napędzający powinien być dostatecznie duży, aby pokonać moment hamowania koła. Możemy teraz przyjąć, że pomiar taki nie odbywa się statycznie (w spoczynku), tylko w ruchu - rolki obracają się z niewielką prędkością.

W rzeczywistości jest to prędkość kilku kilometrów na godzinę (3-5 km/h). Pomiar ten właśnie ze względu na małą prędkość pomiaru nazywany jest pomiarem w warunkach quasi-statycznych (prawie-statycznych).

Posługiwanie się takim stanowiskiem pozwala diagnoście ocenić układ hamulcowy nie tylko pod kątem jego bezpieczeństwa (np. stwierdzenia, czy pojazd zostanie zatrzymany na drodze o określonej długości, czy wszystkie hamulce „równo biorą” itd.), ale również pod kątem ewentualnych niedomagań układu i lokalizowania usterek. Stanowiska rolkowe znakomicie nadają się do przeprowadzania takich pomiarów.

2.3. Cechy szczególne pomiaru siły hamowania

Pomiar siły hamowania dokonywany na rolkach stanowiska diagnostycznego charakteryzuje się dwiema cechami, na które warto zwrócić uwagę. Są one o tyle istotne, że wpływają na sposób wykonania pomiaru i jakość otrzymanych wyników.

Istotne jest przede wszystkim zwrócenie raz jeszcze uwagi na to, że pomiar na drodze i na stanowisku różni się nie tylko ze względu na brak „czynnika energetycznego”, ale przede wszystkim ze względu na różnice w warunkach współpracy koła z nawierzchnią płaską i koła stojącego „na rolkach”.

Koło stojące na rolkach bardziej się odkształca, co wynika po pierwsze z konstrukcji samego stanowiska, po drugie - z mniejszego promienia krzywizny rolki stanowiska. Mogłoby więc okazać się, że warunki współpracy koło-podłoże (jezdniarolki) tak dalece różniłyby się, że ich porównywanie byłoby prawie niemożliwe. Przydatność takiego stanowiska do rzetelnej oceny stanu hamulców byłaby więc problematyczna.

Zjawisku temu przeciwdziała się na dwa sposoby. Pierwszy polega na zwiększeniu ciśnienia pompowania koła (na czas dokonywania pomiaru). Takie koło mniej odkształca się, a warunki współpracy koło-rolki upodabniają się do tych, jakie występują na płaskiej nawierzchni drogi.

Drugi sposób to optymalizowanie konstrukcji stanowiska i dobór odpowiedniej (możliwie największej średnicy rolek) oraz rozstawu ich osi, tak, aby koło jak najmniej w nie „wpadało”. Optymalizację pozostawia się konstruktorom, jednak decydując się na zakup stanowiska dobrze jest zwrócić uwagę na wymienione wyżej parametry.



3. Niepotrzebne blokowanie

Zablokowanie koła podczas hamownia samochodem jest zjawiskiem niebezpiecznym. Podobnie dzieje się w trakcie badania na stanowisku, z tą różnicą, że słowo niebezpieczny zastąpimy określeniem - niepożądany. Niepożądany, bo uniemożliwiający pomiar siły hamowania dla toczącego się koła. W przypadku zablokowania koła mierzona będzie wartość siły wynikająca z poślizgowego, a nie tocznego współczynnika przyczepności. Nie będziemy więc mogli wtedy ocenić rzeczywistych „możliwości” układu hamulcowego. Ubocznym efektem takiego hamowania (podobnie jak w warunkach drogowych) może stać się uszkodzenie bieżnika opony.

Obowiązują tutaj podobne zalecenia, jak w przypadku poślizgu na drodze, przy czym, na stanowisku diagnostycznym dopuszczalna wartość poślizgu jest ustalana przez konstruktorów na podstawie doświadczeń wynikających z badań drogowych pojazdów (niekiedy może zostać zmieniona podczas wykorzystania tzw. oprogramowania serwisowego dostępnego dla ekip technicznych konserwujących stanowisko).

Zjawisku blokowania należy zapobiec. Podkreślimy - niepożądane jest blokowanie koła. Poślizg w określonym zakresie wartości jest dopuszczalny, a nawet oczekiwany. Przypomnijmy sobie zależność: współczynnik przyczepności-poślizg przedstawioną wcześniej. Właśnie z tej zależności wynika, że pewien niewielki poślizg pozwala w pełni wykorzystać przyczepność koła do nawierzchni drogi, jak również rolki stanowiska. Ta ostatnia powinna charakteryzować się jak największym współczynnikiem przyczepności koło-rolka.

Decydując się na zakup, należy zwrócić uwagę na rodzaj materiału, z jakiego wykonane są rolki. Producenci oferują najczęściej trzy rodzaje powierzchni rolek: tworzywo sztuczne, masa bitumiczno-betonowa, odpowiednio przygotowana powierzchnia metalowa (rolki „ryflowane” lub napawane).

3.1. Trzecia rolka rozwiązuje problem

Kontrolowanie poślizgu koła samochodu obracającego się na rolkach stanowiska odbywa się naj-

częściej przez zastosowanie dodatkowej, trzeciej rolki o małej średnicy, umieszczonej pomiędzy dwiema rolkami zasadniczymi.

Trzecia rolka obraca się swobodnie dotykając bieżnika koła. Właściwe przyleganie zapewnia najczęściej zestaw dźwigni i sprężyn tak, że rolka ta pozostaje w ciągłym kontakcie z oponą. Rolka ta pełni rolę miernika prędkości obrotowej koła samochodu i jest połączona z układem pomiarowo-sterującym stanowiska.

Jak funkcjonuje taki układ?

Do tego, aby udzielić odpowiedzi na pytanie, powinniśmy raz jeszcze wspomnieć o mocy silników napędzających stanowisko (im większa moc - tym lepiej). Silniki o dużej mocy będą w stanie wytworzyć duży moment napędowy, a tym samym napędzić rolki tak, aby ich prędkość obrotowa nie zmieniła się nawet przy największej sile hamowania.

Tak rygorystyczne założenie prowadziłoby jednak do sytuacji, której chcemy uniknąć.

Wymaganie stałej prędkości obrotowej rolek wynika przede wszystkim z chęci dokonywania pomiaru w ustalonych warunkach, a dopuszczalne niewielkie zmiany prędkości obrotowej (rzędu kilku procent) nie wpływają na przebieg badania.

Stwierdziliśmy więc, że prędkość obrotowa rolki powinna być stała, badane koło (bez hamowania) będzie również obracało się z tą samą prędkością. Różnice pojawią się od chwili, gdy rozpoczniemy hamowanie - koło będzie obracało się coraz wolniej i wolniej, poślizg koła będzie coraz większy, aż wreszcie koło zatrzyma się (jeśli nie zadziała układ kontrolujący, rolki stanowiska będą obracały się nadal).

Pragnąc zabezpieczyć się przed zablokowaniem koła, wystarczy zmierzyć chwilową wartość prędkości koła, odnieść ją do prędkości rolek i obliczyć wartość poślizgu (wyrażoną w procentach). Jeśli obliczona wartość przekroczy wartość ustaloną, powinien zadziałać układ sterujący i wyłączyć silniki napędzające.

W praktyce jednak nie zawsze jest to takie proste.