

WYBRANE PROBLEMY Z EKSPLOATACJI KOLEJOWEGO HAMULCA TARCZOWEGO

WOJCIECH SAWCZUK¹

Streszczenie

Artykuł poświęcony jest hamulcom tarczowym, które w stosunku do tradycyjnego hamulca klockowego są częściej stosowane w pojazdach szynowych. Do podstawowych zalet tarczowych układów hamulcowych należy stały, niezmienny w całym zakresie prędkości współczynnik tarcia ślizgowego μ , którego wartość wynosi $\mu = 0,35$ [1]. Dążenie do podnoszenia prędkości pociągów wymusza stosowanie większych mocy hamowania a więc układów hamulcowych szybko przejmujących i rozpraszających nagromadzoną energię cieplną. Dla intensyfikacji procesów chłodzenia pary ciernej tarcza hamulcowa-okładzina cierna stosuje się tarcze z kanałami wentylującymi ukształtowanymi poprzez różnego rodzaju łopatki. Dzięki temu tarcze te odprowadzają około 40% [4] ciepła wytworzonego podczas hamowania. Wymuszona wentylacja powoduje jednak straty energii na ich obrót podczas jazdy przy wyłączonych hamulcach, co szczególnie istotne jest dla pociągów o małej częstotliwości hamowań oraz w przypadkach kiedy sam profil szlaku nie wymusza długotrwałego hamowania ruchowego.

Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia z eksploatacji kolejowego hamulca tarczowego jak całkowity opór generowany przez tarczę hamulcową z podziałem na opór bezwładności masy tarczy w ruchu obrotowym i opór powodowany przez wentylator tarcz oraz wpływ zatkniętych kanałów wentylacyjnych na proces hamowania.

Słowa kluczowe: hamulec tarczowy, opory bezwładności tarczy, kanały wentylacyjne, temperatura tarczy, współczynnik tarcia

1. Wstęp

Eksploatacja hamulca tarczowego pokazała, że przy hamowaniach z dużych prędkości, dochodzi do obciążenia cieplnego układu hamulcowego, co w konsekwencji zmniejsza sprawność hamulca i wydłuża drogę

hamowania. W celu schładzania tarcz stosuje się wewnętrzne kanały wentylacyjne, odprowadzające część ciepła do otoczenia. Jednakże tarcze ze specjalnie ukształtowanymi kanałami wentylacyjnymi w czasie obrotu są powodem zużycia energii pobieranej przez wentylator. Ponadto warunek szybkiej zamiany energii hamowania na ciepło jest ściśle uzależniony od zabrudzenia wewnętrznych kanałów wentylacyjnych i ew. obecności tłuczni lub innych obcych ciał w przestrzeniach łopatkowych tarczy. Koncentracja energii cieplnej na tarczy hamulcowej wpływa na pogorszenie procesu hamowania, co w skrajnym przypadku może doprowadzić do utraty siły hamowania. Podczas wykonywania

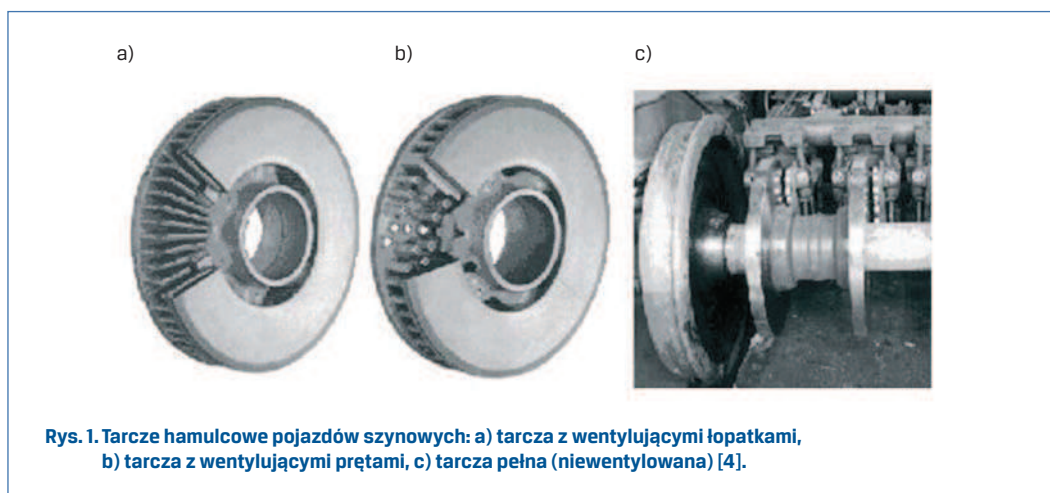
¹ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl, tel. (61) 665-2023

przeглядów układu hamulcowego na wagonie zgodnie z dokumentacją techniczną ruchową [2], szczególną uwagę zwraca się na zabrudzenia i występowanie ciał obcych w kanałach wentylacyjnych tarczy.

Celem artykułu jest przedstawienie rachunku obliczania oporu bezwładności tarczy hamulcowej jako masa w ruchu obrotowym z jednoczesnym uwzględnieniem oporu generowanego przez wentylator tarczy hamulcowej [6] oraz przedstawienie wyników badań stanowiskowych tarczy hamulcowej z zamkniętą przestrzenią łopatkową symulujących obecność ciał obcych w kanałach wentylacyjnych.

2. Charakterystyka konstrukcyjna wentylowanych tarcz hamulcowych

Wymagania stawiane tarczowym układom hamulcowym, jak hamowanie z dużych prędkości i realizacja większego docisku okładzin ciernych do tarczy spowodowało, że naturalne ich chłodzenie jest niewystarczające w oddawaniu nagromadzonego ciepła, powstałego w czasie hamowania.



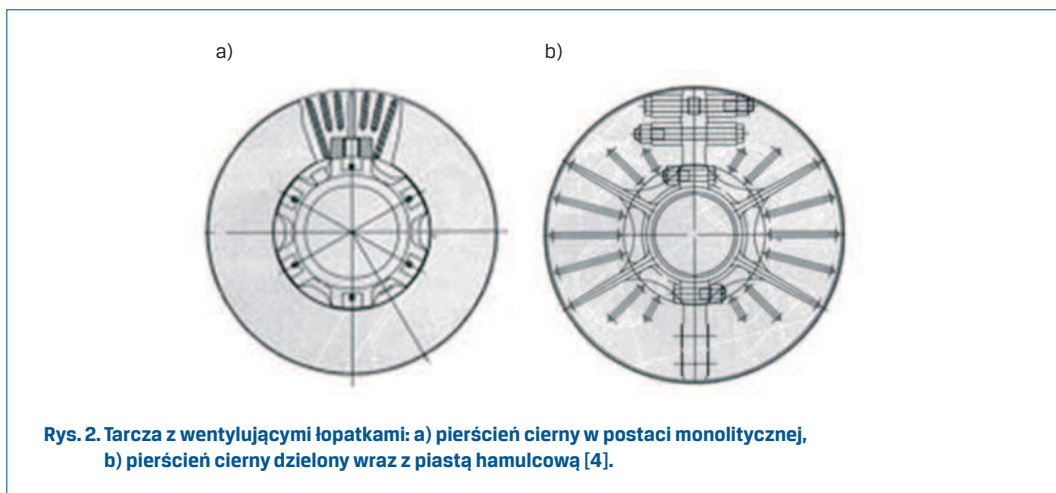
Rys. 1. Tarcze hamulcowe pojazdów szynowych: a) tarcza z wentylującymi łopatkami, b) tarcza z wentylującymi prętami, c) tarcza pełna (niewentylowana) [4].

W konsekwencji dochodziło do odkształcenia tarczy hamulcowej, co wiązało się z koniecznością jej wymiany przed osiągnięciem dopuszczalnego zużycia powierzchni cierniej. W celu przyspieszenia oddawania nagromadzonego ciepła podczas hamowania zaczęto stosować tarcze z wymuszonym wewnętrznym przepływem powietrza. Stosuje się przy tym promieniście rozłożone łopatki chłodzące (rys.1a) lub pręty dystansowe (rys.1b).

Spośród tarcz wentylowanych jako pierwsze na szeroką skalę były stosowane tarcze z wentylującymi łopatkami. Konstrukcja takiej tarczy składa się z dwóch pierścieni ciernych, pomiędzy którymi znajdują się łopatki wentylujące. Łopatki w liczbie od 60 do 100

sztuk umożliwiają „transportowanie” powietrza z części środkowej tarczy na zewnątrz pod wpływem siły odśrodkowej.

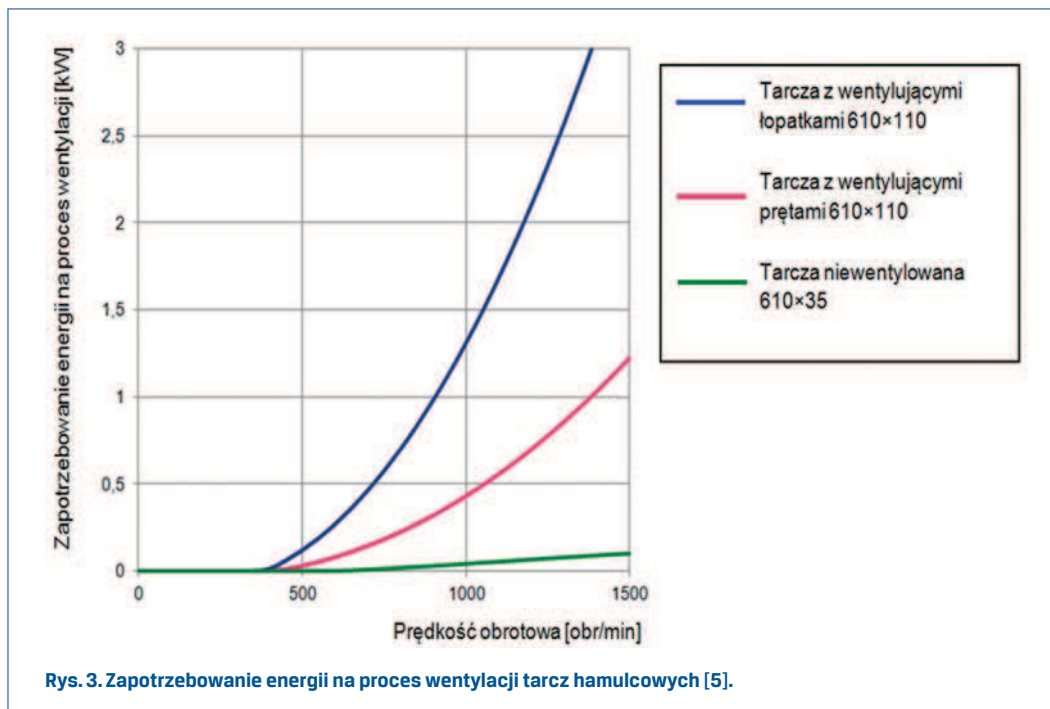
W kanałach między łopatkami następuje przyrost prędkości obwodowej powietrza, które przepływając wewnątrz tarczy „odbiera” ciepło powstałe w czasie hamowania. Pierścień cierny wykonany jako monolit najczęściej z żeliwa szarego lub sferoidalnego, jest połączony ze stalową piastą za pomocą 4 lub 6 sworzni (rozwiązanie firmy Knorr-Bremse), które jednocześnie umożliwiają osiową rozszerzalność cieplną tarczy względem piasty, co przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Tarcza z wentylującymi łopatkami: a) pierścień cierny w postaci monolitycznej, b) pierścień cierny dzielony wraz z piastą hamulcową [4].

Rozwiązaniem nowszym od tarcz z wentylowymi łopatkami są tarcze z wentylującymi prętami. W odróżnieniu od tarcz z łopatkami wykazują one mniejsze straty energii w wyniku wymuszonej wentylacji bez pogorszenia procesu rozpraszania energii cieplnej powstałej w procesie hamowania. Taki efekt uzyskano zastępując wirujące łopatki gęsto rozmieszczonymi prętami (rys.1b), przez co przestrzeń wentylowana została zmniejszona o $\frac{1}{3}$. Gęste rozmieszczenie prętów na całej powierzchni wewnątrz tarczy umożliwia dobre przewodzenie ciepła a ogólnie pojmowany ruch tarczy powoduje odprowadzenie ciepła na zewnątrz. Zassane powietrze jest rozbijane przez pręty i ciągle zmieniając kierunki przepływu efektywniej odbiera nagromadzoną energię cieplną w stosunku do tarczy z wentylującymi łopatkami.

Tarcze z wentylowanymi prętami występują również w postaci dzielonej lub w postaci monolitycznej (rozwiązanie klasyczne). Należy nadmienić, że elementy łączące tarcze zabierają część przestrzeni wewnętrznej zmniejszając tym samym intensywność chłodzenia kosztem możliwości łatwej i szybkiej wymiany pierścienia na nowy.



Przy połączeniu tarczy hamulcowej z piastą stosuje się rozwiązanie firmy Knorr-Bremse przy użyciu sześciu sworzni. Tarcza o takiej konstrukcji jest stosowana zarówno w pojazdach kursujących z prędkościami 160 km/h, jak i z prędkością 200 km/h.

Badania [6] przeprowadzone na tarczy z wentylującymi prętami oraz łopatkami pokazały, że tarcza wyposażona w pręty dystansowe charakteryzuje się o 60% mniejszym zapotrzebowaniem energii z powodu wymuszonej wentylacji w porównaniu do klasycznej tarczy z wentylującymi łopatkami. Ponadto badania te wykazały, że w tarczach z prętami wentylującymi możliwe jest uzyskanie większej o ok. 3 % średniej mocy hamowania a przez równomierne rozłożenie prętów (mostków) na całej powierzchni tarczy intensywniej odprowadzone jest ciepło hamowania do otoczenia. Oznacza to, że w tarczy z prętami, mimo słabszego pompowania powietrza, odprowadzanie ciepła jest bardziej efektywne niż w tarczy łopatkowej. Dzięki temu tarcza z prętami jest mniej wrażliwa na powstawanie pęknięć termicznych podczas hamowania nagłego. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi porównawcze wartości zapotrzebowania energii na przepompowywanie powietrza przez wentylator dla tarczy z wentylującymi łopatkami, prętami i tarczy nie wentylowanej (pełnej) w funkcji prędkości obrotowej.

3. Sposób oszacowania uśrednionej mocy rozpraszania energii przez tarczę hamulcową rozpatrywaną jako masa w ruchu obrotowym

W tarczach z wentylującymi łopatkami i prętami poza stratami energii na wentylatorze występują również opór bezwładności tarczy jako masy znajdującej się w ruchu obrotowym. Do wyznaczenia charakterystyki mocy pobieranej przez tarczę należy wykorzystać dane zawarte w Tab. 1. Rachunek obliczania mocy tarczy o określonej masie zaprezentowano na przykładzie tarczy typu 610×110 (średnica×szerokość) dla jednej prędkości obrotowej.

Tabela 1. Dane wyjściowe do obliczenia oporu bezwładności tarczy hamulcowej w ruchu obrotowym.

Lp.	Wielkości geometryczne i termodynamiczne	Oznaczenie i wartości
1	Masa tarczy z wentylującymi łopatkami	$m_l=123,2$ kg
2	Masa tarczy z wentylującymi prętami	$m_p=112,2$ kg
3	Masa tarczy niewentylowanej	$m_n=83,4$ kg
4	Średnica zewnętrzna tarczy wentylowanej i niewentylowanej	$d_z=0,610$ m
5	Średnica wewnętrzna tarczy wentylowanej i niewentylowanej	$d_w=0,193$ m
6	Gęstość żeliwa	$\rho_z=7200$ kg/m ³
7	Gęstość stali	$\rho_s=7850$ kg/m ³
8	Przyspieszenie liniowe	$a=1,0$ m/s ²
9	Prędkość obrotowa tarczy	$n=1000$ obr/min

Objętość tarczy oblicza się z wzoru:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{123,2}{7200} = 0,017 [m^3] \quad (1)$$

gdzie: m - masa tarczy hamulcowej w kg, ρ - gęstość materiału tarczy w kg/m³.

Grubość zastępczą roboczej, pierścieniowej części tarczy wyznacza się z zależności:

$$g_z = \frac{V}{\left(\frac{\pi \cdot d_z^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_w^2}{4}\right)} = \frac{0,017}{\left(\frac{3,14 \cdot 0,61^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,193^2}{4}\right)} = 0,064 [m] \quad (2)$$

Moment bezwładności roboczego pierścienia tarczy oblicza się według wzoru:

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \left(\frac{d_z^2}{4} + \frac{d_w^2}{4} \right) = \frac{1}{2} \cdot 123,2 \left(\frac{0,61^2}{4} + \frac{0,193^2}{4} \right) = 6,3 [kg \cdot m^2] \quad (3)$$

Prędkość kątową tarczy, przy założonej stałej prędkości obrotowej n wyznacza się z wzoru:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 104,7 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (4)$$

Przyspieszenie kątowe tarczy, przy założeniu stałej wartości przyspieszenia pojazdu $a=1\text{m/s}^2$, oblicza się z wzoru:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{a}{\frac{d_z}{2}} = \frac{1}{\frac{0,61}{2}} = 3,28 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \quad (5)$$

Czas procesu hamowania można oszacować z zależności:

$$t = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{104,7}{3,28} = 31,9[\text{s}] \quad (6)$$

Początkową, chwilową energię kinetyczną pierścienia tarczy oblicza się z wzoru:

$$E_k = \frac{I \cdot \omega^2}{2} = \frac{6,3 \cdot 104,7^2}{2} = 34530,6[\text{J}] \quad (7)$$

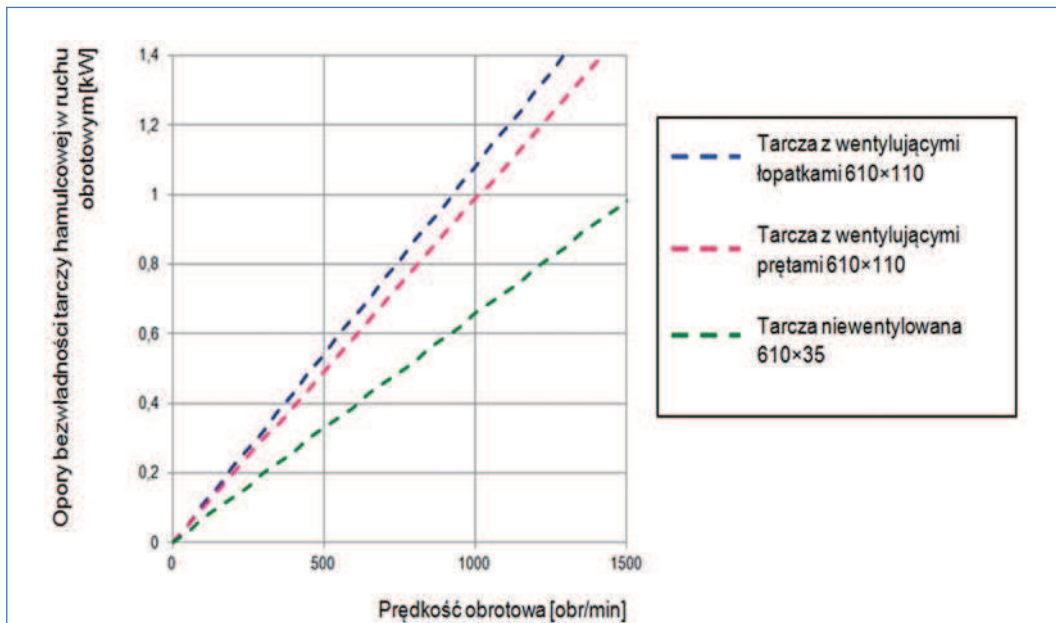
Uśredniona w czasie t moc oporu ruchu procesu hamującego wyizolowaną z pojazdu tarczą wyznacza się z wzoru:

$$N = \frac{dE}{dt} = \frac{E_k}{1000 \cdot t} = 1,08[\text{kW}] \quad (8)$$

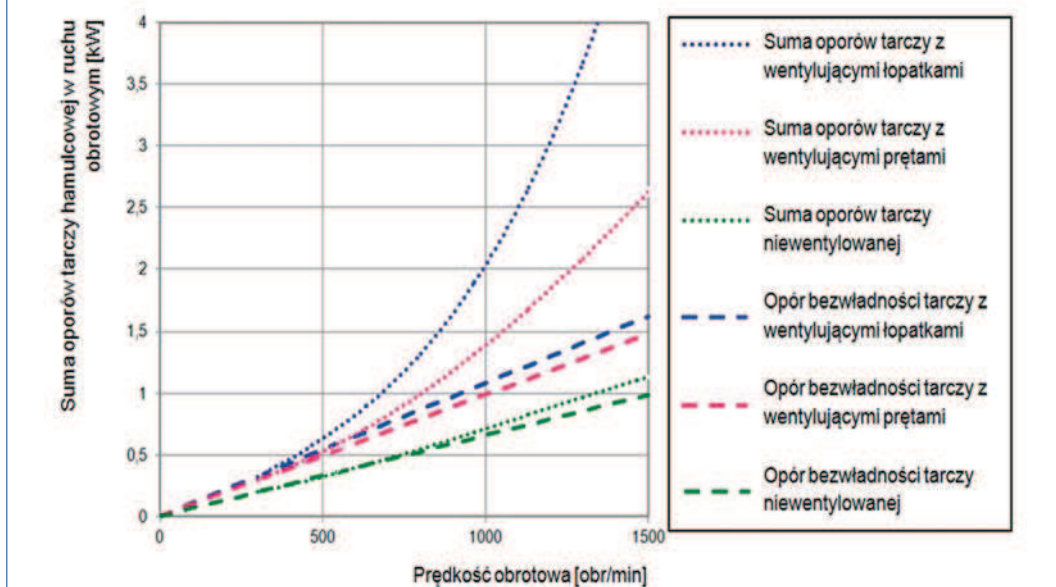
Jest to obliczenie jednego punktu pracy tarczy hamulcowej. Chcąc znaleźć dalsze punkty charakterystyki postępuje się w identyczny sposób podstawiając kolejne wartości prędkości obrotowej tarczy hamulcowej. Przedstawiony rachunek umożliwia obliczenie mocy zużywanej przez tarcze różnych konstrukcji przy znajomości ich masy, wymiarów geometrycznych i gęstości materiału tarczy hamulcowej przy stałym przyspieszeniu kątowym ε .

Na rysunku 4 przedstawiono uśredniony przebieg oporu bezwładności tarczy w ruchu obrotowym. Suma oporu bezwładności i oporu stawianego (generowanego) przez wentylator tarcz hamulcowym w ruchu obrotowym przedstawiono na rysunek 5.

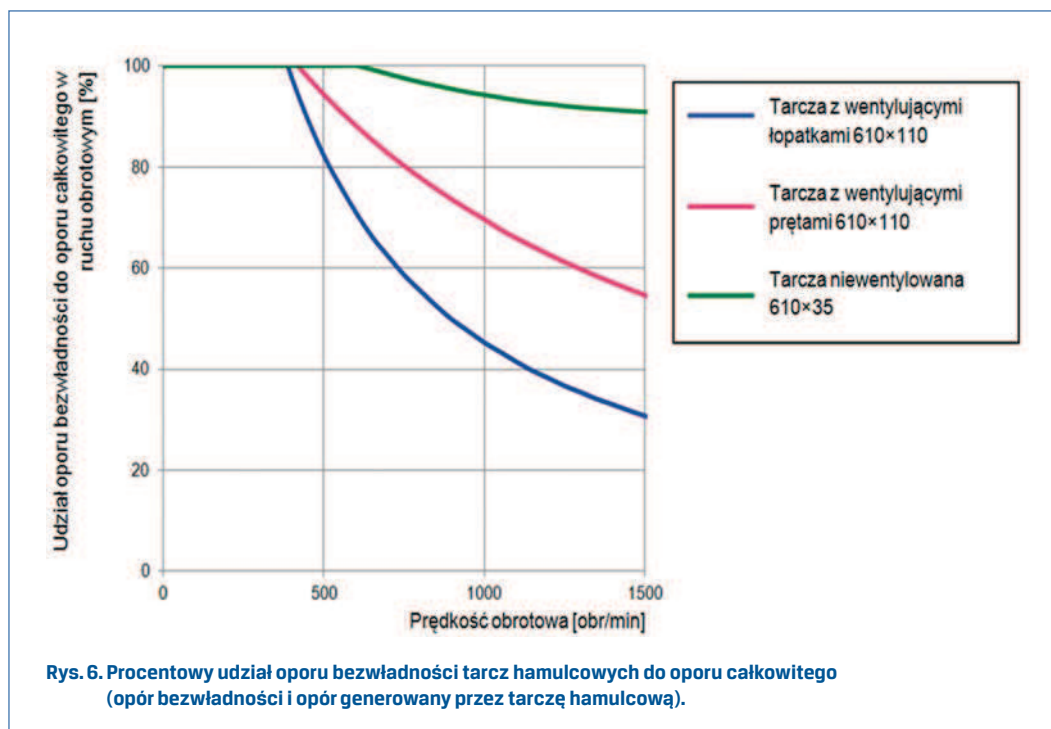
Procentowy udział rozproszonej energii tarczy znajdującej się w ruchu obrotowym do energii całkowitej układu badanego przedstawia rysunek 6.



Rys. 4. Przebiegi uśrednionych wartości mocy oporów ruchu tarczy hamulcowej w ruchu obrotowym, w funkcji prędkości tego ruchu.



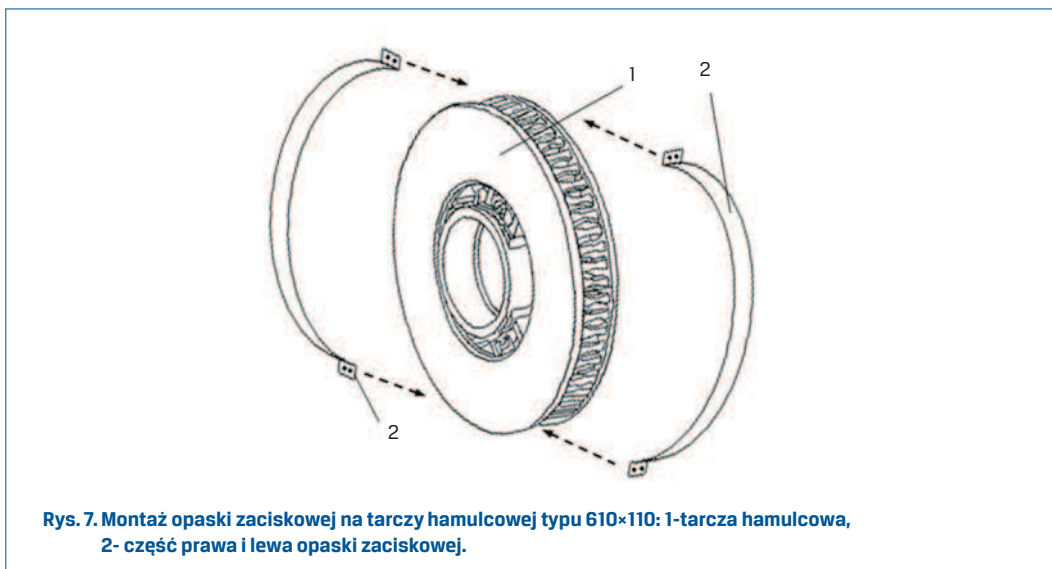
Rys. 5. Suma oporów tarczy hamulcowej w ruchu obrotowym (opór bezwładności i opór generowany przez wentylator tarczy).



4. Badanie tarczowego hamulca kolejowego przy zamkniętych kanałach wentylacyjnych tarczy hamulcowej

4.1. Metodyka i obiekt badań

Badania przeprowadzone zostały na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców pojazdów szynowych, obiektem badań była tarcza hamulcowa typu 610×110 z wentylującymi łopatkami oraz komplet dotartych okładzin typu 200 FR20H.2 o grubości 35 mm. Do badań wykorzystany został program badawczy C (szybka jazda) zgodnie z [1], hamowania wykonano z prędkości 120, 160, 200 km/h, przy nacisku okładziny do tarczy wynoszącym 44 kN i masie hamującej przypadającej na jedną tarczę 7,5 t. Do rejestracji temperatury tarczy w całym zakresie czasu hamowania wykorzystano sześć termopar zamocowanych po trzy z dwóch stron tarczy i rozmieszczonych co 120° na trzech promieniach. Zatrzymanie procesu „pompowania” powietrza poprzez ew. obecnością obcych ciał we wszystkich przestrzeniach międzyłopatkowych, uzyskano przez założenie opaski zaciskowej na łopatkach wentylacyjnych. Sposób zasłonięcia przestrzeni wentylacyjnej przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Montaż opaski zaciskowej na tarczy hamulcowej typu 610×110: 1-tarcza hamulcowa, 2- część prawa i lewa opaski zaciskowej.

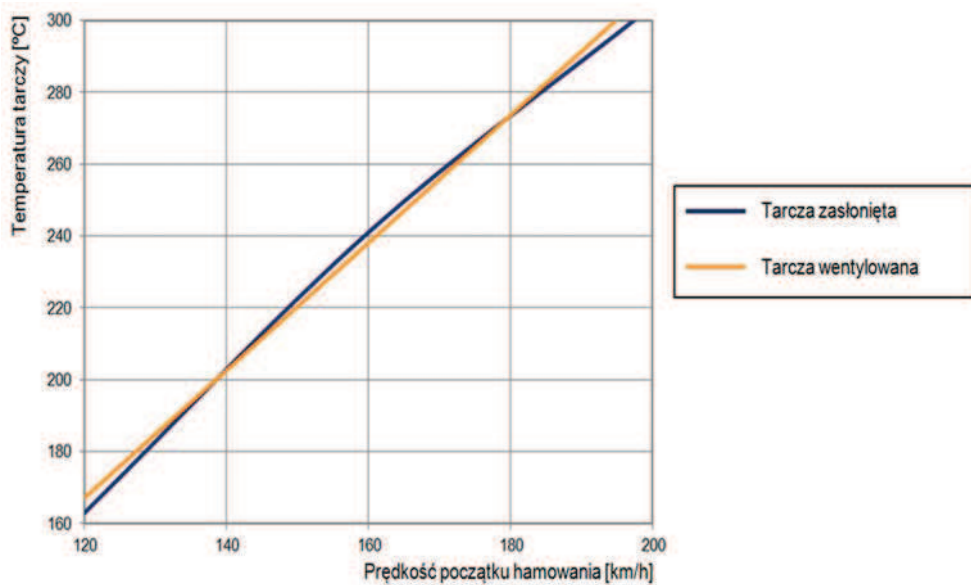
Przed rozpoczęciem badań zasadniczych, wykonano serię badań identyfikacyjnych na tarczy z otwartymi kanałami wentylacyjnymi, dzięki czemu realizowany był niezakłócony przepływ powietrza chłodzącego. Dla każdej prędkości początku hamowania wykonano osiem powtórzeń hamowań.

4.2. Analiza wyników badań

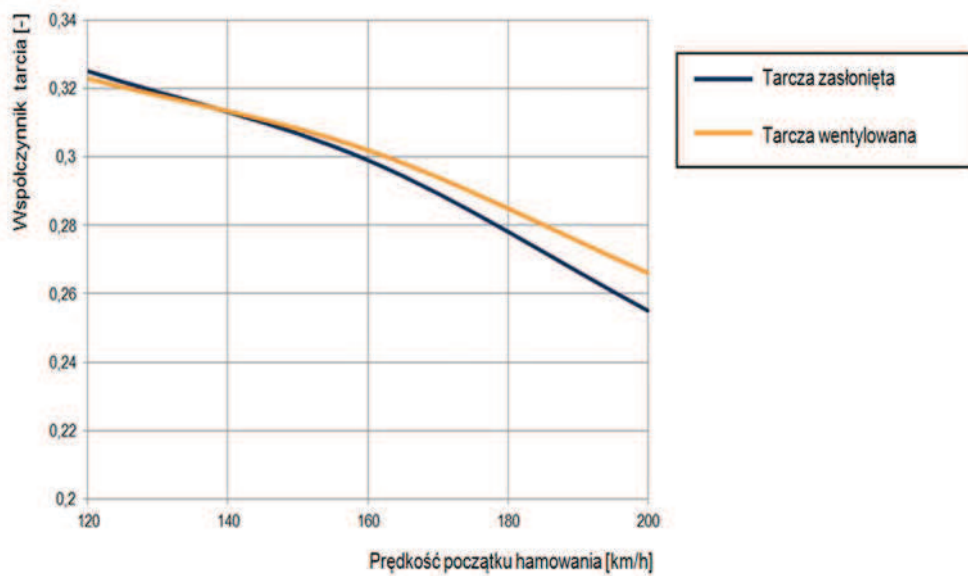
Podczas badań wielkościami mierzonymi była temperatura tarczy mierzona w chwili zatrzymania (rys. 8), średni współczynnik tarcia (rys. 9) oraz czas stygnięcia tarczy do temperatury 60°C (rys. 10). Chłodzenie tarczy realizowano symulując przejazd wagonu z prędkości 100 km/h.

Hamowania tarczy z zasłoniętymi łopatkami wentylacyjnymi mogły doprowadzić do zmian w strukturze materiału w wyniku silnego obciążenia cieplnego. Na powierzchni ciernej tarczy pojawiły się przegrzania w postaci dwóch pierścieni w okolicach średnicy wewnętrznej i średnicy zewnętrznej tarczy. Przebarwienia powierzchni ciernej zaobserwowano już po wykonaniu sześciu hamowań (rys. 11).

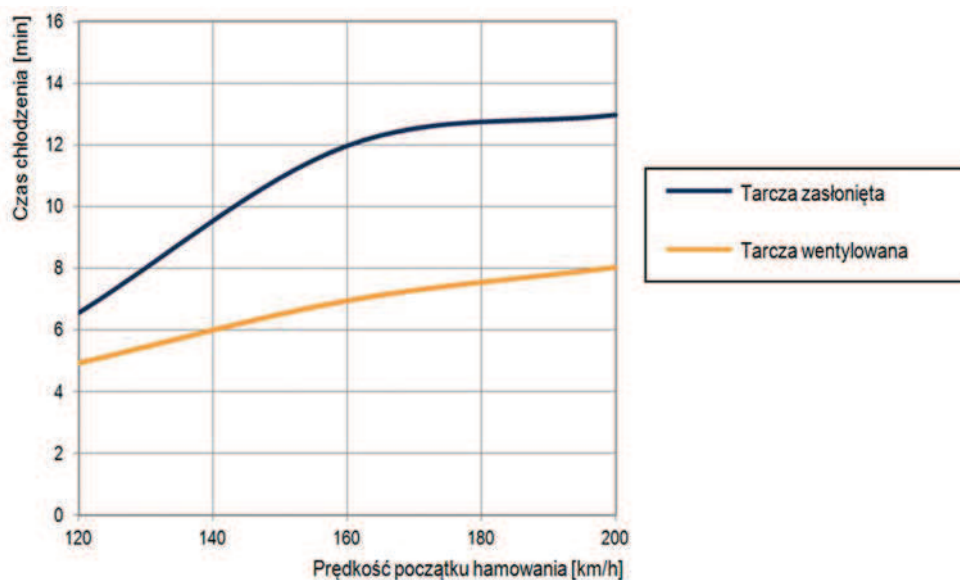
Podczas hamowań na tarczy z zasłoniętą przestrzenią łopatkową rejestrowano na jednej z termopar przekroczenie chwilowej temperatury tarczy powyżej 400°C osiągającą wartości w przedziale 404÷417°C. Zgodnie z [1] tarcze hamulcowe pojazdów szynowych w czasie hamowań nie powinny osiągać chwilowej temperatury ponad 400°C, ponieważ jest to powodem odkształcenia tarczy i utraty wymaganej wytrzymałości i plastyczności.



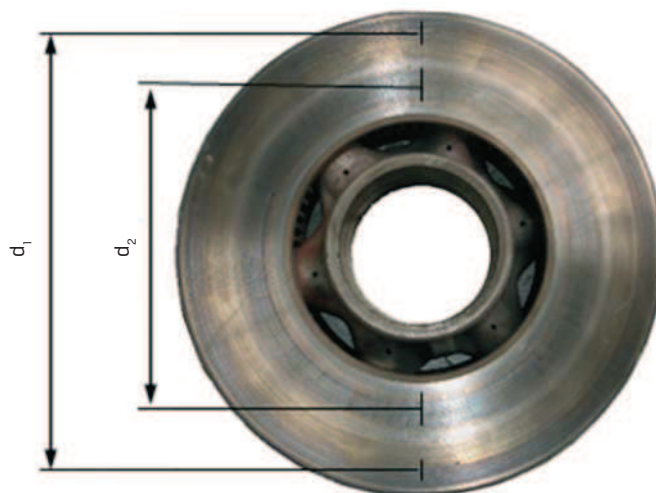
Rys. 8. Rozkład średniej temperatury tarczy hamulcowej typu 610×110.



Rys. 9. Przebieg średniego współczynnika tarcia.



Rys. 10. Przebieg czasu chłodzenia tarczy w czasie symulowanej jazdy wagonu ze stałą prędkością 120km/h (prędkość obrotowa tarczy 600obr/min).



Rys. 11. Widok tarczy po serii hamowań z zasłoniętymi łopatkami wentylacyjnymi z widocznym przegrzaniem powierzchni w postaci dwóch pierścieni o różnych średnicach.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono dwa aspekty związane z eksploatacją kolejowego hamulca tarczowego: pierwszy dotyczący energii rozpraszanej przez wentylator tarcz hamulcowych, drugi aspekt związany z wpływem ew. istniejących/nieistniejących kanałów wentylacyjnych na proces hamowania.

Przedstawiony w artykule rachunek umożliwia oszacowanie uśrednionej mocy oporu bezwładności tarczy w ruchu obrotowym. Dzięki temu możliwe jest rozgraniczenie całkowitego oporu tarczy na opór bezwładności masy tarczy w ruchu obrotowym i opór stawiany przez wentylator tarczy podczas pompowania powietrza do procesu chłodzenia tarczy.

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 4 stwierdza się, iż mimo tego samego rozmiaru tarcz (610×110), tarcza prętowa powoduje o 9% mniejszy opór bezwładności niż tarcza łopatkowa w całym zakresie prędkości obrotowej.

Największy udział oporu bezwładności masy tarczy w ruchu obrotowym występuje przy prędkości do 450 obr/min dla tarcz wentylowanych i do 600 obr/min dla tarcz pełnych. Dalszy wzrost prędkości obrotowej powoduje, że wzrastają straty na wentylatorze tarcz. Udział strat z tytułu obrotu tarczy o określonej masie względem strat całkowitych zmniejsza się od 100% do 30% dla tarczy z wentylującymi łopatkami i od 100% do 54% dla tarczy z wentylującymi prętami. W tarczach pełnych straty masowe stanowią od 90÷100% całkowitych strat w zależności od prędkości obrotowej.

Po przeprowadzeniu badań stanowiskowych [5] stwierdzono, że zasłonięcie przestrzeni łopatkowej symulujące obecność ciał obcych między łopatkami, nie ma istotnego wpływu na zmiany wartości temperatury zmierzonej w chwili zatrzymania oraz na wartość współczynnika tarcia w odniesieniu do tarczy z niezakłóconą wentylacją. Zaobserwowane zmiany temperatury oraz współczynnika tarcia mieszczą się w granicach błędów statystycznego. Brak obserwacji zmiany temperatury tarczy przy otwartej i zamkniętej przestrzeni łopatkowej może wynikać z długich czasów wymiany ciepła hamowania do otoczenia w stosunku do czasu trwania pojedynczego hamowania, co zostało opisane w [3].

Natomiast zasłonięcie przestrzeni łopatkowej wpływa znacząco na wydłużenie czasu chłodzenia tarczy po hamowaniu. Tarcza wentylowana w czasie jazdy wagonu z symulowaną prędkością 100 km/h chłodzi się o 25÷40% szybciej niż tarcza zasłonięta w zależności od prędkości początku hamowania.

Literatura

- [1] Kodeks UIC. *Hamulec – Hamulec tarczowy i jego zastosowanie. Warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych.* Wydanie 6, listopad 2006.
- [2] Rail Consult Gesellschaft für Verkehrsberatung mbH. *Wagon osobowy Z1 02, układ jezdny-tom2.* Dokumentacja Techniczno-Ruchowa.
- [3] SOROCZTEJ, M.: *Kształtowanie jakości zespołu ciernego hamulca tarczowego.* Przegląd Kolejowy 1/94.
- [4] SAWCZUK, W., *Zastosowanie płytek bimetalu w kolejowej tarczy hamulcowej z wentylującymi łopatkami.* XXVII Seminarium Kół Naukowych „Mechaników”, Warszawa 24-25 kwietnia 2008r., s. 229.
- [5] SAWCZUK, W., SZYMAŃSKI, I. M. G.: *The Research on Railway Disc Brake with Closed Ventilation Canals of the Brake Disc,* Proc of 8th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications TRANSCOM 2009, 22-24 June 2009, ss. 259-262.
- [6] SIEMENS, G.: *Auslegung und Leistungsgrenzen von Scheibenbremsen.* „ZEV-Glas. Ann”. 112 (1988), nr. 4 April, ss. 139-143.