

Wojciech SAWCZUK, Franciszek TOMASZEWSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT SILNIKÓW SPALINOWYCH I TRANSPORTU, ZAKŁAD POJAZDÓW SZYNOWYCH
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

Ocena rozkładu średniej temperatury pary ciernej tarcza hamulcowa-okładzina wraz z obsadą hamulcową w czasie hamowania ze stałą mocą

Dr inż. Wojciech SAWCZUK

Od 2010 roku adiunkt w Instytucie Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej. W swojej pracy zawodowej zajmuje się dyscypliną naukową jaką jest budowa i eksploatacja maszyn, specjalność diagnostyka maszyn. Zainteresowania naukowe w szczególności dotyczą badań wibroakustycznych układów hamulcowych pojazdów szynowych, diagnostyki silników lotniczych i badań termowizyjnych środków transportu.



e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl

Prof. dr hab. inż. Franciszek TOMASZEWSKI

W latach 2002-2012 kierownik Zakładu Pojazdów Szynowych, od 2012 dziekan Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe: badania trwałości i niezawodności pojazdów szynowych, diagnostyka wibroakustyczna silników spalinowych, badania i ocena poziomu drgań i hałasu generowanego przez pojazdy lądowe do otoczenia. Udział w realizacji licznych prac badawczych, w tym jako kierownik grantów badawczych i promotorskich KBN.



e-mail: franciszek.tomaszewski@put.poznan.pl

Streszczenie

Jednym z badań prowadzonych na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym jest pomiar temperatury tarczy dla hamulca tarczowego lub temperatury obręczy dla hamulca klockowego przy różnych symulacjach hamowań pociągu. Celem artykułu jest ocena wyników badań rozkładu średniej temperatury tarczowego układu hamulcowego, w szczególności tarcza hamulcowa-okładzina cierna wraz z obsadą hamulcową uzyskanych z pomiaru przy użyciu kamery termowizyjnej w warunkach stanowiskowych. Przeprowadzone badania termowizyjne pozwalają na ocenę zarówno jakościową jak i ilościową zmiany rozkładu średniej temperatury elementów pary ciernej hamulca spowodowaną zużyciem okładzin ciernych.

Słowa kluczowe: kolejowy hamulec tarczowy, okładzina cierna, obsada hamulcowa, rozkład średniej temperatury, badania termowizyjne.

Evaluation of the average temperature distribution of a disc brake-brake pad with caliper during braking with constant braking power

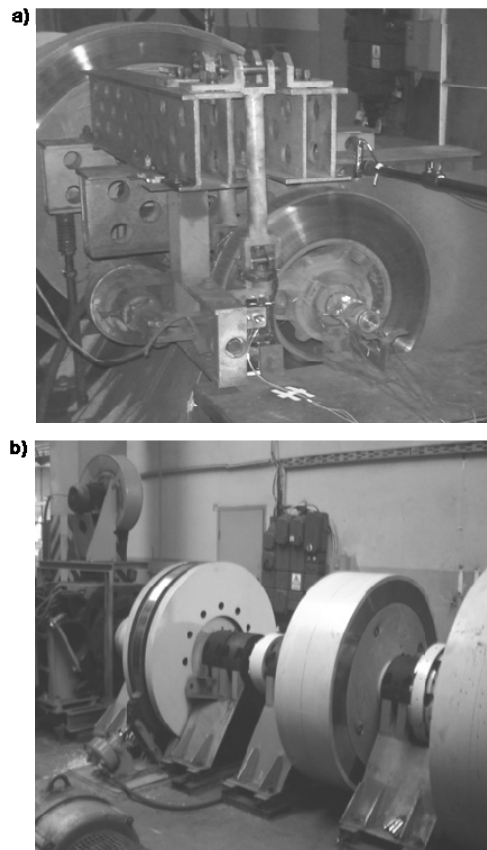
Abstract

Measurement of the disc temperature of a disc brake or the rim temperature of a block brake at various simulated train brakings is one of the tests carried out at an inertia brake station. In case of temperature tests of a railway disc brake, in accordance with the guidelines presented in [1], thermocouples installed on the friction surface of the brake disc are used. Behaviour of the average temperature is defined on the basis of six thermocouples mounted in threes on each side of the friction collar. The thermocouples on each side of the disc are placed every 120 ° on three different radii of the disc. During simulated braking tests of the disc, in accordance with a test programme provided for a railway disc brake [2], the waveforms of the average temperature of the disc as a function of the braking time are recorded. This is especially important during trials of brakings from high speeds: 200 and 300 km/h with high pressures of pads to the disc and large braking masses in case of brakings of trains with goods carriages. Then the heat load limit of the brake is checked. The purpose of this paper is to analyse the results of research on behaviour of the average temperature obtained from the measurement of the railway disc brake system, in particular the disc brake, the friction pads brake and caliper (Figs. 6 and 7) using a thermographic camera in station tests. The research show that the measurements using a thermal imaging camera can substantially extend the scope of bench research on the brake disk. It is possible to determine the temperature average increment on the components of the braking system as a result of changes in the thickness of the friction pads.

Keywords: railway disc brake, friction pad, caliper brake, distribution of average temperature, thermal research.

1. Wprowadzenie

Badania o charakterze trybologicznym kolejowych hamulców przeprowadza się na stanowisku hamulcowym bezwładnościowym. Stanowisko umożliwia prowadzenie badań kolejowego hamulca klockowego oraz hamulca tarczowego, odzwierciedlających rzeczywiste warunki, jakie występują podczas hamowania wagonu. Badania stanowiskowe na tarczowych hamulcach kolejowych, którego dotyczy artykuł, prowadzi się zgodnie z programami zawartymi w karcie UIC 541-3.



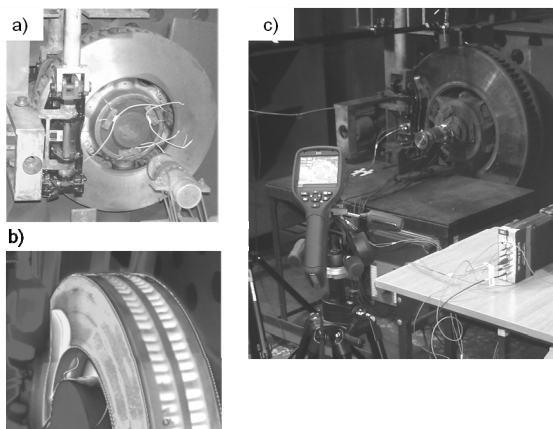
Rys. 1. Stanowisko do badań kolejowego hamulca tarczowego: a) widok tarczy hamulcowej i układu dźwigniowego hamulca, b) widok na napęd stanowiska i masy wirujące

Fig. 1. Stationary tests of the railway brake disc: a) view of the disc brake and levers set, b) view of the position and rotating mass drive

Każdy program badań odnosi się do specyficznych warunków pracy hamulca w czasie eksploatacji pojazdu. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków, jakie występują w czasie hamowania wagonów oraz biorąc pod uwagę, że tylko pociągi pociągów TLK oraz wszystkie pociągi w ruchu międzynarodowym typu Eurocity są wyposażone w wagony z tarczowym układem hamulcowym, wybrano program badawczy 2B dla pociągów osobowych kursujących z prędkością maksymalną $v=200$ km/h. W czasie stanowiskowych badań kolejowego hamulca tarczowego rejestruje się m.in. zmiany chwilowego współczynnika tarcia, na jego podstawie wyznacza się średni współczynnik tarcia poprzez całkowanie chwilowego współczynnika tarcia po drodze hamowania, ponadto przebiegi maksymalnej i średniej temperatury tarczy w funkcji czasu hamowania zarejestrowanej na podstawie 6-ciu termopar zamocowanych na pierścieniu ciernym tarczy oraz drogę hamowania i zużycie okładzin ciernych. Wszystkie próby prowadzi się na nowej parze ciernej w szczególności dla okładzin ciernych, nie wyznacza się charakterystyk tarciovych dla zużytych okładzin. W zależności od rodzaju trasy na której kursuje dany skład pociągu związany z liczbą hamowań oraz energią pojazdu do wyhamowania, w niektórych przypadkach osiągnięcie granicznego dopuszczalnego zużycia okładziny zmuszające do wymiany okładziny na nową – osiąga się w ciągu 20 dni przy przebiegu pociągu nieprzekraczającego 3500 km (na podstawie badań autora).

2. Metodyka i obiekt badań

Badaniami został objęty układ hamulca tarczowego składający się z tarczy hamulcowej o wymiarze 590×110 z wentylującymi łopatkami oraz komplet okładzin ciernych typu 175 FR20.H.2 o grubości 35, 25 i 15 mm. Do badań wykorzystano program badawczy 2B1 (II) zgodnie z załącznikiem C.2 zawartym w Kodeksie UIC 541-3. Dla wspomnianego programu przeprowadzono hamowanie ze stałą mocą hamowania wynoszącą 45 kW [2]. Jest to symulacja zjazdu pociągu ze stałą prędkością (przejazd pociągu przez przełęcz Świętego Gotarda) przy włączonym układzie hamulcowym. Prędkość zjazdu $v=80$ km/h, nacisk okładziny na tarczę $N=25$ kN, całkowity symulowany czas zjazdu pociągu $t=10$ min. Masa do wyhamowania przypadająca na jedną tarczę wyniosła w czasie badań $M=5,7$ t.

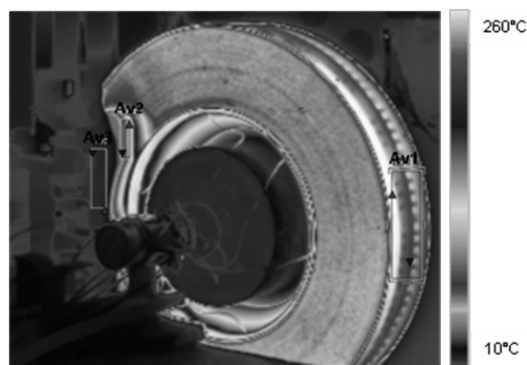


Rys. 2. Pomiar temperatury tarczowego układu hamulcowego: a) termopary zainstalowane na pierścieniu ciernym tarczy, b) obraz termowizyjny układu hamulca tarczowego, c) kamera termowizyjna FLIR E60 w czasie badań stanowiskowych

Fig. 2. Temperature measurement on the disc brake system: a) thermocouples installed on the railway disc brake, b) infrared camera FLIR E60 during stationary tests

Na stanowisku hamulcowym możliwe jest tylko wyznaczenie rozkładu średniej temperatury tarczy wykorzystując termopary. Termopary zainstalowane były na tarczy hamulcowej, po trzy na każdą stronę tarczy. Otwory pod termopary ($\varnothing 2,5$ mm) były wiercone co 120° na trzech promieniach tarczy, $r_1=1/4 \cdot r_w$, $r_2=1/2 \cdot r_w$ i $r_3=3/4 \cdot r_w$ (r_w - promień wewnętrzny tarczy), zgodnie z [1]. W otworach najbliższej średnicy zewnętrznej tarczy zainstalowano termopary o najdłuższej części roboczej (termopary TP-213K-a-300-200), na pozostałych promieniach - termopary TP-213K-a-200-200. Na drugiej stronie tarczy wykonano otwory przesunięte o 60° względem pierwszej strony w celu nie pokrywania się termopar. Równoległe z badaniami stanowiskowymi o charakterze trybologicznym przeprowadzone były badania termowizyjne w celu wyznaczenia rozkładu średniej temperatury na pozostałych elementach układu hamulcowego jak okładzina cierna i obsada hamulcowa. Do badań termowizyjnych wykorzystano kamerę termowizyjną firmy FLIR E60. Widok tarczy hamulcowej z zamocowanymi termoparami oraz wykorzystana kamera termowizyjna do badań rozkładu średniej temperatury hamulca tarczowego, przedstawia rysunek 2.

Zarejestrowane obrazy termowizyjne przy użyciu kamery FLIR E60 były analizowane w programie *FLIR Tools*. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy obraz termograficzny na podstawie którego wyznaczono rozkład średniej temperatury tarczy, okładziny ciernej i obsady hamulcowej. Rejestracja obrazów termograficznych poprzedzona była konfiguracją kamery pod względem współczynnika emisyjności, temperatury otoczenia i odbicia, odległości badanego przedmiotu i wilgotności powietrza. Ze względu na pomalowanie tarczy hamulcowej na jej grubości oraz kanałów wentylacyjnych jak i obsady hamulcowej czarną farbą żaroodporną oraz naklejenie czarnej taśmy izolacyjnej na grubości okładziny ciernej - emisyjność została ustalona na poziomie 0,97 [3].



Rys. 3. Obraz termograficzny z kamery FLIR E60 układu hamulca tarczowego wygenerowany w programie FLIR Tools, Av1,2,3 - rozkład średniej temperatury z obszaru prostokątnego odpowiednio dla tarczy hamulcowej, okładziny ciernej i obsady hamulcowej

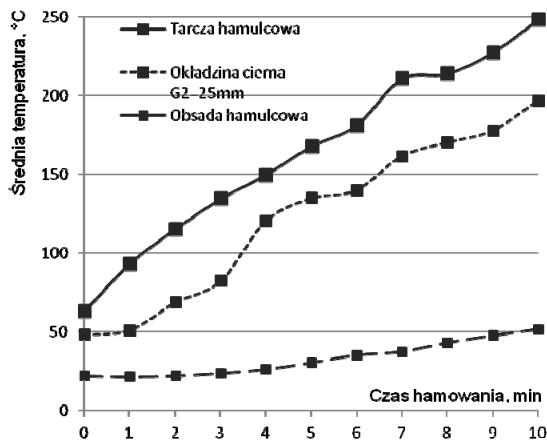
Fig. 3. Thermographs from camera FLIR E60 of the brake system generated in the FLIR Tools, Av1, 2,3 - the average temperature distribution of the rectangle area for the disc brake, the friction pad and the brake caliper, respectively

Badania zostały przeprowadzone zgodnie z zasadami eksperymentu czynnego [4]. Po przeprowadzeniu hamowania dla zadanej grubości okładziny (G1 dla grubości 35 mm, G2 dla grubości 25 mm i G3 dla grubości 15 mm), zmieniano okładzinę bez zmian pozostałych parametrów hamowania jak prędkość zjazdu pociągu, docisk okładziny do tarczy czy masa do wyhamowania i czas hamowania. Równocześnie obserwowano zmiany zachodzące w obrazach termograficznych w odstępach co 1 minutę. Każde kolejne hamowanie było poprzedzone chłodzeniem tarczy na wolnym powietrzu poprzez jej swobodny obrót, przez co symulowano jazdę wagonu z prędkością 100 km/h. Po obniżeniu temperatury tarczy do wartości 50°C (kontrolowane przez termopary

zainstalowane na tarczy hamulcowej) przerywano jej chłodzenie i rozpoczynano kolejne hamowanie.

3. Wyniki badań

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład średniej temperatury dla tarczy hamulcowej, okładziny ciernej o grubości $G2=25$ mm i dla obsady hamulcowej w czasie hamowania ze stałą mocą trwającego 10 minut.

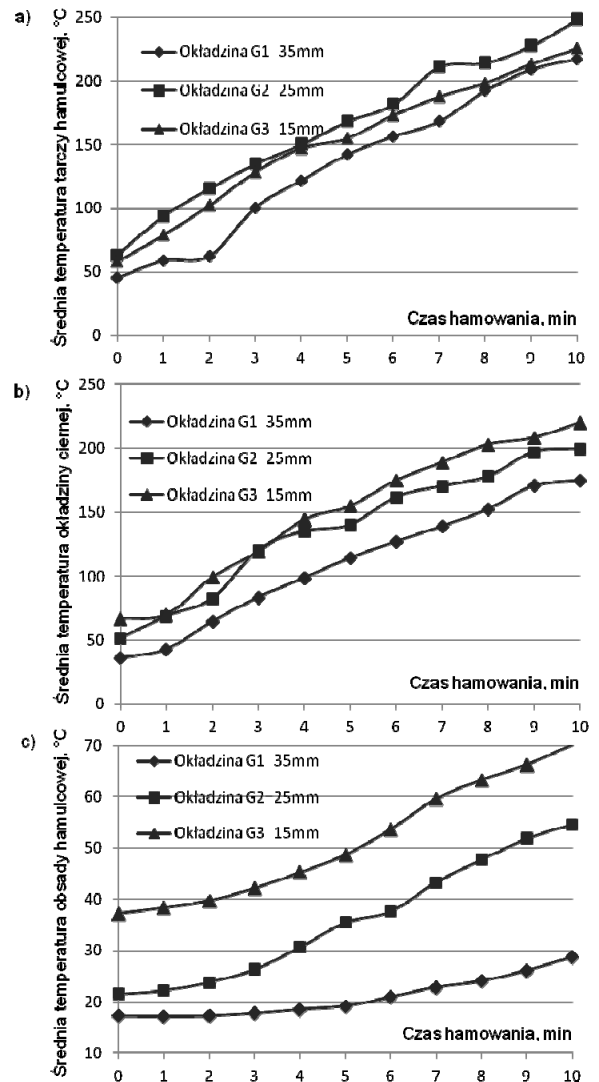


Rys. 4. Rozkłady średniej temperatury tarczy hamulcowej, okładziny czarnej $G2=25$ mm oraz obsady hamulcowej w zależności od czasu hamowania

Fig. 4. The average temperature of the disc brake of type 590×110, the friction pads $G2 = 25$ mm and the brake caliper vs. the braking time

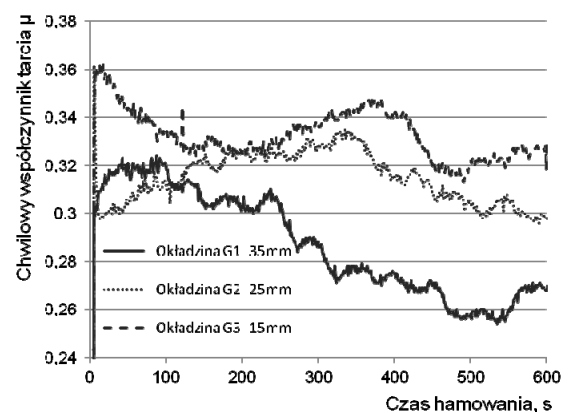
Na rysunku 5 przedstawiono rozkłady średniej temperatury analizowanych elementów pary czarnej kolejowego hamulca tarczowego w zależności od grubości okładzin ciernych. Na tej podstawie stwierdza się, że zmiana grubości okładzin wynikająca z ich zużycia nie wpływa istotnie na zmianę temperatury tarczy w czasie hamowania (pomiar kamerą termowizyjną), mimo, że pomiary przy użyciu termopar zainstalowanych na pierścieniu ciernym wykazał wpływ zmniejszenia grubości okładzin na obniżenie temperatury tarczy zarówno podczas hamowań ze stałą mocą jak i zatrzymujących. Natomiast ma wpływ na przyrost temperatury okładzin dopiero po 4-jej minucie hamowania ze stałą mocą. W przypadku obsady hamulcowej stwierdza się, że hamowania na okładzinach zużytych zarówno do grubości 25 jak i 15 mm wpływa istotnie na przyrost jej temperatury. Jednak należy zwrócić uwagę, że na wartość maksymalnej temperatury obsady hamulcowej ma wpływ temperatura początku hamowania, co w przypadku hamowania z okładziną $G3=15$ mm była to wartość wyższa względem pozostałych przypadków o 15 °C. Również stwierdzono to w przypadku samych okładzin, gdzie temperatura przed hamowaniem nie była stała. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w [2] temperatura tarczy przed kolejnym hamowaniem powinna wynieść 50 °C, na podstawie badań z zastosowaniem kamery termowizyjnej - temperatura wyniosła odpowiednio 45, 60 i 58 °C dla okładziny $G1$, $G2$ i $G3$. Dla okładzin ciernych temperatura początku hamowania wyniosła odpowiednio 36, 51 i 66 °C. Na tej podstawie można stwierdzić, że stałe warunki początku hamowania dla tarczy hamulcowej nie przekładają się na stały stan cieplny związany z okładzinami jak i obsadą hamulcową co może mieć wpływ na zmiany współczynnika tarcia między tarczą a okładziną cierną.

Na rysunku 6 przedstawiono przebieg chwilowego współczynnika tarcia uzyskanego z hamowania ze stałą mocą dla trzech grubości okładzin.



Rys. 5. Rozkłady średniej temperatury elementów pary czarnej hamulca tarczowego w zależności od grubości okładzin ciernych: a) dla tarczy hamulcowej, b) dla okładziny czarnej, c) dla obsady hamulcowej

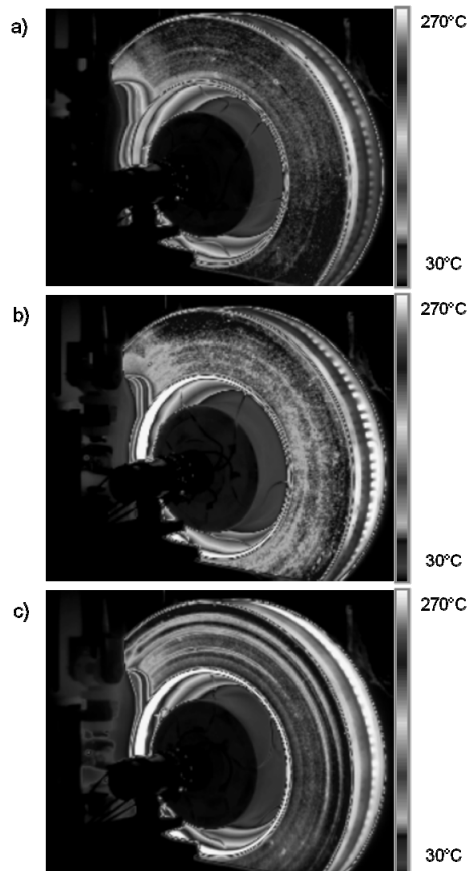
Fig. 5. The average temperature distributions of the brake friction pairs vs. the thickness of the friction pads: a) for disc brake, b) for friction pads, c) for the brake caliper



Rys. 6. Przebieg chwilowego współczynnika tarcia w zależności od czasu hamowania i grubości okładzin

Fig. 6. The average friction coefficient vs. the braking time and the thickness of friction pads

Natomiast na rysunku 7 przedstawiono trzy termogramy z chwili zatrzymania po 10 minutach hamowania ze stałą mocą dla rozpatrywanych grubości okładzin. W celu zaobserwowania zmian w rozkładzie temperatury w szczególności dla obsady hamulcowej, rozpiętość (span) został ustawiony w kamerze na 30 i 270 °C.



Rys. 7. Obraz termograficzny rozkładu średniej temperatury elementów pary ciernej hamulca tarczowego po 10 minutach hamowania ze stałą mocą: a) dla okładziny G1=35 mm, b) dla okładziny G2=25 mm, c) dla okładziny G3=15 mm

Fig. 7. Thermographs of the average temperature distributions of the brake friction pairs after 10 minutes of braking with constant braking power: a) for thickness of friction pads G1=35 mm, b) for thickness of friction pads G2=25 mm, c) for thickness of friction pads G3=15 mm

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania stanowiskowe w połączeniu z badaniami termowizyjnymi na stanowisku hamulcowym kolejowego hamulca tarczowego wykazały, że użycie kamery zwiększa zakres możliwych pomiarów temperaturowych hamulca. Zamocowanie termopar na tarczy hamulcowej tylko pozwala na wyznaczenie rozkładu średniej temperatury z pierścienia ciernego. Kamera termowizyjna dodatkowo zwiększa ten zakres możliwości o pomiary temperatury na pozostałych elementach układu hamulcowego, w szczególności dla okładziny ciernej i obsady hamulcowej dociskającej okładzinę za pośrednictwem dźwigni oczkowych do tarczy hamulcowej. Po przeprowadzeniu badań termowizyjnych sformułowano dodatkowe następujące wnioski:

1. Zmiana grubości okładzin związana z ich zużyciem wpływa na zwiększenie intensywności strumienia ciepła rozchodzącego się na dalsze elementy znajdujące się za okładziną. Tym samym

wpływa na podwyższenie temperatury samych okładzin i obsad hamulcowych.

2. W przypadku hamowań ze stałą mocą (symulacja zjazdu pociągu przez przełęcz Świętego Gotarda), cieńsze okładziny polepszają przepływ ciepła powstałego w parze ciernej poprzez przewodzenie z okładziny na obsadę hamulcową i dalej przez konwekcję i promieniowanie do otoczenia lub elementy w dalszym sąsiedztwie co skutkuje wyższym przebiegiem chwilowego współczynnika tarcia w całym 10-ciu minutowym czasie hamowania. W dalszych pracach planuje się sprawdzenie, czy również to stwierdzenie przełoży się na hamowania zatrzymujące, gdzie w krótkim czasie około jednej minuty w zależności od prędkości początku hamowania - okładzina przejmuje część energii hamowania.
3. Założenie stałej temperatury tarczy przed każdym hamowaniem zgodnie z [2] nie zawsze wpływa na stałe warunki temperaturowe okładzin, gdzie w zależności od grubości okładziny zmienia się czas ich chłodzenie przed kolejnym hamowaniem a tym samym może mieć wpływ na zmiany chwilowego współczynnika tarcia między tarczą a okładziną cierną.
4. Ze względu na charakter pomiaru przy zastosowaniu kamery termowizyjnej (pomiar pośredni temperatury) a pomiar z zastosowaniem termopar zainstalowanych na pierścieniu ciernym tarczy (pomiar bezpośredni) – nie jest możliwe uzyskanie tych samych wartości temperatur na tarczy hamulcowej. Również ma na to wpływ inne ograniczenie po stronie kamery jakim jest w przypadku tarczy hamulcowej trudność pomiaru temperatury z powierzchni ciernej tj. z powierzchni wyszlifowanej cechującej się dużą refleksyjnością [5]. Stąd konieczność pomiaru w innych miejscach tarczy jak np. pomiar temperatury z grubości tarczy hamulcowej czy z wewnętrznych kanałów wentylacyjnych.
5. W celu dokładnego określenia temperatury tarczy np. w chwili zatrzymania z powierzchni tarcia, konieczne jest wyznaczenie współczynników korekcyjnych które dodawane byłyby do wartości temperatur uzyskanych z innych powierzchni tarczy.

Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr N N504 644840.

5. Literatura

- [1] Polska Norma PN-EN 14535-1, Kolejnictwo – tarcze hamulcowe kolejowych pojazdów szynowych – Część 1: Tarcze hamulcowe włączane lub mocowane skurczowo na osiach zestawów tocznych lub napędnych, wymiary i wymagania dotyczące jakości, Warszawa 2006.
- [2] Karta UIC 541-3, Hamulec: hamulec tarczowy i okładziny hamulcowe, warunki ogólne dla prób na stanowisku badawczym. Wydanie 6-te listopad 2006.
- [3] FLIR Exx series, Instrukcja obsługi, November 7, 2011, Corporate Headquarters Flir System.
- [4] Rafajłowicz E.: Optymalizacja Eksperymentu z Zastosowaniami w Monitorowaniu Jakością Produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [5] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczterwieni podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.

otrzymano / received: 11.06.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2013

artykuł recenzowany / revised paper