

Tadeusz PIĄTKOWSKI¹, Henryk POLAKOWSKI¹, Jerzy JACHIMOWICZ²

¹ WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

² WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Termograficzne pomiary okładzin ciernych hamulców

Dr inż. Tadeusz PIĄTKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej (1981) i Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1984). Od 1995 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 roku. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się zdalnymi pomiarami temperatury, projektowaniem układów optycznych i elektronicznych oraz systemów mikroprocesorowych. Jest autorem i współautorem ponad 40 publikacji.

e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl



Dr inż. Henryk POLAKOWSKI

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1976). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1987 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 100 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.

e-mail: hpolakowski@wat.edu.pl



Dr inż. Jerzy JACHIMOWICZ

Ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej w 1971 r. Stopień naukowy doktora nauk z zakresu mechaniki uzyskał w 1995 r. Obecnie pracuje w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej. Główną dziedziną zainteresowań zawodowych jest problematyka lotnicza. W swoim dorobku posiada ponad 170 publikacji naukowych oraz ponad 100 opracowań technicznych w tym wiele wdrożeń.

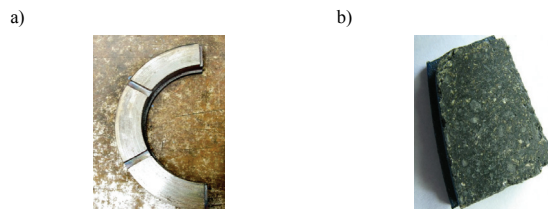
e-mail: jjachimowicz@wat.edu.pl



1. Wstęp

Cykl hamowania od prędkości nominalnej do zerowej trwa około 5s do 15 s. W tym czasie energia kinetyczna pojazdu wydzielona się w postaci ciepła w hamulcu [1]. Ciepło wydzielone na powierzchni roboczej hamulca powoduje powstanie udaru cieplnego skierowanego w głąb elementów pary ciernej [1]. Kluczowym zagadnieniem jest zmierzenie wartości temperatur średnich oraz maksymalnych obejmujących małe obszary obiektu. Dotyczy to takich obszarów gdzie występują szczególnie wysokie temperatury. Wynikają one z niedoskonałości stanu powierzchni, które mogą być związane z błędami kształtu powierzchni oraz z jej strukturą geometryczną. Struktura geometryczna powierzchni obejmuje chropowatość, falistość i wady powierzchni. Zjawiska termiczne w parze tarcza hamulcowa-klocki hamulcowe jest szczególnie istotna w pojazdach specjalnych zarówno cywilnych jak i wojskowych – opancerzonych. Ich znaczna masa wymusza większe siły hamowania. Wraz ze wzrostem obciążenia o kierunku normalnym do powierzchni styku, na skutek odkształceń plastycznych w obszarze kontaktu, następuje wzrost rzeczywistej powierzchni styku, aż do uzyskania wartości maksymalnej dla danej pary trącej [2]. Prowadzi to do wydzielania się znacznej ilości ciepła. Jednocześnie podczas eksploatacji w ekstremalnych warunkach np. w górach przy częstym hamowaniu może prowadzić do przegrzania i w skrajnych przypadkach do zniszczenia układu hamulcowego [3].

W celu opracowania nowej generacji hamulców przeprowadzono badania laboratoryjne par hamujących: tarcza hamulcowa-okładzina cierna. Badania przeprowadzono dla dwóch różnych materiałów okładzin: kompozytów C/C oraz 500/EBC. Kompozyt C/C przeznaczony jest do hamulców lotniczych, a materiał z serii 500/EBC do hamulców pojazdów terenowych. Fotografie pary ciernej zamieszczono na rys. 1.



Rys. 1. Para cierna a) fragment tarczy hamulcowej, b) kłoczek hamulcowy
Fig. 1. Brake elements a) part of brake disc, b) pad lining

W badanym modelu hamulec składał się z jednej tarczy oraz 6 klocków hamulcowych.

2. Stanowisko pomiarowe

Badania hamulców wykonano na stanowisku badawczym IL – 68 w Instytucie Lotnictwa. Stanowisko to umożliwia odtworzenie

Streszczenie

Opracowanie nowej generacji hamulców wymaga wykonania pomiarów rozkładów temperatury na powierzchniach jego elementów konstrukcyjnych. W pracy przedstawiono wybrane wyniki takich badań metodami termograficznymi. W rezultacie tych badań określono obszary o podwyższonej temperaturze, temperaturę maksymalną oraz szybkość zmian temperatury. Porównano otrzymane wyniki z pomiarami metodą stykową. Dane otrzymane w wyniku analizy termogramów pozwolą na weryfikację modelu numerycznego hamulca.

Słowa kluczowe: tarcie, parametry cieplne, termografia, emisyjność.

Thermographics measurements of brake pad lining

Abstract

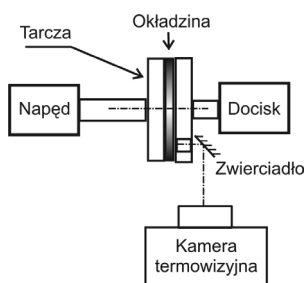
Braking process has rather short duration (5s-15s) and during that time the kinetic energy of a vehicle is transformed into heat. Such amount of heat generates thermal shock to braking pads and discs. Development of a new type of brakes requires measuring temperature distributions on their working surfaces. The paper presents some selected results of such measurements performed on a modified IL-68 test rig by means of thermal imaging (Fig. 2). Two types of composite braking pad materials were tested: C/C and 500/EBC. C/C composite is used for aircraft brakes, whereas 500/EBC type is used for brakes of all-terrain ground vehicles. Due to high dynamics of the thermal signal, the measurements were taken in the range from 200°C to 750°C. The data from the thermal images were processed using IR Control software. As a result there were identified the high temperature areas (hot spots), maximum temperature values for each recorded frame and the rate of temperature changes during braking (Fig. 5) as well as cooling down (Fig. 6) phases. The frame-by-frame analysis of the recorded thermal image sequences made it possible to correlate the temperature distribution non-uniformity with structural defects of the tested brake pads. The results of temperature measurements were compared with those obtained from the contact method (Fig. 7). On that basis, the errors of non-contact temperature measurements were estimated. The analysis of the recorded thermal images allowed calculating several thermal parameters, such as thermal time constants of particular brake elements (1), (2). Those data were used to verify the numerical model of the brake. They also can be the guidelines to optimise the brake design with respect to heat transfer aspects.

Keywords: friction, thermal parameters, thermography, emissivity.

zjawisk na powierzchni tarcia badanych próbek oraz pomiar szeregu parametrów charakteryzujących warunki pracy hamulca takich jak maksymalną moc wydzielającą się na jednostce powierzchni tarcia, pracę wykonaną na jednostce powierzchni tarcia, prędkość poślizgu oraz maksymalną temperaturę objętościową pary cieiernej. Parametry te pozwalają na modelowanie zjawisk fizycznych, jakie zachodzą w hamulcach w momencie hamowania pojazdu. Możliwe jest także modelowanie uderu cieiernego.

Stanowisko umożliwia przebadanie par cieiernych bez potrzeby budowania pełnowymiarowych prototypów kompletnych hamulców. Odpowiednio dobierając geometrię badanych próbek możliwe jest na stosunkowo małych obiektach zasymulowanie parametrów pracy docelowego hamulca. Zmienna prędkość obrotowa wału stanowiska w zakresie 0÷9000 obr/min pozwala symulować prędkość przeslizgu liniowego w parze cieiernej. Moment bezwładności mas wirujących symulujący energię rozproszenia podobną do energii wydzielanej w parze cieiernej w docelowym hamulcu ustalany jest w granicach $0,154 \div 1,54 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ co $0,098 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Dodatkowo regulowana jest siła docisku pary cieiernej w zakresie $0 \div 5,88 \text{ kN}$. Na stanowisku realizowany jest pomiar momentu bezwładności, siły docisku, temperatur mierzonych metodą stykową i prędkości obrotowej. Uzupełnieniem tych pomiarów są pomiary rozkładów temperatury przy użyciu kamer termowizyjnych.

Badania termowizyjne hamulców wykonano na stanowisku *IL-68* w układzie pomiarowym, którego schemat zamieszczono na rys. 2. W układzie pomiarowym wirującym elementem jest tarcza hamulca, która jest hamowana przez nieruchome, dociskane z zadaną siłą normalną klocki hamulcowe. Na potrzeby pomiarów termowizyjnych wykonano w obejmie okładziny hamulcowej dodatkowy otwór pokazany na rys. 2 tak, aby możliwy był pomiar temperatury tarczy hamulca w czasie hamowania. Ze względu na duże prędkości obrotowe a tym samym szybkie zmiany pola temperatur do badań użyto kamery termowizyjnej *ThermaCAM SC6000* firmy *FLIR* umożliwiającej zapis danych z prędkością do 1000 okien pomiarowych zwierających wybrane fragmenty ramki na sekundę. Ograniczenie liczby danych - pola pomiarowego wynika z maksymalnej szybkości transferu danych w trybie *Fast Speed* zastosowanej kamery.

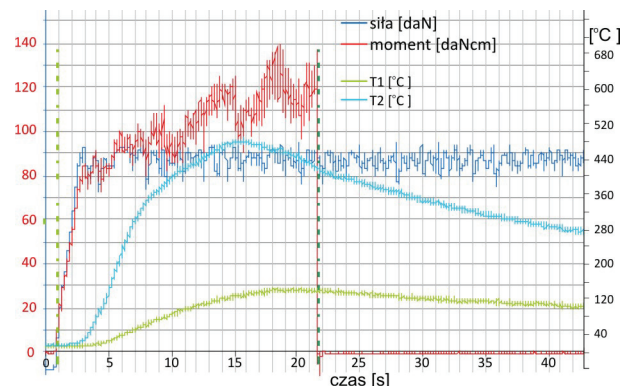


Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 2. Experimental set-up

Ograniczenie to, w przypadku pomiaru temperatury tarczy hamulcowej w danym układzie pomiarowym, nie jest krytyczne ponieważ pole pomiarowe i tak jest ograniczone wymiarami otworu obserwacyjnego. Jego wielkość jest mniejsza niż zastosowane okno z danymi. Zwierciadło łamiące oś optyczną termowizyjnego układu pomiarowego umożliwiała obserwację powierzchni tarczy hamulcowej przez okno w obejmie oraz zapewniało ochronę obiektywu kamery termowizyjnej przed produktami ścierania klocków i tarczy hamulcowej. Ze względu na dużą dynamikę zmian sygnału pomiary były przeprowadzane w zakresie temperatur od $200 \text{ }^\circ\text{C}$ do $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Powodowało to, że w początkowej fazie, przy starcie hamowania oraz na samym końcu schładzania zespołu hamulca dane z kamery podczerwieni nie były dostępne.

Cykl hamowania polegał na rozpędzeniu tarczy hamulca do prędkości obrotowej (maksymalnie) 6000 obr./min a następnie docięnięciu okładzin cieiernych. Fragment znormalizowanego protokołu zawierający mierzone parametry mechaniczne oraz pomiary stykowe temperatury dwóch wybranych klocków hamulcowych

$T1$ oraz $T2$, podczas przykładowego cyklu hamowania zostały przedstawione na rys. 3.

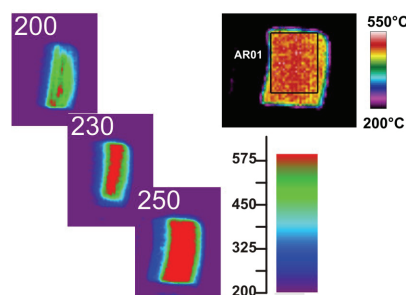


Rys. 3. Fragment znormalizowanego protokołu pomiarowego
Fig. 3. Part of testing report

Ze względu na pomiary termograficzne istotne są wykresy zmian temperatury $T1$, $T2$ obu klocków hamulcowych. Temperatury te mierzone są metodą stykową (klocki są nieruchome) za pomocą termopar typu *K*. Złącza pomiarowe termopar płaszczowych o średnicy $0,5 \text{ mm}$, wklejono w otwory umieszczone około $1,5 \text{ mm}$ pod powierzchnią trącą. Wartości tych temperatur pozwolą ocenić temperaturę powierzchni klocków jak i powierzchni tarczy hamulcowej zmierzonej metodą termograficzną.

3. Przetwarzanie termogramów

W celu wyznaczenia przebiegów czasowych zmian temperatury w wybranych obszarach badanych elementów oraz określenia wybranych parametrów termodynamicznych przeprowadzono analizę termogramów zapisanych na dysku twardym komputera w trybie off-line. Przykładową sekwencję termogramów zamieszczono na rys. 4.

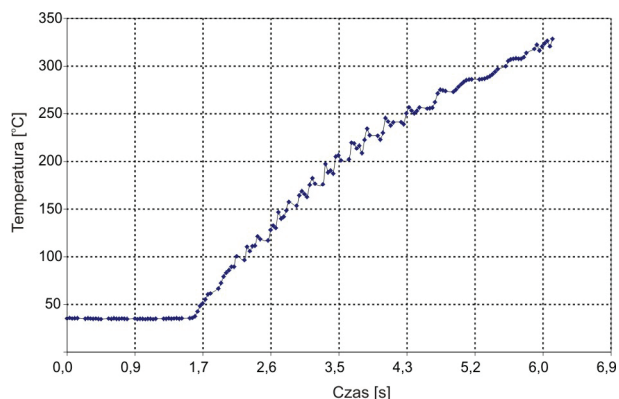


Rys. 4. Przykładowe termogramy tarczy hamulcowej
Fig. 4. Thermal images of a brake disc

Są to termogramy numer 200, 230 i 250. Termogram numer 200 przyjęto za początek cyklu hamowania. Wyodrębnienie właściwych informacji z tak dużej liczby danych wymaga wielostopniowej obróbki danych.

Dane z termogramów były przetwarzane wstępnie za pomocą specjalizowanego oprogramowania *IR Control*. Oprogramowanie to pozwala na szereg operacji takich jak określenie punktów czy obszarów, z których dane są pobierane z zapisanych sekwencji obrazów termowizyjnych. Przykładowe zaznaczenie obszaru analizy zamieszczono na rys. 4 w prawym górnym rogu. Dane z tych obszarów tarczy hamulcowej następnie mogą być zapisane w jednym z formatów akceptowanych przez inne programy. Przy określaniu obszarów do dalszej analizy szczególną uwagę zwrócono na nierównomierność rozkładów temperatury na powierzchni okładzin. Analiza rozkładu temperatury, ramka po ramce termogramu, pozwoliła na skorelowanie nierównomierności rozkładu temperatury z defektami powierzchni okładzin. Analizy te wykonano w programach matematycznych *MathCad* i *Matlab*. Na

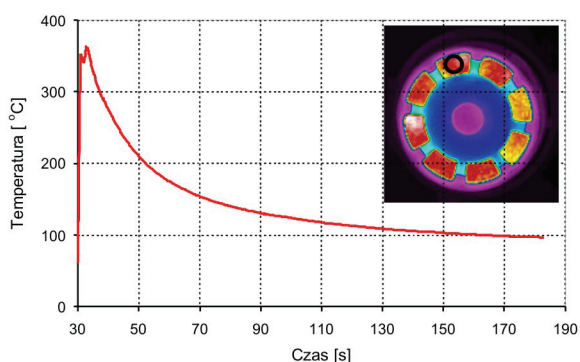
rys. 5 zamieszczono przykładowy przebieg zmian temperatury średniej w obszarze okna obserwacyjnego dla jednego cyklu hamowania.



Rys. 5. Narastanie temperatury w czasie hamowania
Fig. 5. Temperature changes during braking phase

Z zapisu w funkcji czasu widać, że cykl hamowania rozpoczął się ok. 1,5 s od początku rejestracji i trwał 4,7 s. W tym czasie temperatura średnia osiągnęła prawie 340 °C. Jednocześnie widoczne zafalowanie w początkowym stadium hamowania ($t > 2,1$ s) wskazują na obecność lokalnych obszarów o podwyższonej temperaturze. Jak widać z wycinka termogramu przedstawionego na rys. 4 temperatura ta przekracza 510 °C. Informacja ta jest istotna ze względu na charakter zmian temperatury jak i jej lokalny rozkład.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest sposób oddawania ciepła wydzielonego w hamulcu do elementów konstrukcyjnych całego węzła mechanicznego. Jednym z głównych parametrów opisujących to zjawisko jest stała czasowa schładzania tarczy hamulcowej. Przebieg zmian temperatury tarczy hamulcowej w czasie zamieszczono na rys. 6. Okręgiem zaznaczono obszar na środkowym klocku hamulcowym, z którego były uśredniane dane.



Rys. 6. Zmiany temperatury tarczy hamulcowej w fazie schładzania
Fig. 6. Brake disc temperature during cooling phase

Z przebiegu wynika, że po szybkim wzroście temperatury w czasie hamowania następuje stosunkowo szybkie schłodzenie hamulca do temperatury 383 °C a następnie powolne obniżanie się temperatury do temperatury otoczenia. Termiczna stała czasowa schładzania wynika z uwzględnienia wielu stałych czasowych poszczególnych elementów konstrukcyjnych. W początkowym zakresie można ją przybliżyć jednym parametrem, który w przypadku stanowiska modelowego wynosi:

$$\tau_1 \leq (11,8 \pm 0,1) \text{ s} . \quad (1)$$

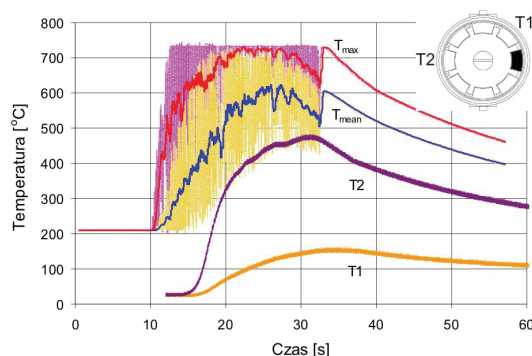
Końcowe schładzanie następuje ze znacznie dłuższą stałą czasową, która wynosi:

$$\tau_1 \leq (52,1 \pm 0,1) \text{ s} . \quad (2)$$

Otrzymane wartości stałych czasowych wskazują, że konstrukcja stanowiska pomiarowego nie nadaje się do implementacji w pojeździe. Częste hamowanie spowoduje przegrzanie się takiego hamulca. Wprowadzenie otrzymanych wartości stałych czasowych do cyfrowego modelu hamulca pozwoli określić temperaturę całego węzła mechanicznego dla wybranej konstrukcji hamulca.

Pomiary termograficzne porównano z pomiarami stykowymi. Ze względu na małą szybkość działania termopar do eksperymentu wybrano mniejszy nacisk niż w przypadku pomiaru przedstawionego na rys. 6. Dzięki temu wydłużył się czas hamowania a tym samym zmalała szybkość zmian temperatury w parze trącej tarcza hamulcowa-klocki hamulcowe. Wykres zawierający zarówno temperatury mierzone metodami bezstykowymi jak i za pomocą termopar typu K zamieszczono na rys. 7.

Przebiegi zapisów termograficznych w początkowym okresie do chwili zatrzymania są silnie zaszumione. Jest to wynikiem silnych zakłóceń elektrycznych związanych z działaniem układów mocy wymuszających obrót zespołu z tarczą hamulcową. Dla tego zakresu czasów dodatkowo uśredniono przebiegi. Zamieszczone przebiegi dotyczą zmian w czasie temperatury maksymalnej T_{max} , temperatury średniej T_{mean} (otrzymanych z analizy termogramów) oraz temperatur z termopar $T1$ i $T2$. Na rys. zaznaczono również położenie termopar oraz pomocniczego otworu pomiarowego - obszar zacerniony.



Rys. 7. Temperatury hamulca mierzone różnymi metodami
Fig. 7. Brake temperatures measured by different methods

Na podstawie takich przebiegów można wyznaczyć szybkość narastania temperatury, oraz ich maksymalne wartości [4]. Ponadto po zakończeniu hamowania określono stałe czasowe schładzania. Jest to parametr krytyczny, pozwalający optymalnie zaprojektować hamulec. Temperatury wyznaczone różnymi metodami mają podobne przebiegi czasowe. Różnice między pomiarami stykowymi a termograficznymi są prawie stałe. Wynikają one ze sposobu umieszczenia termopar oraz właściwości materiału okładzin ciernych. Jest to materiał kompozytowy w związku z czym minimalna odległość od brzegu nie może być zbyt mała i w przypadku termopary 1 wynosiła 1,5 mm. Jednocześnie rozrzut położenia otworu względem brzegu oraz jego przebieg znacząco się różnią dla poszczególnych termopar. Jest to jedna z przyczyn różnic temperatur między poszczególnymi klockami.

Mając na względzie występujące źródła błędów pomiarów termowizyjnych występujące w czasie procesu hamowania dodatkowo wykonano pomiary temperatury za pomocą pirometrów [5]. Dla poprawy dokładności pomiarów termoparami uwzględniono spadek temperatury na materiale od powierzchni klocka hamulcowego do powierzchni termopary. W tym celu wykonano pomiary przewodności cieplnej okładzin ciernych z użyciem termopar różnicowych. Dzięki uzyskanym wynikom można oszacować maksymalną różnicę pomiaru temperatury metodą bezstykową w odniesieniu do pomiarów termoparami (rys. 7 przebiegi $T1$ i $T2$).

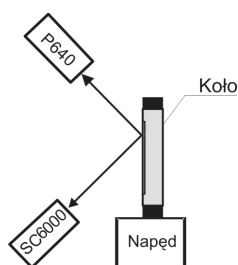
W przeprowadzonych seriach pomiarowych z uwzględnieniem spadku temperatury na materiale klocków od brzegu do płaszcza termopary różnica ta jest nie większa niż:

$$\delta T \leq 10^{\circ} \text{C} . \quad (3)$$

Oznacza to dobrą zgodność pomiarów termograficznych ze stykowymi. Jest to istotne ponieważ rozkład temperatur na powierzchni tarczy hamulcowej jest możliwy do uzyskania tylko taką metodą pomiarową. Możliwe jest również śledzenie procesu hamowania przez obserwację punktów (obszarów) o szczególnie wysokich temperaturach. Obszary te związane są z nierównomiernością geometryczną tarczy oraz względnym położeniem płaszczyzn tarczy i klocków hamulcowych [6].

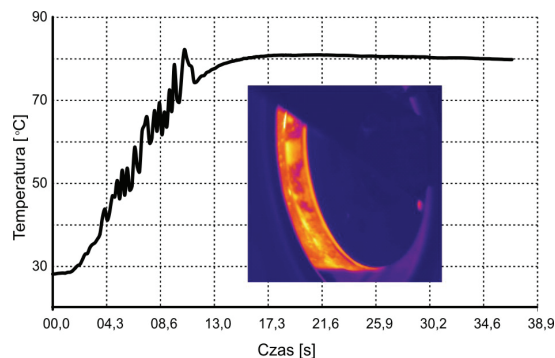
Na podstawie pomiarów elementów hamulca na stanowisku IL-68 zaprojektowano i wykonano hamulec o podwyższonej odporności na pracę w warunkach trudnych i o podwyższonej skuteczności w przypadku pojazdów specjalnych. Hamulec ten został zabudowany do koła a następnie przebadany na stanowisku testowym. Przeprowadzono również pomiary termowizyjne wewnętrznej części koła związanej konstrukcyjnie z hamulcem. Schemat stanowiska zamieszczono na rys. 8.

Pomiary termowizyjne wykonano dwoma kamerami. Zastosowano dwie kamery ponieważ zakres dynamiczny kamery SC6000 był zbyt mały w porównaniu do występujących temperatur. Kamera ta mierzyła w zakresie od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ z rozdzielczością poniżej $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Rys. 8. Hamulec zabudowany w kole - schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 8. Experimental set-up for brake system

Drugą kamerą była kamera P640 firmy FLIR. Jest to kamera z detektorem wykonanym na bazie tellurku kadmowo rtęciowego (HgCdTe) o rozszerzonym zakresie pomiarowym do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ z rozdzielczością temperaturową $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kamery zostały tak ustawione, że pole widzenia pierwszej z nich obejmowało zewnętrzną ścianę bębna hamulcowego gdzie występują niższe temperatury ale dokładność ich pomiaru jest istotna. Natomiast pole widzenia drugiej kamery obejmowało fragment konstrukcji podgrzewanej przez powietrze chłodzące wewnętrzną stronę bębna hamulcowego oraz klocki. Temperatury w tej części hamulca są wyższe. Jednocześnie dokładność ich pomiaru oraz szybkość pobierania danych mogą być niższe. Warunki takie zapewnia wybrana kamera P640, która jest wolniejsza od SC6000. Przy maksymalnej szybkości akwizycji, rejestruje dane na szybkiej pamięci wewnętrznej z szybkością do 30 obrazów na sekundę.



Rys. 9. Temperatura i termogram zewnętrznej części bębna hamulcowego
Fig. 9. Temperature and outer brake surface thermal image

Na rys. 9 zamieszczono krzywe zmian temperatury średniej. W trakcie hamowania temperatura ta jest prawie stała. Co więcej temperatura ta utrzymuje się nawet po zatrzymaniu koła (20 s). Nale-

ży przy tym zwrócić uwagę, że temperatura ta jest stosunkowo wysoka jak na typowe temperatury pracy konstrukcji mechanicznych.

Pomiary wykonane standardową kamerą z szybkością akwizycji danych wynoszącą 30 klatek (obrazów) na sekundę pozwoliły zmierzyć maksymalną temperaturę występującą w kole podczas hamowania. Ze względu na stosunkowo wolną akwizycję danych dla tej kamery, występuje dodatkowe uśrednianie danych. Uśrednienie to wynika z przesunięcia się obserwowanego fragmentu konstrukcji w czasie pobierania jednego obrazu. Ze względu na zmianę prędkości obrotowej w trakcie hamowania obszar, z którego następuje uśrednianie zmienia się.

Z wcześniejszych pomiarów wykonywanych za pomocą metod stykowych oszacowano tę temperaturę na nieco ponad $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, podczas gdy otrzymana za pomocą kamery termowizyjnej wynosi $660\text{ }^{\circ}\text{C}$. Są co najmniej dwie przyczyny tych rozbieżności. Pierwszą jest czas potrzeby przy pomiarach bezkontaktowych od zatrzymania koła do wykonania pomiaru. Jak wspomniano wcześniej w pierwszym etapie po zatrzymaniu następuje szybkie schłodzenie konstrukcji. Drugą przyczyną jest ustawienie emisyjności ze znacznym błędem. Emisyjność w czasie tego testu była ustawiona na podstawie wskazań temperatury mierzonej stykowo. Przed rozpoczęciem badań na kamerze termowizyjnej ustawiono taką emisyjność aby uzyskać temperaturę radiacyjną równą temperaturze mierzonej stykowo. Metoda ta nie uwzględnia zmian emisyjności wraz ze zmianą temperatury mierzonego obiektu. W celu dokładniejszego określenia zarówno miejsc akumulujących oraz oddających ciepło w danej konstrukcji potrzebne są specjalnie przygotowane testy pomiarowe.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania pokazały, że pomiary termowizyjne są odpowiednią techniką pomiarową w przypadku śledzenia zmian temperatury o dużej dynamice występujących w czasie hamowania. Jednocześnie jest to jedyna technika pomiarowa pozwalająca mierzyć rozkład powierzchniowy temperatury w czasie procesu hamowania.

Możliwa jest lokalizacja oraz pomiar temperatury w obszarach szczególnie gorących (hot spot). Na podstawie porównania z pomiarami stykowymi temperatury otrzymane na podstawie analizy termogramów poprawnie pokazują uśrednione rozkłady temperatur.

Analiza danych z termogramów pozwala określić wybrane parametry cieplne jak np. stałe czasowe poszczególnych elementów konstrukcji.

Otrzymane wyniki mogą być użyte do modelowania numerycznego zespołu hamulca. Jednocześnie mogą służyć jako bezpośrednie wskazówki konstrukcyjne pozwalające zoptymalizować budowę węzła hamulca ze względu na wymianę ciepła.

5. Literatura

- [1] Uetz H., Föhl J.: Wear as an energy transformation process, *Wear*, vol. 100, pp. 253-264, 1978.
- [2] Kenedy F. E.: Thermal and thermomechanical effects in dry sliding, *Wear*, pp. 453-476, 1984.
- [3] Suii N.P., Sin H.C.: The genesis of friction. *Wear*, 96, pp. 91-114, 1981.
- [4] Piątkowski T., Polakowski H., Hots N.: Examination of metallic surfaces for IR gray body sources, QIRT2008, materiały konferencyjne, pp 185-190, 2008.
- [5] Madura H., Kastek M., Piątkowski T.: Automatic compensation of emissivity in three-wavelength pyrometers, *Infrared Physics & Technology*, vol. 51, pp.1-8, 2007.
- [6] Siroux M., S. Harmand S., Desemet B.: Experimental study using infrared thermography on the convective heat transfer of a TGV brake disc in the actual environment, *Optical Engineering*, vol. 41, No 7, p. 1558-1564, 2002.