

Tadeusz PIĄTKOWSKI¹, **Henryk POLAKOWSKI**¹, **Jerzy MAŁACHOWSKI**², **Krzysztof DAMAZIAK**²
 WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, ¹INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ²WYDZIAŁ MECHANICZNY
 ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Modelowanie numeryczne i pomiary termograficzne parametrów procesu hamowania

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 hab. inż. Jerzy MAŁACHOWSKI

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1993). W 2001 obronił pracę doktorską, a w roku 2011 uzyskał stopień doktora habilitowanego. Jego obszar badawczy dotyczy dyscypliny mechanika i koncentruje się na metodach komputerowych w mechanice, wytrzymałości materiałów, mechanice technicznej i dynamice konstrukcji. Pracuje w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 210 publikacji, w tym artykuły, referaty i wdrożenia.



e-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Mgr inż. Krzysztof DAMAZIAK

Absolwent Politechniki Warszawskiej (1995). Jego obszar badawczy dotyczy dyscypliny mechanika i koncentruje się na metodach komputerowych w mechanice, wytrzymałości materiałów, mechanice technicznej i dynamice konstrukcji. Od roku 2010 Studuje w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego WAT, na studiach III stopnia. W swoim dorobku naukowym posiada kilkanaście publikacji. Brał udział w kilku projektach badawczych, i jest współautorem zgłoszeń patentowych.



e-mail: kdamaziak@wat.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane wyniki dotyczące modelowania numerycznego oraz badań termograficznych hamulców tarczowych. Do określenia w czasie rozkładu temperatur na powierzchni klocków hamulcowych wykorzystano metodę elementów skończonych. Wykonano też pomiary termograficzne zarówno tarczy hamulcowej jak i okładzin ciernych. Wykonano pomiary temperatur pary trącej zarówno w czasie procesu hamowania jak również chłodzenia hamulca. Określono rozkład temperatur w wybranych przekrojach par ciernych badanych na stanowisku pomiarowym.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, tarcie, parametry cieplne, termowizja, pomiary temperatury.

Numerical modeling and thermographics measurements of brake phenomena parameters

Abstract

Considerable amount of heat is generated in a limited volume of the brake during vehicle braking, which results in several undesired effects, such as thermal shock, local overheating of brake elements and cooling problems. In this paper, selected results of thermal measurements of the braking process are presented, performed on the IL-68 test stand (Fig. 1.) The numerical model of this stand was also created (Fig. 2, Fig. 3) and the numerical simulations of the first 100 ms of the braking process was performed. The temperature distribution across the surface of brake pads was calculated (Fig. 4) as well as the maximal temperature values throughout simulated period. Temperature distribution in the test brake was also measured, using thermal imaging (Fig. 5). Because of the measurement range of the applied thermal camera the measurements were started 300 ms after the brake was engaged and the next 2,5 s were recorded at 1000 frames per second. Sample image from the beginning of the recorded sequence is presented in Fig. 6a, whereas Fig. 6b shows the breaking disc when it was stopped. The temperature changes versus time presented in Fig. 7 were obtained on the basis of frame-by-frame analysis and their character is in accordance with previously calculated, simulated values. The cooling process of the entire brake thermal node was also investigated, which is very important as after several consecutive braking cycles the heat accumulates. The temperature changes after braking depicted in Fig. 8

indicate rather low cooling rate. Thermal time constants (1), (2) of this process were determined. The data gathered during the analysis of thermal images will be used to verify the numerical model of the brake and will also be used as design guidelines in the optimization of brake design for improved heat transfer.

Keywords: numerical modeling, friction, thermal parameters, thermography, temperature measurements.

1. Wstęp

Proces hamowania pojazdu jest stosunkowo krótki, lecz w tym czasie, na skutek współpracy pary cierniej, w układzie hamulcowym wydzielane są znaczne ilości ciepła. Wydzielone ciepło w stosunkowo małej objętości hamulca jest przyczyną szeregu niekorzystnych zjawisk. Zaliczyć do nich trzeba udar cieplny, lokalne przegrzewanie elementów oraz problemy z chłodzeniem całego węzła konstrukcyjnego. Niekorzystne zjawiska termiczne w parze tarcza hamulcowa-klocki hamulcowe są szczególnie istotne w pojazdach specjalnych zarówno cywilnych jak i wojskowych. Ich duża masa wymusza większe siły hamowania [1].

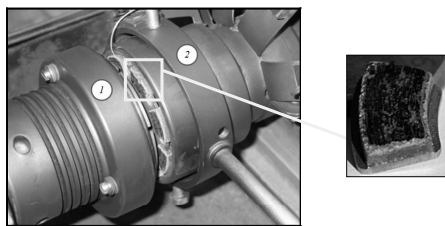
Prowadzi to do wydzielania się znacznej ilości ciepła. Jednocześnie podczas eksploatacji w szczególnych warunkach np. w górach przy częstym hamowaniu może prowadzić do przegrzania a nawet w skrajnych przypadkach do uszkodzenia hamulca [2]. Konstruowanie nowej generacji hamulców wymaga dodatkowych, laboratoryjnych badań termicznych oraz modelowania numerycznego rozptyłu i wydzielania się ciepła. Zjawiska termiczne w parze trącej tarcza hamulcowa-klocki hamulcowe charakteryzują się szeroką dynamiką szybkości zmian temperatury [3]. Jednocześnie część elementów konstrukcji jest ruchoma w związku z tym predysponowaną techniką pomiarową do określenia zmian temperatury w czasie są pomiary termowizyjne. 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.

2. Stanowisko pomiarowe

Laboratoryjne badania hamulców z klockami wykonanymi z nowych kompozytów wykonano w Instytucie Lotnictwa na stanowisku pomiarowym IL-68. Fotografie głównych elementów tego stanowiska zamieszczono na rys. 1.

Część konstrukcji oznaczona 1 jest głowicą obrotową zawierającą tarczę hamulcową. Prędkość obrotowa tarczy hamulcowej odpowiada prędkości liniowej pojazdu, przy której rozpoczyna się proces hamowania. Prędkość tę możemy zaprogramować w przedziale od 0 do 9000 obr./min. Dodatkowo mamy możliwość sterowania wielkością momentu bezwładności tej głowicy. Moment ten może być ustalany w granicach od 0,154 do 1,54 kg·m².

Moment bezwładności wirującej masy symuluje energię rozpraszającą w rzeczywistych warunkach hamowania.



Rys. 1. Stanowisko IL-68, 1-część obrotowa, 2-głowica dociskowa
Fig. 1. Frictional unit of the IL-68 rig 1. Rotational head, 2. Translational head

W czasie pomiarów wartość tego parametru wynosiła 0,412 kg·m². Drugim ważnym fragmentem konstrukcji stanowiska pomiarowego jest część oznaczona cyfrą 2 (rys.1). W skład tego fragmentu konstrukcji wchodzi zespół klocków hamulcowych oraz hydrauliczny siłownik. Klocki hamulcowe dosuwane są przez siłownik w trakcie hamowania do wirującej tarczy hamulcowej ze ściśle określoną siłą. Siła ta może być ustalana w przedziale od 0 do 5,88 kN.

Stanowisko badawcze IL – 68 umożliwia odtworzenie zjawisk trybologicznych i termicznych na powierzchni tarcia badanych próbek oraz uzyskiwanie i pomiar szeregu parametrów charakteryzujących warunki pracy hamulca. Należą do nich takie wielkości, jak: praca sił tarcia, zużycie warstw par ciernych, prędkość poślizgu oraz maksymalna temperatura generowana na styku okładziny i tarczy hamulcowej.

Do celów pomiarów termowizyjnych stanowisko IL-68 zostało zmodyfikowane. Ze względu na konstrukcyjne zamknięcie pary trącej w obudowach mechanicznych wykonano pomocniczy otwór do obserwacji tarczy hamulcowej [4]. Tarcza ta w trakcie pomiarów rozpędzana była do prędkości 6000 obr./min (100Hz). Ze względu na duże prędkości obrotowe a tym samym szybkie zmiany pola temperatur do badań należy użyć szybkich kamer termowizyjnych zapewniających akwizycję danych z prędkością, co najmniej 200Hz. W badaniach na stanowisku IL-68 wykorzystano do tego celu kamerę ThermoCAM SC6000 firmy FLIR umożliwiającą zapis danych z prędkością do 1000 okien pomiarowych (część obrazu zawierająca pomocniczy otwór pomiarowy). Ograniczenie liczby pobieranych danych wynika z maksymalnej szybkości przesyłania danych do komputera przez złącze Ethernet zastosowanej kamery.

Ze względu porównawczych, dla dwóch klocków hamulcowych wykonano także pomiary temperatury metodą kontaktową przy użyciu termopar typu K. Zastosowanie tej metody jest możliwe, gdyż w czasie pomiarów klocki hamulcowe były prawie nieruchome. Złącza pomiarowe termopar wklejono w otwory umieszczone tuż pod powierzchnią trącą (~1,5mm).

Cykl hamowania polegał na rozpędzeniu tarczy hamulca do nominalnej prędkości obrotowej (6000obr./min) a następnie hamowanie tarczy po przez dociśnięciu okładzin ciernych.

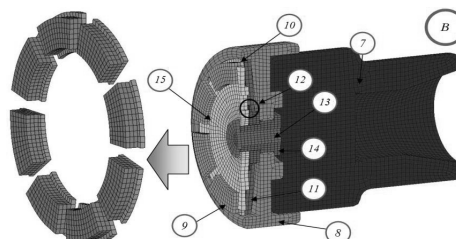
3. Model numeryczny stanowiska IL 68

W ramach prac nad nowym hamulcem wykonano modelowanie numeryczne węzła trybologicznego jakim jest stanowisko IL-68.

Skupiono się przy tym na tych elementach, które w istotny sposób wpływają na wydzielenie i przepływ ciepła. Dokładniejszy opis modelu zamieszczono w pracy [5]. Każdy z 15 elementów stanowiska laboratoryjnego został opisany numerycznie metodą elementów skończonych. Odpowiednie modele dyskretne układu są przedstawione dla zespołu głowicy przesuwnej na rys. 2.

Warunki początkowe i brzegowe zostały tak zdefiniowane, aby istniała tylko możliwość kinematycznego wymuszenia ruchu obrotowego wszystkich komponentów głowicy obrotowej wraz z tarczą hamulcową z jednoczesnym zabezpieczeniem przed przesuwem wzdłuż osi WI (rys. 3).

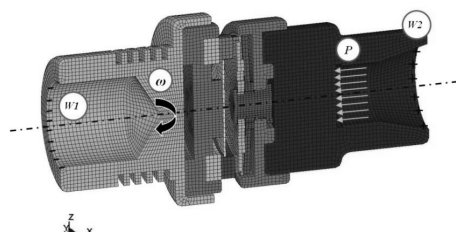
Wprowadzono wirowanie głowicy obrotowej z prędkością kątową $\omega = 628.31$ rad/s i wektorem skierowanym wzdłuż osi X. Ponadto dla głowicy obrotowej dobrano tak parametry masowo-bezwładnościowe, by w pełni odwzorowywały cechy stanowiska związane z układem wymuszającym moment obrotowy.



Rys. 2. Numeryczny model głowicy przesuwnej, obudowa, 9) klocek hamulcowy, 10) oprawa klocków, 11) rozeta, 12) podkładka, 13+14) śruby mocujące, 15) nakładka zamykająca

Fig. 2. Numerical model of the translational head, detailing lining samples: 8) samples housing, 9) lining sample, 10) base of the sample, 11) rosette, 12) washer, 13.14), screws, 15) closing cap [5]

Wprowadzono również ograniczenia ruchu głowicy przesuwnej w taki sposób, że możliwy był jej przesuw tylko wzdłuż osi X modelu. Siła nacisku P realizowana przez siłownik hydrauliczny zasymulowana została siłą poosiową o wartości odpowiadającej testom na stanowisku laboratoryjnym tj. 850N. Model numeryczny wraz z elementami warunków początkowych i brzegowych został zamieszczony na rys. 3.



Rys. 3. Model numeryczny stanowiska
Fig. 3. Boundary conditions applied to the FE model of stand

Numeryczne analizy współpracy pary ciernej zostały przeprowadzone przy założeniu, że wymiana ciepła przez konwekcję i wypromieniowanie jest pomijalnie mała [6]. Tylko początkowe stadia procesu hamowania były modelowane. Inaczej mówiąc jedynym źródłem ciepła w modelu jest ciepło związane z tarcieniem przy założeniu, że cała praca wykonana przez siły tarcia zamienia się na energię cieplną. Odpowiednie równanie opisujące ten proces ma postać (fragment równania związany z pominiętymi czynnikami przekreślono):

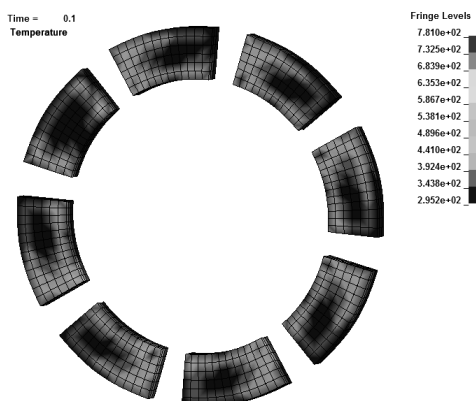
$$F_f \frac{dS}{dt} = mc_p \frac{dT}{dt} + hA(T - T_0) + A\sigma T^4 \quad (1)$$

gdzie: F_f - siła tarcia, S - droga, T - temperatura, c_p - ciepło właściwe, h - współczynnik przepływu ciepła, T_0 - temperatura otoczenia, t - czas, σ - stała Stefana-Boltzmana.

Siła tarcia F_f została określona na podstawie modelu Coulomba z parametrem zapewniającym stabilizację pomiędzy statycznym a dynamicznym tarcieniem. Siła normalna będąca podstawą do okre-

ślenia siły tarcia była określana zgodnie z algorytmem funkcji kary dla kontaktów dwóch powierzchni [7].

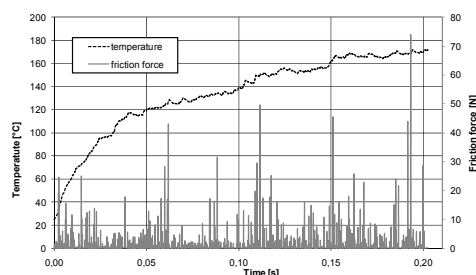
Na rys 4 zamieszczono rozkład temperatur na powierzchni klocków hamulcowych po czasie 100ms od początku hamowania.



Rys. 4. Rozkład temperatury na klockach hamulcowych po czasie $t = 100\text{ms}$
Fig. 4. Temperature distribution on pads, at time $t = 100\text{s}$

Widoczne są punkty, w które nastąpił pierwszy kontakt między parą trącą. Punkty te mają znacznie wyższą temperaturę tworząc tzw. hot-spots. W punktach tych należy oczekiwać szybszego zużycia okładzin ciernych.

Przebieg zmian temperatury maksymalnej dla wszystkich klocków hamulcowych wraz z wykresem siły tarcia podano na rys. 5.



Rys. 5. Zmiany temperatury i siły tarcia w czasie
Fig. 5. Temperature and friction force versus time

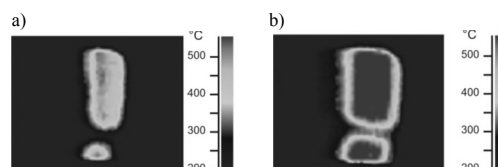
Na przedstawionych wykresach widoczna jest szczególnie duża nierównomierność siły tarcia. W początkowym etapie procesu hamowania ma to stosunkowo mały wpływ na temperaturę maksymalną w obszarze okładzin ciernych. Należy oczekiwać jednak wzrostu tego wpływu wraz z powiększaniem się powierzchni kontaktu a tym samym ilości wydzielanego ciepła.

Ze względu na dużą złożoność obliczeniową, a tym samym czasochłonność obliczeń numerycznych, badania symulacyjne wykonano wstępnie tylko dla pierwszych 200 ms procesu hamowania. Związane jest to w dużej mierze z wielkością kroku całkowania i stabilnością procedury opartej na metodzie różnic centralnych, która to spowodowała przyjęcie kroku całkowania na poziomie $1e^{-8}$ s. Jednocześnie ze względu na nagłe zmiany wartości siły tarcia, przewidywana jest zmiana metody obliczeniowej, tj. z metody elementów skończonych na metodę cząstek swobodnych SPH [8]. Dodatkową zaletą tej metody jest możliwość włączenia do modelu zjawisk mikrostrukturalnych z uwzględnieniem procesu zużycia.

4. Pomiary termowizyjne

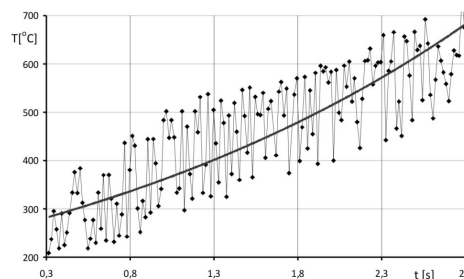
W czasie eksperymentu za pomocą kamery termowizyjnej pobrano dane o rozkładzie temperatury stalowej tarczy hamulcowej [9]. W danym obrazie pobierana była informacja dotycząca wycinka tarczy widoczna przez pomocniczy otwór w głowicy przesuwnej. Pomiary termowizyjne tarczy hamulcowej oprócz bezpo-

średniej informacji o rozkładzie temperatur na jej powierzchni pozwalają wnioskować o maksymalnych i minimalnych temperaturach na powierzchni klocków. Przyjęto przy tym założenie, że w obszarze kontaktu temperatury tarczy i klocków są takie same. W czasie hamowania następuje wzrost temperatur powierzchni elementów pary trącej. Na rysunku 6a zamieszczono przykładowy termogramy z początkowej fazy hamowania oraz z fazy końcowej- rys. 6b.



Rys. 6. Termogramy tarczy hamulcowej, a) w fazie początkowej, b) po zakończeniu hamowania
Fig. 6. Thermal image of a brake disc a) initial braking phase, b) final image (full stop)

W związku z niedoskonałościami struktury powierzchni (chropowatość, falistość i inne imperfekcje) zarówno tarczy hamulcowej jak i klocków oraz ich wzajemnemu niedopasowaniu mechanicznemu występują lokalne punkty o wysokich temperaturach widoczne na rys. 6a. Wraz z dalszym hamowaniem rozkład temperatur na powierzchni staje się bardziej jednorodny aż do rozkładu końcowego widocznego na rys. 6b. Szybkość narastania temperatury maksymalnej jest istotną informacją ze względu na zużycie hamulców. Z tego względu na podstawie termogramów wyznaczono przebieg zmian temperatury maksymalnej w obszarze obserwacji. Wyodrębnienie właściwych informacji z tak dużej liczby danych wymaga wielostopniowej obróbki danych. Analizy te wykonano w środowisku matematycznym *Matlab*. Wykres czasowy będący wynikiem analizy obraz po obrazie zamieszczono na rys. 7.

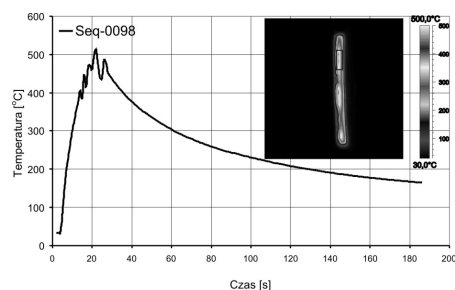


Rys. 7. Zmiany maksymalnej temperatury tarczy hamulcowej
Fig. 7. Maximal brake disc temperature values

Zmiany temperatury tarczy hamulcowej przedstawiono w zakresie od 300 ms do 2,8 s. Wynika to z zakresu dynamicznego kamery. Dla czasów hamowania do $t = 300$ ms temperatura była poniżej dolnej temperatury zakresowej kamery tj. 200°C . Dla czasów hamowania powyżej $t > 2,8$ s mierzona temperatura przekraczała górną temperaturę zakresową – 730°C . Zakres pomiarowy kamery został wybrany na podstawie wcześniejszych pomiarów stykowych oraz pomiarów za pomocą pirometrów wielopasmowych zapewniających kompensację wpływu emisyjności na wynik pomiaru [10]. Charakter zmian obserwowanej temperatury maksymalnej jest zgodny z wynikami modelowania numerycznego. Na podstawie rozkładu temperatur wyznaczonych numerycznie (rys. 4) należy oczekiwać lokalnych obszarów o podwyższonej temperaturze. W obszarze obwodu pary trącej występują lokalnie różne temperatury maksymalne. Pomiar termowizyjny dotyczy kolejnych fragmentów hamulca co powoduje, że mierzona temperatura w kolejnych obrazach, dla kolejnych chwil czasowych różni się. Charakter tych różnic wynika z chropowatości powierzchni elementów pary trącej.

Drugim ważnym zjawiskiem związanym z procesem hamowania jest stygnięcie całego węzła konstrukcyjnego. Jest to szczególnie istotne przy stosunkowo częstym hamowaniu ponieważ

w takim przypadku następuje kumulacja wydzielanego ciepła co może prowadzić do szybszego zużycia hamulca. Do tych badań temperaturowych użyto kamery SC7900 firmy FLIR. Kamera ta zapewnia pomiar w szerszym zakresie temperatur przy jednocześnie nieznacznie wolniejszej akwizycji danych. Na rys. 8 zamieszczono wykres zmian temperatury tarczy hamulcowej w czasie hamowania a następnie stygnięcia.



Rys. 8. Zmiany temperatury w czasie hamowania i stygnięcia
Fig. 8. Temperature changes during braking and cooling

Wykres ten przedstawia zmiany temperatury brzozy tarczy hamulcowej jak zaznaczono to na termogramie powyżej wykresu.

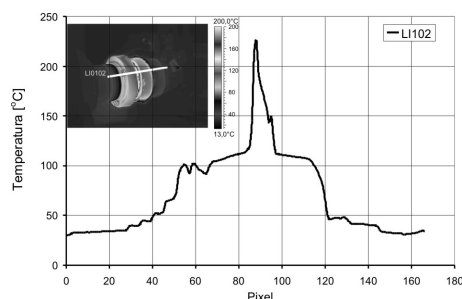
Hamulec składa się z wielu elementów o różnych właściwościach termicznych. Mimo to dla celów modelowania numerycznego powinien być opisany stałą czasową. Jednak proces chłodzenia jest zjawiskiem złożonym o zmiennych stałych termicznych. Dla wykresu z rys. 8 można wyznaczyć stałe czasowe w poszczególnych przedziałach czasowych. W początkowym zakresie termiczna stała czasowa dla zmodyfikowanego stanowiska modelowego wynosi:

$$\tau_1 \leq 95s \pm 2s. \quad (2)$$

Na tym etapie chłodzenia istotną rolę odgrywają również pominięte przy modelowaniu zjawiska wymiany ciepła przez konwekcję oraz promieniowanie. Końcowe schładzanie następuje ze znacznie dłuższą stałą czasową:

$$\tau_2 \leq 240s \pm 2s. \quad (3)$$

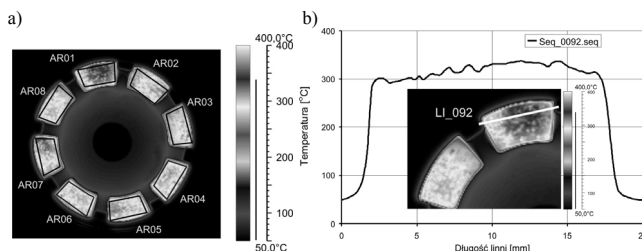
Konstrukcja hamulca na stanowisku badawczym jest mocno zabudowana co powoduje, że cykl chłodzenia pary cieplej jest wydłużony. Nawet po 3 min. temperatura tarczy ma wartość zbliżoną do 200°C. Uzyskany przebieg temperatury oraz końcowy rozkład temperatur w strukturze hamulca są istotne na etapie projektowania tego węzła konstrukcyjnego. Na rys. 9 zamieszczono geometryczny rozkład temperatur dla hamulca. Na rysunku umieszczono również termogram na podstawie, którego wykonano wykres. Na termogramie zaznaczono linię, wzdłuż, której wyznaczono przekrój temperaturowy.



Rys. 9. Termogram tarczy hamulcowej
Fig. 9. Thermal image of a brake disc

W dużej masie konstrukcji laboratoryjnej stanowiska do badania okładzin ciernych, obserwuje się znaczne gradienty temperatury, które utrzymują się przez dłuższy czas po zakończeniu procesu hamowania. W docelowym rozwiązaniu należy zwrócić szczególną uwagę na szybkie odprowadzenie ciepła. Należy przy tym rozwiązać problem dużych gradientów temperatur, które mogą dodatkowo ograniczać żywotność układu hamowania.

Kolejnym badaniem termograficznym były pomiary rozkładu temperatury na powierzchni klocków hamulcowych. W tym wypadku nie ma możliwości obserwacji bezpośredniej, dlatego też pomiary te ograniczono do obserwacji powierzchni klocków hamulcowych tuż po hamowaniu i odsunięciu głowicy przesuwnej. Dodatkowy mechanizm w czasie przesuwu powrotnego odchyłał tarczę z okładzinami ściernymi tak, aby była wygodna obserwacja termowizyjna. Na rys. 10a zamieszczono termogram tarczy zawierającej klocki hamulcowe.



Rys. 10. Temperatura a) klocków hamulcowych, b) rozkład temperatur w klocku AR02
Fig. 10. Temperature of a) brake pad lining b) line profile in AR02 pad

Na powierzchni klocka AR01 występują rozległe obszary o podwyższonej temperaturze. Dokładny profil zamieszczono na rys 10b. Widok wszystkich klocków pokazuje znaczne różnice w 120rozkładzie temperatur dla poszczególnych elementów.

5. Wnioski

Badania termowizyjne są techniką pomiarową pozwalająca mierzyć rozkład powierzchniowy temperatury w procesach o dużej dynamice zmian tej temperatury. Na podstawie przeprowadzonych badań okazało się, że pomiary temperatury klocków hamulcowych metodami stykowymi dawały zaniżone wskazania. W związku z tym w przyszłych pomiarach należy zastosować kamery o większym zakresie mierzonych temperatur. Przebieg zmian maksymalnej temperatury tarczy hamulcowej w obszarze pomiarowym zgadza się z charakterem tych zmian wyznaczonym na podstawie modelowania numerycznego. Zmiana algorytmu na nowy oraz wydłużenie obliczeń pozwoli w przyszłości bezpośrednio weryfikować parametry modelu numerycznego z pomiarami termowizyjnymi. Na podstawie wyników analiz obrazów termowizyjnych określono szereg wniosków, które pozwolą w optymalny sposób projektować hamulce nowej generacji.

6. 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., Jachimowicz J.: Termograficzne pomiary okładzin ciernych hamulców, PAK, w druku, 2010.
- [5] Baranowski P., Małachowski J., Mazurkiewicz L., Kajka R.: Budowa modelu numerycznego stanowiska badawczego okładzin ciernych IL-68, Górnictwo odkrywkowe, 3, 2010.
- [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.
- [7] Baranowski P., Damaziak K., Małachowski J.: Analysis of a brake including thermomechanical coupling, Proc. of the 19th Int. Conf. On Computer Methods in Mechanics, eds. A. Borkowski, T. Lewinski & G. Dzierzanowski, Warsaw, pp. 123-124, 2011.
- [8] Hallquist J.: LS-DYNA Theory Manual, LST Co., 2005.
- [9] Piątkowski T., Polakowski H., Hots N., Examination of metallic surfaces for IR gray body sources, QIR2008, materiały konferencyjne, pp 185-190, 2008.
- [10] Madura H., Kastek M., Piątkowski T., Automatic compensation of emissivity in three-wavelength pyrometers, Infrared Physics & Technology, vol. 51, pp.1-8, 2007.