

Marek SITARZ, Adam MAŃKA, Andrzej HELKA

ZAGADNIENIA CIEPLNE W SYSTEMIE KOŁO - KLOCEK HAMULCOWY - CZ. II

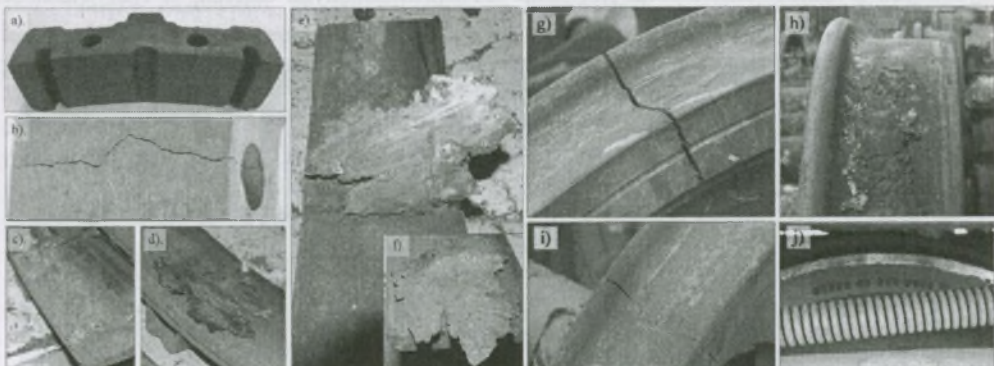
Streszczenie. W artykule przedstawiono kontynuację prac prowadzonych przez Katedrę Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach (KTS) dotyczących wyznaczania własności mechanicznych i termicznych materiałów układu koło kolejowe - klocek hamulcowy (KKH), niezbędnych na etapie modelowania zjawisk zachodzących w czasie hamowania pociągu. Przedstawiono również metodykę wyznaczania rozkładu współczynnika konwekcji dla powierzchni koła i klocków hamulcowych.

THERMAL PROBLEM IN WHEEL - BRAKE SHOE SYSTEM

Summary. In this paper are presented continuation of work carried out in Department of Railway Engineering, Silesian University of Technology in Katowice (KTS). This works concern determination of mechanical and thermal properties of railway wheel-brake shoe materials (KKH) which are indispensable on the stage of modeling of phenomenon proceeded during railway braking. Additionally, this article contain methodology of field of convection coefficient determination for railway wheel and brake shoe external areas.

1. WSTĘP

Ciągły wzrost prędkości pojazdów szynowych powoduje wzrost energii mechanicznej pojazdu, generowanej w czasie hamowania. Większa część z tej energii zamieniana jest na ciepło i odprowadzana jest przez konwekcję i radiację do otoczenia. Podczas eksploatacji wstawek hamulcowych i kół kolejowych dochodzi często do przyspieszonego ich zużycia lub pęknięcia w wyniku nadmiernych obciążeń termicznych i mechanicznych tego układu – rys. 1.



Rys. 1. Widok zużycia katastroficznego wstawek hamulcowych (a-f) oraz kół kolejowych (g-j), wynikającego m. in. z nadmiernych obciążeń termicznych

Fig. 1. Brake inserts wear (a-f) and catastrophic wear of railway wheels (g-j) caused by excessive thermal loads

Dotychczas do analiz numerycznych wykorzystywano dane literaturowe, które nie precyzowały jednoznacznie podstawowych parametrów związanych z wartościami obciążeń cieplnych i ich rozkładem między kołem, klockiem hamulcowym i otoczeniem. Często też zakładano, że całkowita energia mechaniczna pojazdu zamieniana jest na ciepło. W literaturze brak również jednoznacznych danych dotyczących wartości współczynnika konwekcji dla powierzchni koła i wstawki hamulcowej (od 10 do 500 W/m²C), dlatego też w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach przeprowadzono wiele badań mających na celu wyznaczenie podstawowych wielkości opisujących zjawiska termiczne w układzie koło kolejowe - klocek hamulcowy, co pozwoli na wykorzystanie ich na etapie modelowania i analizy numerycznej.

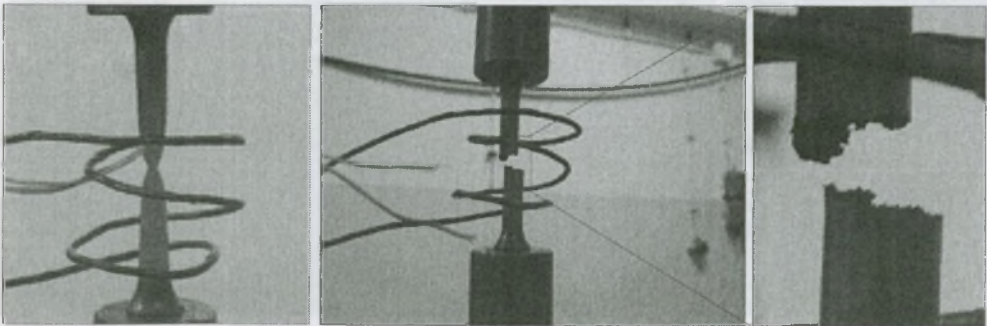
W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania współczynnika konwekcji w funkcji temperatury i prędkości omywającego badana próbkę powietrza. Podano jej rozkład w funkcji prędkości omywającego powietrza na przykładzie lokomotywy EU07. Przedstawiono również wyniki analiz numerycznych, w których wykazano, że wpływ wyznaczonych wielkości, w tym rozkładu współczynnika konwekcji w układzie koło - wstawka hamulcowa, jest decydująca dla uzyskiwanego rozkładu temperatur oraz wartości naprężeń maksymalnych, co jest silnie skorelowane ze zużyciem tych elementów. Analizy numeryczne MES prowadzono dla wyznaczonych uprzednio własności mechanicznych materiału w funkcji temperatury do 740°C.

W pracy uwzględniono wyznaczone na specjalnie zaprojektowanym stanowisku TC-01 własności termiczne materiałów, takie jak: współczynnik radiacji, konwekcji, przewodności i rozszerzalności cieplnej oraz ciepło właściwe.

Wyznaczone własności pozwalają na modelowanie rozkładu temperatur oraz naprężeń w układzie koło - klocek hamulcowy z uwzględnieniem rzeczywistych obciążeń wynikających z hamowania pojazdu, umożliwiającą uzyskanie znacznie większej zbieżności wyników analizy numerycznej z badaniami eksperymentalnymi.

2. WYZNACZANIE MECHANICZNYCH I TERMICZNYCH WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW UKŁADU KKH

Modelowanie zjawisk zachodzących w układzie koło - klocek hamulcowy w programach wykorzystujących MES pozwala na prowadzenie bardzo złożonych analiz, jednak dokładność uzyskanych wyników uzależniona jest silnie od wprowadzonych danych, w tym własności materiałowych.



Rys. 2. Widok próbek wykonanych ze stali ER7 w trakcie badań w funkcji temperatury do 740°C oraz próbki z żeliwa P10 po zerwaniu w statycznej próbie rozciągania

Fig. 2. ER steel samples during thermal tests (temperature range 20-740°C and P10 cast iron sample broken during static tensile test

W przypadku obliczeń sprzężonych termiczno-mechanicznych niezbędne jest podanie wielkości charakteryzujących materiał zarówno pod względem mechanicznym, jak i termicznym, dlatego też w pierwszym etapie prac prowadzonych w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach podjęto się wyznaczenia własności mechanicznych materiałów układu KKH w funkcji temperatury od 20÷740°C – rys. 2.

Stwierdzono przykładowo, że różnice w wartości Young modulus sięgają w przypadku wysokich temperatur nawet do 31% w porównaniu z wcześniejszymi danymi literaturowymi [4]. W przypadku własności termicznych materiałów stosowanych na koła kolejowe lub wstawki hamulcowe trudno znaleźć w literaturze informacje, które można by wykorzystać na etapie modelowania przepływu ciepła. Szczególnie widoczne jest to w przypadku nowych wstawek hamulcowych wytwarzanych z tworzyw kompozytowych lub proszków spiekanych. Dlatego też w następnym etapie zaprojektowano i wykonano stanowisko TC-01 (rys. 3) do wyznaczania wielkości przedstawionej w tabeli 1.

Tabela 1

Wyznaczane własności termiczne materiałów na stanowisku TC-01

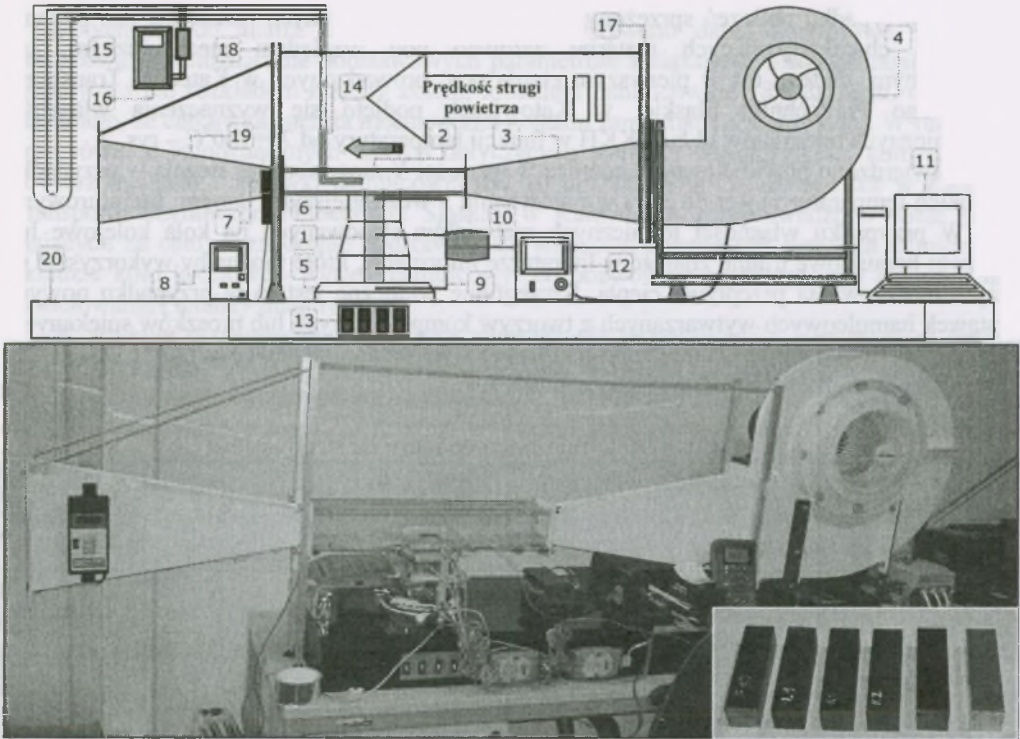
Nr	Własności termiczne materiałów układu KKH w temperaturze 20-500°C oraz dla prędkości strugi powietrza w zakresie 0÷160 km/h	Symbol	Jednostka
1	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	β	K ⁻¹
2	Współczynnik emisji cieplnej	ϵ	-
3	Ciepło właściwe	c	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
4	Współczynnik przewodności cieplnej	λ	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
5	Współczynnik konwekcji*	λ	W·m ⁻² ·K ⁻¹

Wykorzystując stanowisko TC-01 wyznaczono własności termiczne dla stali B6 i ER7 oraz dla żeliwa P10 i materiałów kompozytowych. Do sterowania i komunikacji z układami pomiarowymi stanowiska oraz rejestracji i wizualizacji uzyskiwanych danych napisano program komputerowy TCREC – rys. 4. To właśnie dzięki możliwości ciągłej analizy uzyskiwanych wyników badań możliwe jest określenie parametrów i czasu prowadzenia próby. Program na podstawie danych pomiarowych automatycznie wyznacza wartości szukanych wielkości fizycznych po podaniu rodzaju prowadzonych badań.

Należy zaznaczyć, że wyznaczenie na stanowisku TC-01 wartości współczynnika konwekcji w funkcji prędkości strugi powietrza i temperatury nie pozwala jeszcze na przypisanie tego parametru do powierzchni modelowanego koła czy klocka hamulcowego. Wynika to stąd, że należy wyznaczyć jeszcze rozkład prędkości powietrza dla modelowanego elementu. W przedstawianym przypadku autorzy wyznaczyli rozkład prędkości strugi powietrza w otoczeniu układu koło - klocek hamulcowy na podstawie analizy CFD w programie ANSYS, który następnie zweryfikowano przez wykonanie badań eksploatacyjnych na lokomotywie EU07 – rys. 5.

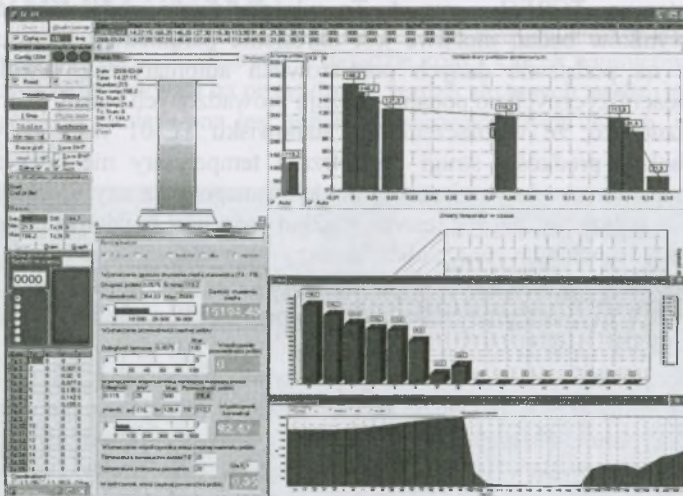
Dopiero znajomość zmian wartości współczynnika konwekcji w funkcji prędkości powietrza wraz z informacją o rozkładzie prędkości wokół modelowanego elementu pozwala na prawidłowe przypisanie dla tych powierzchni współczynnika konwekcji.

Współczynnik konwekcji w literaturze najczęściej uzależniany jest od temperatury powierzchni, jednak jak wykazały badania autorów prowadzone w Katedrze Transportu Szynowego, podejście takie jest słuszne jedynie w przypadku konwekcji swobodnej. Jak wykazano w pracy [2], w przypadku konwekcji wymuszonej dominującym czynnikiem mającym wpływ na wartość współczynnika konwekcji jest prędkość strugi powietrza, a po przekroczeniu ok. 60°C, wpływ temperatury jest pomijalnie mały.



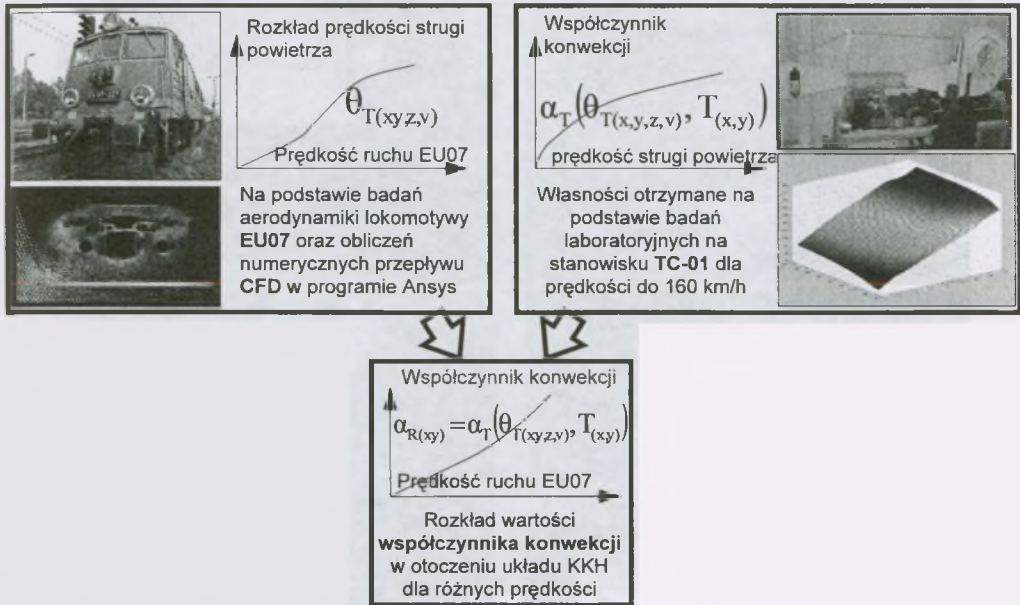
Rys. 3. Stanowisko TC-01 do wyznaczania własności termicznych ciał stałych oraz współczynnika konwekcji dla prędkości $0 \div 160$ km/h oraz temperatury $20-500^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. TC-01 test stand used for evaluating thermal properties of solids and convection coefficient for air velocity range $0-160$ km/h and temperature range $20-500^{\circ}\text{C}$



Rys. 4. Widok autorskiego programu TCREC do rejestracji, analizy i wizualizacji danych pomiarowych uzyskanych na stanowisku TC-01

Fig. 4. TCREC program interface – program is used for recording, analysis and visualisation of measurement data obtained at TC-01 test stand



Rys. 5. Schemat wyznaczania rozkładu wartości współczynnika konwekcji dla układu KKH w funkcji prędkości ruchu wybranego pojazdu szynowego

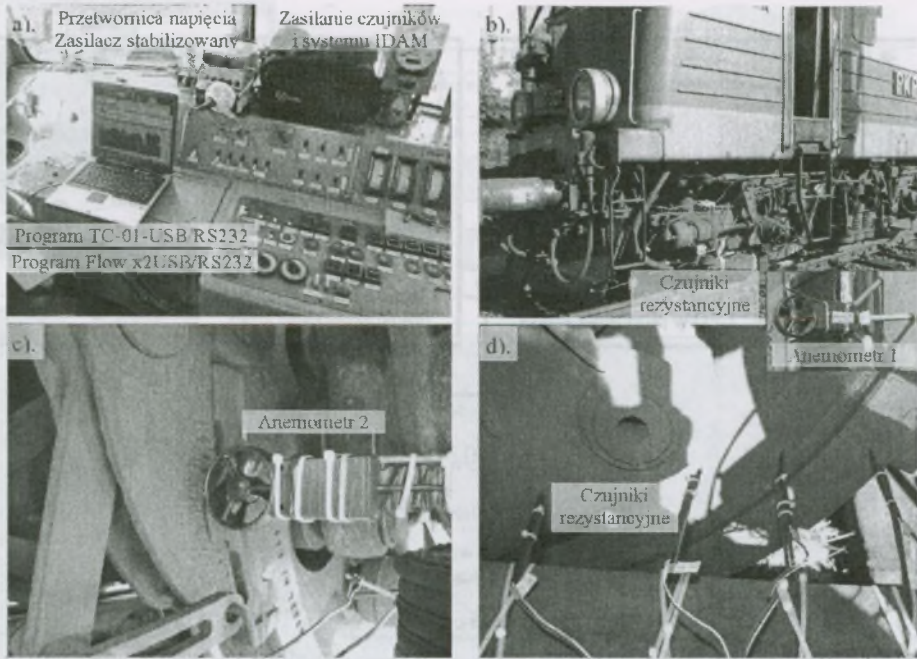
Fig. 5. Diagram of determining convection coefficient distribution as a function of vehicle speed for KKH system

3. WYZNACZANIE ROZKŁADU WSPÓŁCZYNNIKA KONWEKCJI W OTOCZENIU UKŁADU KOŁO - KŁOCZEK HAMULCOWY

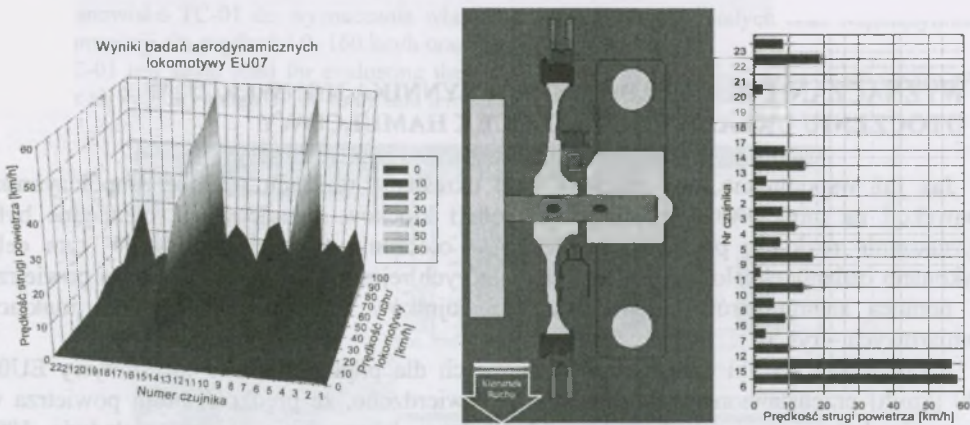
Jak już wspomniano, aby możliwe było określenie rozkładu wartości współczynnika konwekcji na modelowane powierzchnie koła i klocków hamulcowych, niezbędne było wyznaczenie rozkładu prędkości powietrza w otoczeniu tych elementów. W tym celu wykonano badania eksploatacyjne, w trakcie których rejestrowano prędkość strugi powietrza za pomocą anemometrów i opracowanych czujników rezystancyjnych w 48 punktach pomiarowych – rys. 6.

Przykładowe wyniki badań aerodynamicznych dla prędkości ruchu lokomotywy EU07 100 [km/h] przedstawione zostały na rys. 7. Stwierdzono, że prędkość strugi powietrza w otoczeniu koła i wstawek hamulcowych badanej lokomotywy stanowi zaledwie 10% prędkości ruchu pojazdu. Tak duże rozbieżności wynikają ze specyfiki konstrukcji lokomotywy, która posiada spojler oraz wiele elementów konstrukcyjnych, utrudniających swobodny przepływ powietrza.

Należy sądzić, że dla wagonów towarowych, których elementy konstrukcji nie stanowią tak znacznych przeszkód dla swobodnego przepływu powietrza, wartości prędkości strugi powietrza w otoczeniu kół kolejowych będą znacznie wyższe, jednak niezbędne badania prowadzone będą w najbliższym czasie.

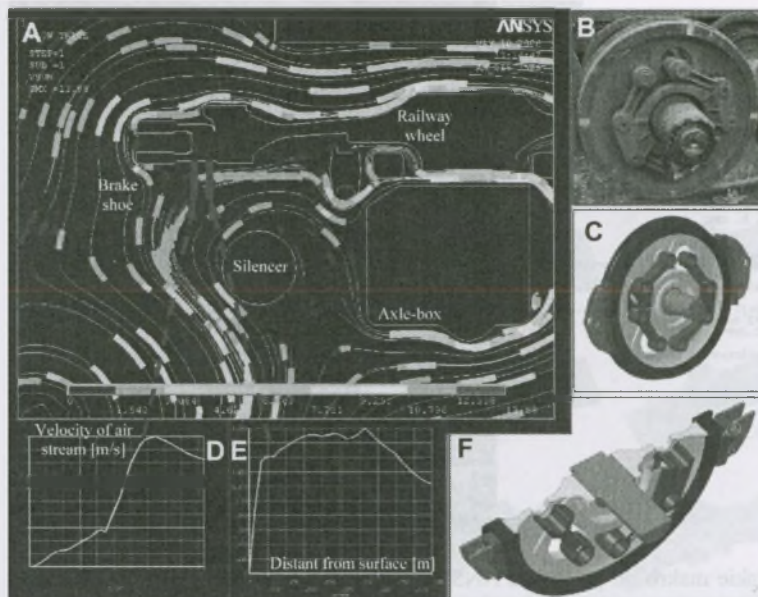


Rys. 6. Widok lokomotywy EU-07 w czasie montażu czujników do badań aerodynamicznych
 Fig. 6. View of EU-07 locomotive during aerodynamical sensors assembling



Rys. 7. Zależność prędkości strugi powietrza od prędkości ruchu lokomotywy EU07 w poszczególnych punktach pomiarowych podczas jazdy z prędkością 100 km/h
 Fig. 7. Air stream velocity vs. EU07 locomotive speed in several measurement points; driving speed was 100 km/h

Oprócz badań eksploatacyjnych wykonano również analizę przepływu strugi powietrza CFD w otoczeniu badanego układu. Wykonano model przestrzenny otoczenia układu kołkoczek hamulcowy w programie CATIA V5, a następnie wybrany przekrój wyeksportowano do programu ANSYS – rys. 8. Po porównaniu uzyskanych danych z wynikami badań eksploatacyjnych wyznaczono rozkłady prędkości strugi powietrza na kierunku normalnym do badanych punktów powierzchni układu.



Rys. 8. Rozkład prędkości strugi powietrza w otoczeniu układu koło kolejowe - kłosek hamulcowy lokomotywy EU07 otrzymany po przeprowadzeniu analizy przepływu CFD

Fig. 8. Distribution of air stream in railway wheel-brake shoe subsystem environment of EU07 locomotive obtained from CFD analysis

Uzyskany rozkład prędkości strugi powietrza pozwolił na precyzyjne określenie rozkładu współczynnika konwekcji dla koła kolejowego, co zostało uwzględnione podczas budowy modeli numerycznych.

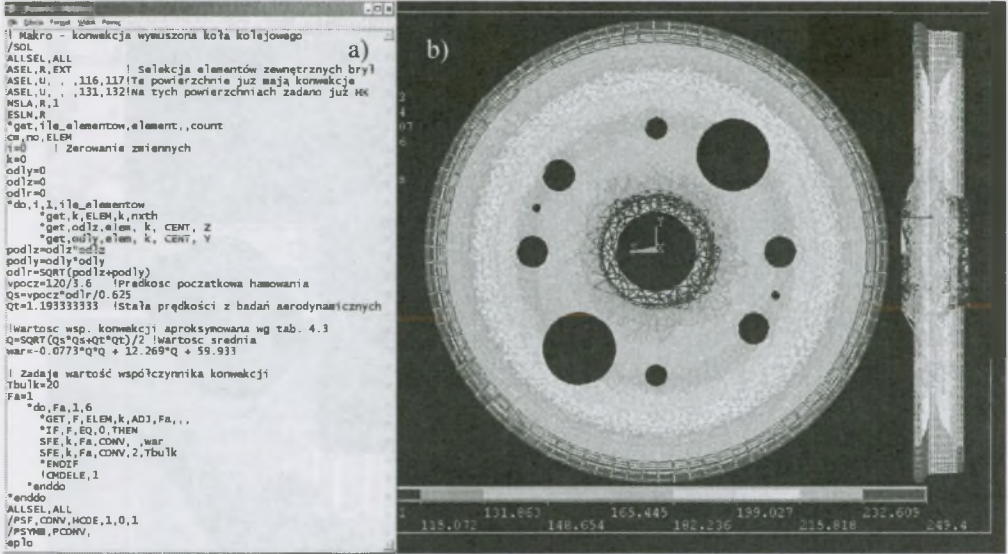
4. MODELOWANIE ZJAWISK MECHANICZNYCH I TERMICZNYCH ZACHODZĄCYCH W UKŁADZIE KOŁO KOLEJOWE - KŁOSEK HAMULCOWY

Uzyskane na podstawie wcześniejszych badań dane materiałowe wartości obciążeń zewnętrznych układu oraz współczynnik konwekcji pozwoliły na opracowanie modeli numerycznych układu KKH.

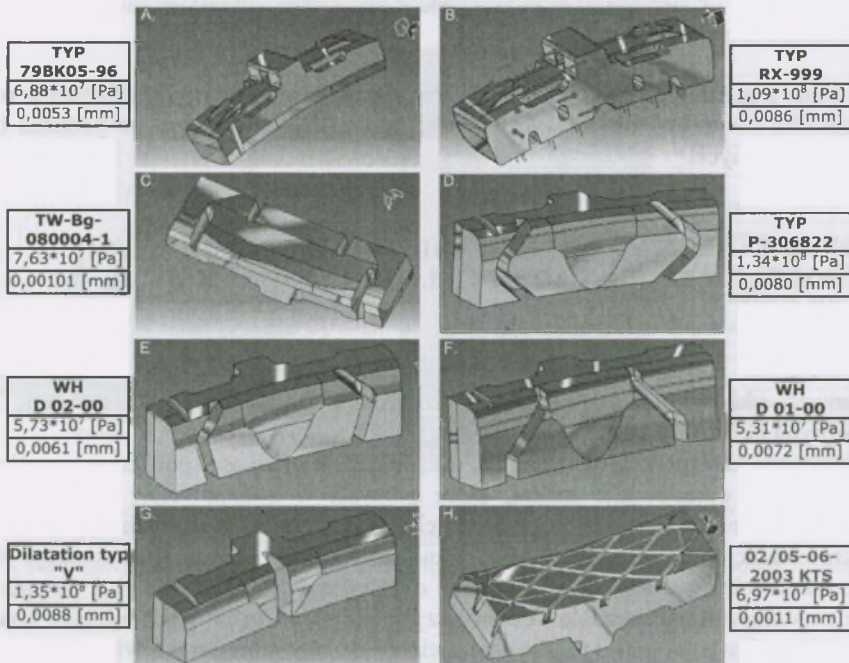
Wyznaczona zależność współczynnika konwekcji od prędkości powietrza umożliwiła po aproksymacji na opracowanie makra, które pozwala w automatyczny sposób przypisać wartość współczynnika konwekcji do powierzchni elementów skończonych – rys. 9.

Makro selekcjonuje elementy zewnętrzne siatki FEM modelu, wyszukuje te jego powierzchnie, które nie sąsiadują z innymi elementami (są zewnętrzne) i przypisuje im, zgodnie z wyznaczonymi w czasie wcześniejszych badań, wartości współczynnika konwekcji. Taki sposób zadawania sposobu oddawania ciepła do otoczenia umożliwia w miarę wierne odtworzenie badanego procesu i ma zasadniczy wpływ na uzyskiwane wartości temperatur.

W trakcie prowadzonych w Katedrze prac wykonano również analizę wszystkich konstrukcji wstawek hamulcowych stosowanych w polskim taborze kolejowym.



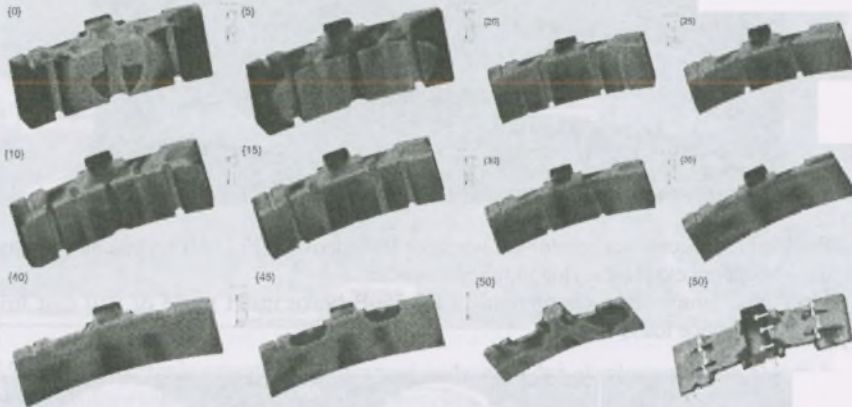
Rys. 9. Autorskie makro do programu ANSYS, umożliwiające zadawanie współczynnika konwekcji dla poszczególnych elementów skończonych a) oraz wyniki jego działania b)
 Fig. 9. Authors' original macro for ANSYS program a) setting convection coefficient for different finite elements b) calculation results



Rys. 10. Widok wstawek hamulcowych eksploatowanych w polskim taborze wraz z ich naprężeniami uzyskanymi w wyniku analizy strukturalnej modeli numerycznych
 Fig. 10. Brake inserts used in Polish rolling stock; insert stress distribution obtained by structural analysis of numerical models

Porównano rozkład naprężeń występujących w tych wstawkach oraz równomierność ich rozkładu na powierzchni kontaktu z kołem. Przedstawiono własną propozycję wstawki hamulcowej (rys. 10), którą zweryfikowano podczas badań na stanowisku bezwładnościowym wielkości rzeczywistej homologowanym przez UIC.

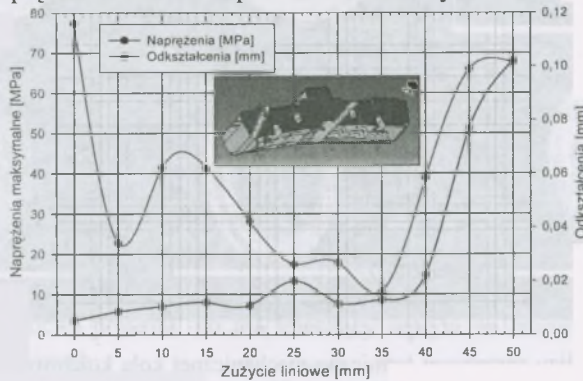
Ze względu na specyficzną budowę wstawki hamulcowej z dylatacjami badano również wpływ jej zużycia na rozkład naprężeń redukowanych HMM – rys. 11.



Rys. 11. Widok rozkładu naprężeń na powierzchni kontaktu wstawki hamulcowej z kołem kolejowym dla kolejnych etapów zużycia liniowego wstawki

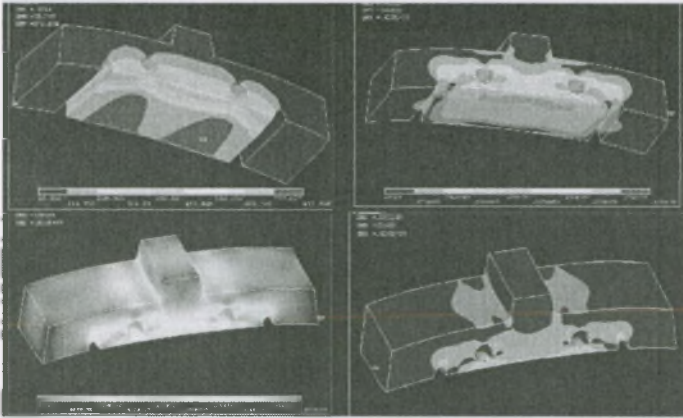
Fig. 11. Stress distribution at brake insert-railway wheel contact surface for subsequent stages of brake insert linear wear

Uzyskane wyniki naprężeń i odkształceń przedstawiono na rysunku 12.



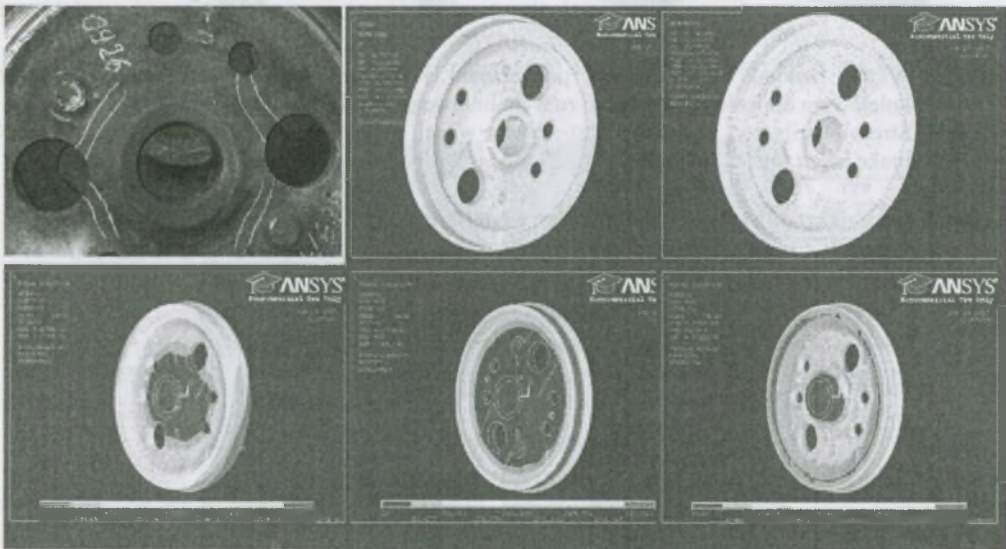
Rys. 12. Wpływ zużycia wstawki hamulcowej z dylatacjami na jej stan naprężeń i odkształceń
Fig. 12. Impact of brake insert with dilatations wear on stress and strain of brake insert

Kolejnym etapem prowadzonych badań było określenie przyczyn pękania wstawek hamulcowych jednego z polskich producentów. Dlatego też zamodelowano wstawkę hamulcową z dylatacjami, wprowadzono wyznaczone wcześniej dane materiałowe i obciążenia zewnętrzne oraz przeanalizowano kilkanaście możliwych konfiguracji obciążeń wynikających z eksploatacji. Stwierdzono na tej podstawie, w jakiej sytuacji możliwe jest powstawanie tak wysokich naprężeń termicznych i w jaki sposób można wprowadzić zmiany konstrukcji, aby zapobiec temu zjawisku w przyszłości.



Rys. 13. Rozkład naprężeń i temperatur we wstawce hamulcowej D0 250B wykonanej z żeliwa P10 dla obciążenia eksploatacyjnego, nierównomiernego

Fig. 13. Stress and temperature distribution in D0 250B brake insert made of P10 cast iron non-uniform service loads



Rys. 14. Przykład analizy sprzężonej termiczno-mechanicznej koła kolejowego podczas hamowania lokomotywy EU07 ze 120 km/h w czasie 60 s

Fig. 14. Example of coupled thermal and mechanical analysis of railway wheel during EU07 locomotive braking at 120 km/h, 60 s

Przeprowadzono również wiele analiz sprzężonych termiczno-mechanicznych kół kolejowych. Poddając koło lokomotywy EU07 obciążeniom termicznym, strukturalnym i analizie modalnej, zbadano jakie czynniki powodują - pękanie tych kół w warunkach normalnej eksploatacji rys. 14.

Dzięki przeprowadzonym badaniom eksploatacyjnym możliwe było zweryfikowanie wyników uzyskanych z analiz numerycznych. Jednocześnie, przez pomiar rozkładu temperatury w 16 punktach wstawki hamulcowej oraz pomiar temperatury powierzchni koła, wstawki hamulcowej i obsady, możliwe było wykonanie bilansu energetycznego procesu

hamowania badanej lokomotywy. Bilans ten pozwolił określić ilościowo składniki generowania i rozplywu ciepła w KKH.



Rys. 15. Rozmieszczenie aparatury pomiarowej podczas badań eksploatacyjnych układu koło - klocek hamulcowy prowadzonych na lokomotywie EU07 oraz wyniki badań stanowiskowych dla żeliwa P10

Fig. 15. Placement of measurement devices during service tests of railway wheel - brake shoe system (EU07 locomotive); test stand investigation results for P10 cast iron shoes

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych, laboratoryjnych i eksploatacyjnych oraz analiz numerycznych wyciągnięto następujące wnioski:

- wyznaczono własności mechaniczne materiałów stosowanych na koła kolejowe i wstawki hamulcowe dla temperatur od 20 do 740°C i wykazano znaczące różnice w otrzymywanych z analizy naprężeń kontaktowych w programie FEM wartościach naprężeń maksymalnych dla temperatur koła przekraczających 300°C;
- stwierdzono, że ze względu na specyfikę konstrukcji badanej lokomotywy EU07 prędkość strugi powietrza w otoczeniu układu koło - klocek hamulcowy wynosi zaledwie 10% prędkości ruchu pojazdu, co ma znaczący wpływ na warunki eksploatacji kół i wstawek hamulcowych;
- przeprowadzony bilans energetyczny procesu hamowania pozwolił na oszacowanie udziału procentowego gęstości strumienia ciepła przypadającego na koło i klocek hamulcowy (wartości obciążeń dla obliczeń termicznych i sprzężonych) oraz na określenie rozdziału ciepła do otoczenia przez konwekcję;
- opracowane makro do programu ANSYS pozwoliło na automatyczne zadawanie rozkładu współczynnika konwekcji dla modelowanych kół kolejowych z wykorzystaniem danych uzyskanych na podstawie wcześniejszych badań;

- wyznaczone własności mechaniczne i termiczne materiałów oraz określenie obciążeń termicznych działających na układ KKH umożliwiły prowadzenie analiz wytrzymałościowy kół i klocków hamulcowy z uwzględnieniem rzeczywistych warunków eksploatacyjnych.

Literatura

1. Sitarz M.: Railway Wheelsets. Monograph. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
2. Sitarz M., Mańka A., Hełka A.: Wpływ geometrii dylatacji na własności eksploatacyjne wstawek hamulcowych. Problemy Transportu, z.1, t.1, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006, s. 73-81.
3. Raport ERRI B 169. Termische grenzen der raden und bremsklotze. Utrecht 1987.
4. Raport ERRI B169.1. Entwurf zum UIC-merkblatt. 1998.
5. Mańka A.: Obliczenia wytrzymałościowe kompozytowych klocków hamulcowych z wykorzystaniem MES. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 48, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003, s. 229-238.

Recenzent: Dr hab. inż. Paweł Piec
Prof. Politechniki Krakowskiej

Praca wykonana w ramach badań własnych: BW - 491/RT4/2007