

Marek SITARZ, Adam MAŃKA, Andrzej HEŁKA

BADANIA MODELOWE I EKSPLOATACYJNE SYSTEMU KOŁO - KŁOCEK HAMULCOWY - SZYNA

Streszczenie. W artykule przedstawiono kolejne etapy prac wykonanych w ramach badania i modelowania zjawisk zachodzących w układzie koło - klocek hamulcowy - szyna. W zakres badań wchodziły zarówno badania laboratoryjne, stanowiskowe, jak i eksploatacyjne, na podstawie których uzyskano dane wejściowe do utworzenia modeli numerycznych. Przedstawiono również metodykę obliczeń numerycznych opartą na superpozycji wyników otrzymanych z dwóch modeli: modelu zjawisk termicznych i modelu zjawisk mechanicznych, zachodzących podczas hamowania z uwzględnieniem zjawisk zużycia. Artykuł zawiera również schemat optymalizacji konstrukcji klocków hamulcowych ze względu na minimum naprężeń powstających podczas hamowania przy użyciu połączenia programu MES oraz algorytmu ewolucyjnego.

MODEL'S AND EXPLOITATION'S RESEARCH OF WHEEL - BRAKE SHOE - RAIL SYSTEM

Summary. The paper present following stages of work made within the framework of investigations and modeling phenomena proceeding during braking in wheel - brake shoe - rail system. Described following stages of laboratory, stand and exploitation research and made, on the basis research, numerical model of phenomena proceeding during vehicle braking. The paper present also scheme of optimization of railway brake shoe construction with use evolutionary algorithm and FEM program.

1. WSTĘP

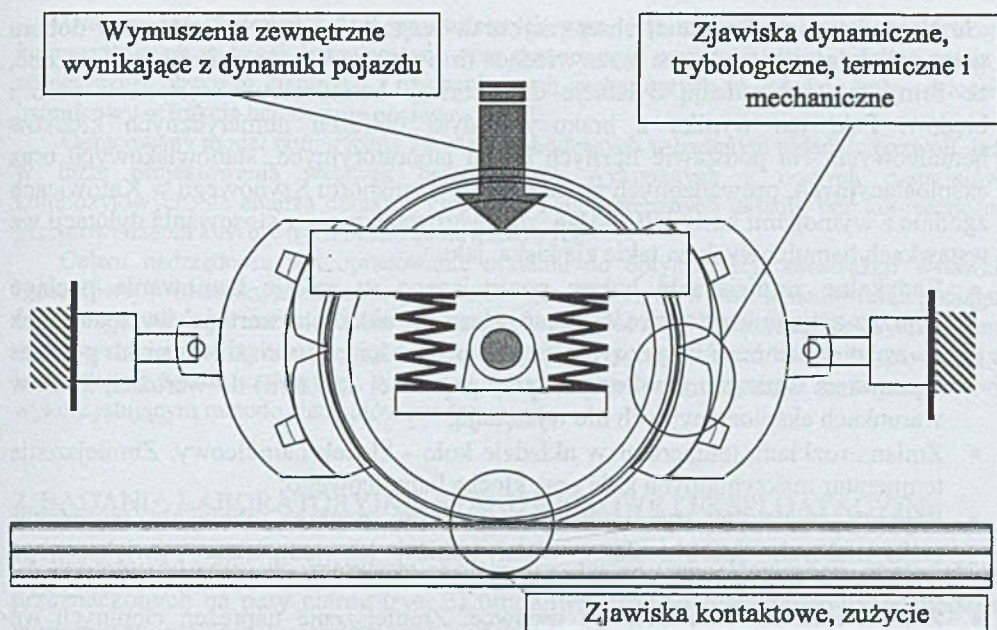
Pełny opis zjawisk zachodzących w układzie: koło - klocek hamulcowy - szyna w czasie eksploatacji pojazdu, a szczególnie w trakcie jego hamowania, stanowił wyzwanie dla wielu badaczy. Powstało wiele opracowań dotyczących zarówno całego układu, jak i współpracy poszczególnych jego elementów. Podstawowym elementem analizy była zazwyczaj dynamika układu, której model redukowano do kilku stopni swobody (ruch obrotowy i postępowy pojedynczego koła oraz ruch mas odsprężynowanych). W literaturze rzadziej spotkać można opis zjawisk dotyczących innych aspektów eksploatacji pojazdów szynowych, tj.:

- zjawisk dynamicznych:

- poślizg kół względem szyny wynikający z różnicy średnic tocznych oraz ruchu poprzecznego zestawu kołowego względem szyn;
- ruch względny kół zestawu wynikający ze sztywności skrętnej osi podczas hamowania z nierównomiernymi naciskami klocków na koło lub hamowania z różnymi charakterystykami układu hamulcowego;

- ruch względny kół zestawu wynikający z różnych współczynników tarcia ślizgowego w podukładzie zestaw kołowy - szyny;
- generowanie zmiennych sił hamujących wskutek różnych chwilowych wartości współczynnika tarcia pomiędzy klockami hamulcowymi a kołami;
- wymuszenia zewnętrzne od toru (styki, rozjazdy, tolerancja wykonania);
- wymuszenia generowane w wyniku zmian geometrii powierzchni tocznej koła (płaskie miejsca, nalepy itp.);
- siły wynikające z interakcji podukładów całego pojazdu szynowego;
- zjawisk termicznych i pokrewnych:
 - generowanie ciepła w trakcie hamowania pojazdu;
 - okresowe zmiany rozkładu strumienia ciepła w czasie hamowania;
 - zmiany geometrii elementów podukładu (szczególnie zmiana powierzchni kontaktu klocka hamulcowego) wynikające z rozszerzalności cieplnej i związane z tym zmiany wartości nacisków jednostkowych;
 - zmiana wartości współczynnika tarcia lub zmniejszenie jego stabilności po przekroczeniu temperatury granicznej (szczególnie dla klocków kompozytowych);
 - generowanie iskier w wyniku spalania warstw strefy kontaktu klocka z kołem w czasie intensywnego hamowania pojazdu;
- zjawisk akustycznych:
 - generowanie hałasu wynikające z ruchu pojazdu;
 - generowanie hałasu w trakcie hamowania pojazdu (szczególnie w trakcie hamowania klockami wykonanymi z żeliwa P10 dla niewielkich prędkości pojazdu 35 km/h);
- zjawisk trybologicznych:
 - zmiany wartości współczynnika tarcia oraz drogi hamowania pojazdu w funkcji prędkości początkowej hamowania, wartości nacisku klocków hamulcowych na koło, temperatury początkowej hamowania oraz masy pojazdu;
 - zużycie wstawek hamulcowych, powierzchni tocznej kół i szyn w funkcji prędkości pojazdu, temperatury układu, prędkości względnych trących się elementów, nacisków jednostkowych.

Można oczywiście przytoczyć opis wielu innych zjawisk zachodzących w rozpatrywanym układzie lub zjawisk mających na niego wpływ. Dlatego też ze względu na ilość oraz złożoność opisu przytoczonych zjawisk budowano modele matematyczne uwzględniające jedynie zjawiska dotyczące jednego elementu układu lub opisywano cały układ: koło - klocek hamulcowy - szyna w bardzo uproszczony sposób. Ze względu na silną interakcję elementów układu, chcąc opracować model obciążeń działających na pojedynczy element układu, należy uwzględnić wpływ pozostałych jego składników. Dlatego też prace prowadzone przez Katedrę Transportu Szynowego w Katowicach w zakresie modelowania i optymalizacji konstrukcji układu koło - klocek hamulcowy - szyna obejmują całokształt zjawisk mających istotny wpływ na własności eksploatacyjne układu i bezpieczeństwo środków transportu - rys. 1.



Rys. 1. Schemat rozpatrywanego układu: koło - klocek hamulcowy - szyna
Fig. 1. Scheme of wheel - brake shoe - rail system

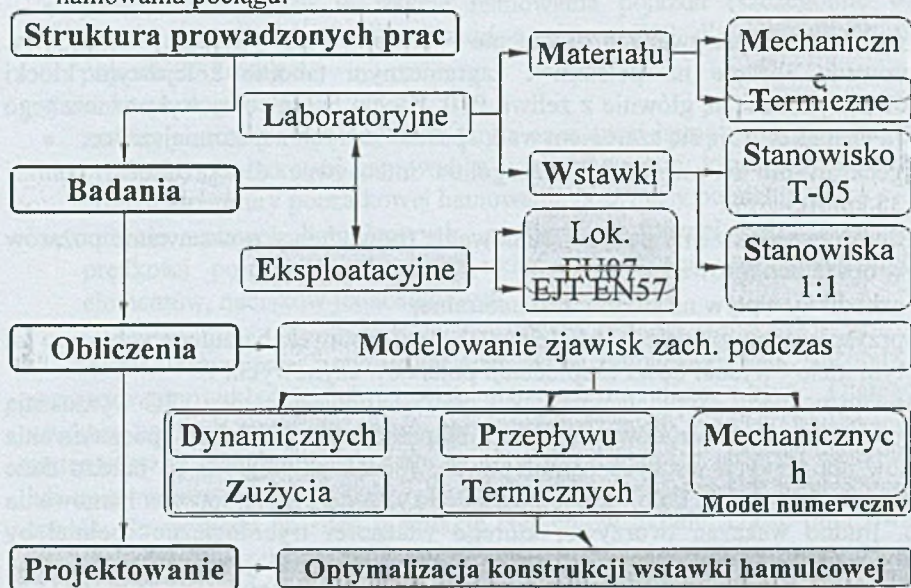
Jednym z rozpatrywanych elementów układu jest klocek hamulcowy. Eksploatowane obecnie na polskim i zagranicznym taborze kolejowym klocki hamulcowe wykonane są głównie z żeliwa P10. Klocki hamulcowe wykonane z tego tworzywa charakteryzują się szeregiem wad, spośród których najistotniejsze to:

- generowanie hałasu (piski szczególnie intensywne dla prędkości poniżej 35 km/h);
- intensywne iskrzenie podczas hamowania (powodujące powstawanie pożarów w obszarach torowisk);
- szkodliwy wpływ na środowisko naturalne;
- przyspieszone zużycie kół kolejowych oraz wstawek hamulcowych, a co za tym idzie - wysoki koszt eksploatacji pojazdów szynowych.

Zarówno względy eksploatacyjne jak i prawne (nowe przepisy UIC wymuszają stosowanie nowych materiałów na klocki hamulcowe) są źródłem poszukiwania materiałów dla nowych wstawek hamulcowych. Jednak ze względu na bardzo duże obciążenia cieplne układu koło - klocek hamulcowy, generowane podczas hamowania pociągu, trudno wskazać tworzywo, którego własności trybologiczne spełniałyby określone wymagania przy jednoczesnym zachowaniu dużej trwałości klocków hamulcowych. Duże obciążenie cieplne kół kolejowych wpływa bezpośrednio na zwiększenie zużycia powierzchni tocznych oraz na zachowanie bezpieczeństwa środków transportu. Dlatego też w celu zmniejszenia obciążeń cieplnych koła przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych własności trybologicznych wstawek hamulcowych projektuje się klocki hamulcowe z dylatacjami.

Na podstawie kilkuletniej obserwacji oraz bezpośrednich pytań o metody doboru geometrii dylatacji stosowane przez wiodące firmy krajowe i zagraniczne stwierdzono, że firmy te wprowadzają dylatacje do wstawek hamulcowych metodami prób i błędów. Fakt ten wynika z braku metodyki obliczeń numerycznych klocków hamulcowych. Na podstawie licznych badań laboratoryjnych, stanowiskowych oraz eksploatacyjnych, prowadzonych przez Katedrę Transportu Szynowego w Katowicach zgodnie z wymogami karty UIC 541-4, zarejestrowano wpływ stosowania dylatacji we wstawkach hamulcowych na takie zjawiska, jak:

- Radykalne zmniejszenie hałasu powstającego w trakcie hamowania pociągu poprzez zmianę częstotliwości drgań własnych układu, z wartości występujących w trakcie hamowania przy niedużych prędkościach (uciążliwe piski podczas hamowania wstawkami żeliwnymi przy prędkości 25 km/h) do wartości, które w warunkach eksploatacyjnych nie występują;
- Zmiana rozkładu temperatur w układzie koło - klocek hamulcowy. Zmniejszenie temperatur maksymalnych koła oraz klocka hamulcowego;
- Poprawa własności trybologicznych klocków poprzez obniżenie temperatur maksymalnych wstawki do wartości poniżej ich temperatury zwiększonego zużycia lub zużycia katastroficznego;
- Zmiana rozkładu naprężeń we wstawce. Zmniejszenie naprężeń cieplnych we wstawce i w kole oraz zwiększenie równomierności nacisku klocka na koło;
- Gaszenie iskier generowanych w układzie koło - klocek hamulcowy w trakcie hamowania pociągu.



Rys. 2. Schemat prac prowadzonych w kierunku opracowania nowej konstrukcji kompozytowych wstawek hamulcowych oraz budowy modelu numerycznego hamowania
Fig. 2. Scheme of work out new construction of composite brake shoe and building numerical model of this system

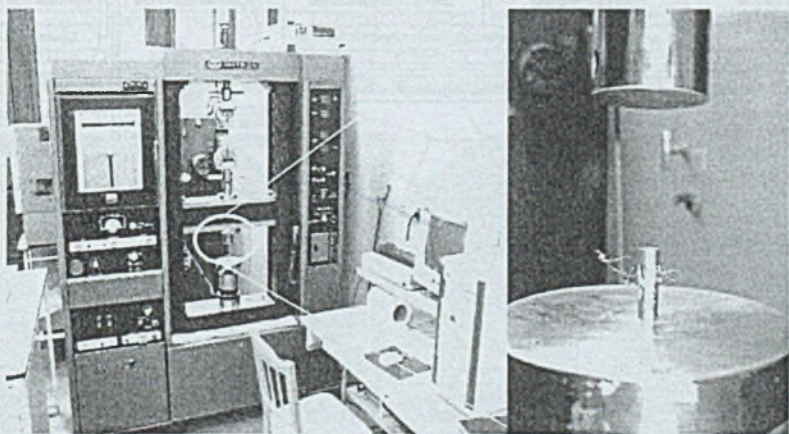
Dlatego teŝ głównym celem prowadzonych prac, jest utworzenie nowej konstrukcji kompozytowych wstawek hamulcowych oraz opracowanie metodyki badań, a także analizy numerycznej obciąŝeń cieplnych i mechanicznych zachodzących w układzie koło - kłócek hamulcowy w trakcie hamowania pociągu - rys. 2.

Opracowany model numeryczny zjawisk zachodzących w badanym układzie pozwoli, juŝ w fazie projektowania wstawek hamulcowych wykonanych z nowych materiałów kompozytowych, na analizę obciąŝeń cieplnych i mechanicznych układu, bez konieczności przeprowadzania kosztownych badań stanowiskowych.

Celem nadrzędnym jest opracowanie systemu do optymalizacji konstrukcji wstawki hamulcowej w kierunku minimalizacji napręŝeń generowanych w trakcie hamowania pociągu oraz minimalizacji zuŝycia koła i wstawki hamulcowej. Założono, że system ten wykorzystuje algorytm ewolucyjny do generowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych przy jednoczesnej ocenie uzyskanych wyników obliczeń poprzez sprzęgnięcie go z programem wykorzystującym metodę elementów skończonych.

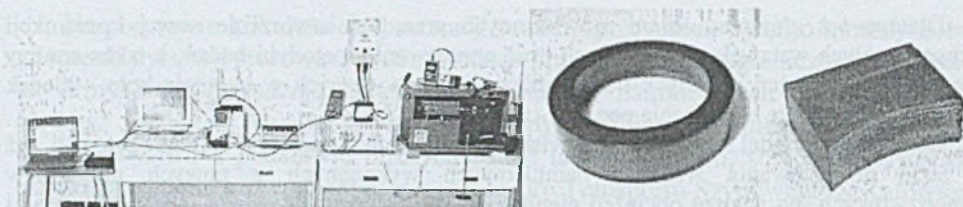
2. BADANIA LABORATORYJNE, STANOWISKOWE I EKSPLOATACYJNE

Przeprowadzenie w pierwszej kolejności badań laboratoryjnych materiałów przeznaczonych na pary cierne (rys. 3) umożliwiło równoległe opracowanie modelu numerycznego zjawisk zachodzących podczas hamowania pociągu w rozpatrywanym układzie oraz wykonywanie badań stanowiskowych i eksploatacyjnych. Podczas tych badań wyznaczono podstawowe własności mechaniczne oraz termiczne badanych materiałów, takie jak: moduł Younga, współczynnik Poissona, współczynnik rozszerzalności, emisji i przewodnictwa cieplnego badanych materiałów.



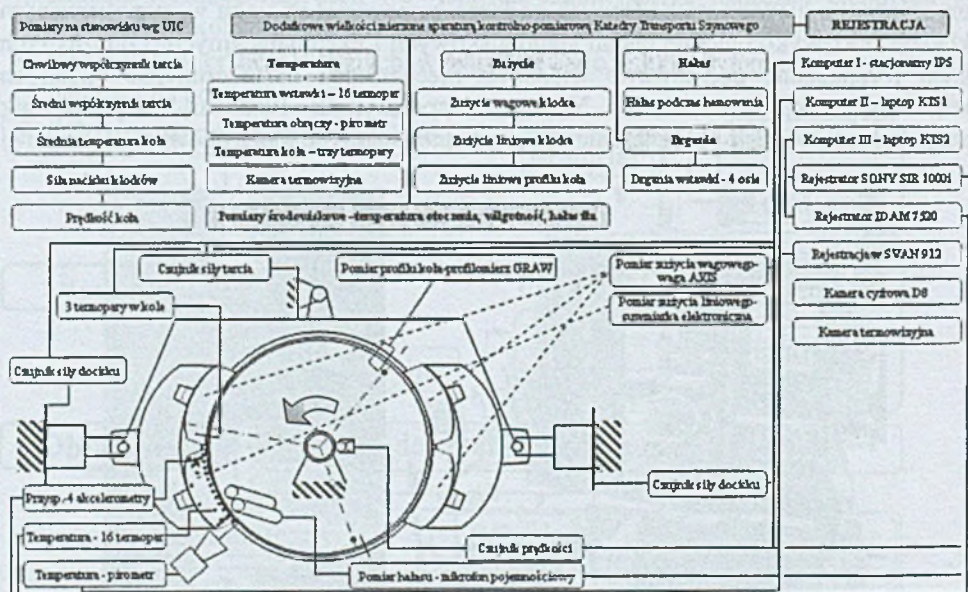
Rys. 3. Stanowisko do wyznaczania własności mechanicznych badanych materiałów
Fig. 3. Stand to determine mechanical and thermal properties of researched material

Do badań stanowiskowych przeznaczono szereg materiałów: tworzywa kompozytowe, spieki oraz ŝeliwo P10 w celach porównawczych. Próby te przeprowadzono na stanowisku trybologicznym T-05, gdzie badano pary cierne: model koła - pierścień (stal B2N) oraz model wstawki hamulcowej, wykonane w skali 1:50 - rys. 4.



Rys. 4. Badania trybologiczne dla par ciernych wykonanych z różnych materiałów
Fig. 4. Research of tribology properties for different friction material

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań na stanowisku T-05 wybrano te materiały, których własności trybologiczne oraz eksploatacyjne najlepiej spełniały wymagania stawiane klockom hamulcowym. Następnym etapem prowadzonych prac było wykonanie badań na stanowisku bezwładnościowym w skali rzeczywistej. Badania te były wykonywane zgodnie z zaleceniami karty UIC 541-4 dla różnych warunków eksploatacyjnych (różne naciski, prędkości początkowe, masy hamujące, temperatury początkowe koła oraz różne warunki pogodowe). Schemat wielkości mierzonych w trakcie badań stanowiskowych oraz wykaz przyrządów pomiarowych przedstawiono na rys. 5.

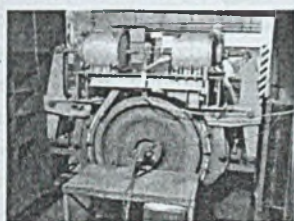


Rys. 5. Schemat systemu pomiarowego do badań na stanowiskach bezwładnościowych w skali rzeczywistej dla układu koło - kłosek hamulcowy

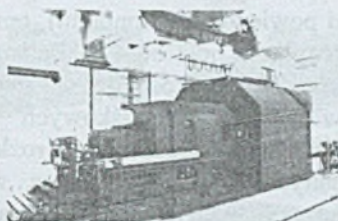
Fig. 5. Scheme of measurement system for research on real scale stand of wheel - brake shoe system

Głównym celem badań stanowiskowych było sprawdzenie własności trybologicznych i eksploatacyjnych badanych klocków hamulcowych w warunkach zbliżonych do warunków rzeczywistych. Jednak poprzez wykonanie prób wg programu badań przewidzianego przez kartę UIC 541-4 dla klocków o różnej

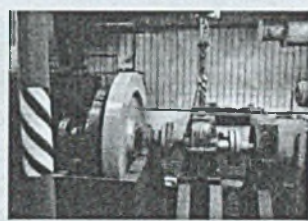
geometrii oraz wykonanych z różnych materiałów możliwe było przeanalizowanie wpływu rozmieszczenia i wielkości dylatacji na własności eksploatacyjne i trybologiczne układu koło - klocek hamulcowy. Otrzymane wyniki tych badań umożliwiły opracowanie cytowanych wcześniej wniosków dotyczących celowości stosowania dylatacji we wstawkach hamulcowych oraz ich wpływu na podstawowe parametry trybologiczne i eksploatacyjne. Ze względu na dużą ilość przeprowadzonych prób hamowania w różnych warunkach eksploatacyjnych badania te umożliwiły porównanie wyników uzyskanych z obliczeń numerycznych z wynikami zarejestrowanymi w trakcie badań. Badania stanowiskowe przeprowadzone były na stanowiskach bezwładnościowych w skali rzeczywistej w trzech jednostkach badawczych: w Poznaniu, w Warszawie oraz w Żylinie (Słowacja). Widok tych stanowisk pokazano na rys. 6.



Stanowisko bezwładnościowe w Instytucie Pojazdów Szynowych "Tabor" Poznań



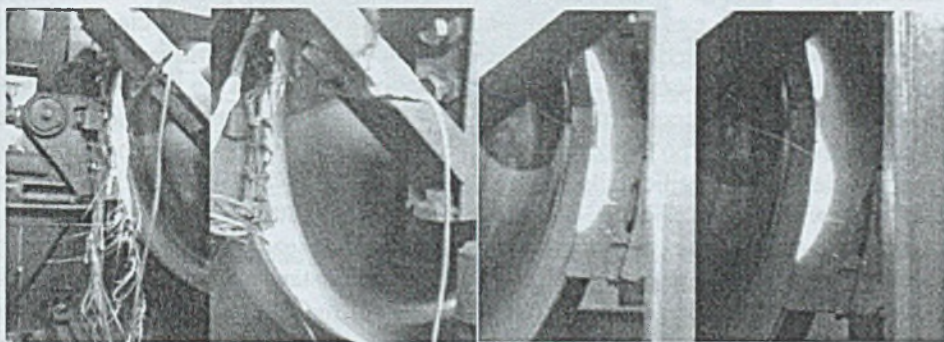
Stanowisko bezwładnościowe w Centrum Naukowo - Technicznym Kolejnictwa w Warszawie



Stanowisko bezwładnościowe na Uniwersytecie Technicznym w Żylinie

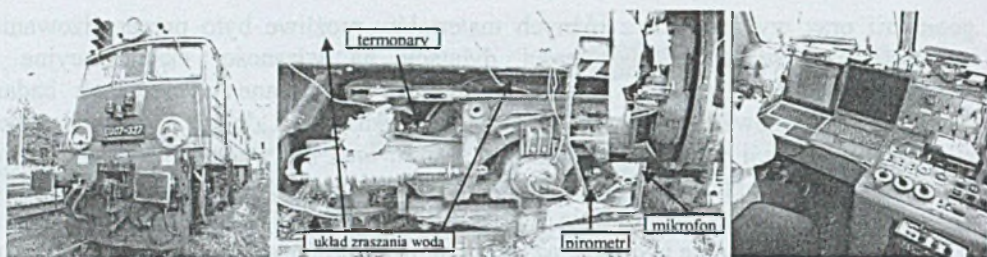
Rys. 6. Widok stanowisk do badań kolejowych klocków hamulcowych w skali rzeczywistej
Fig. 6. The view of real scale stand to research railway brake shoe

Jednym ze zjawisk mających istotny wpływ na proces hamowania pociągu są zjawiska termiczne. Pokazane na rys. 7 widoki stanowiska badawczego w Żylinie ukazują skalę istotności zjawisk cieplnych w układzie koło - klocek hamulcowy.



Rys. 7. Skala zjawisk termicznych zachodzących podczas zahamowań długotrwałych
Fig. 7. Scale of thermal phenomena proceeded during long time braking

Kolejnym etapem prowadzonych prac było wykonanie badań eksploatacyjnych dla klocków hamulcowych wybranych na podstawie wcześniejszych badań stanowiskowych. Badania te miały na celu potwierdzenie wyników uzyskanych w trakcie badań stanowiskowych oraz wzbogacenie wiedzy na temat badanego układu o zjawiska zachodzące podczas eksploatacji.



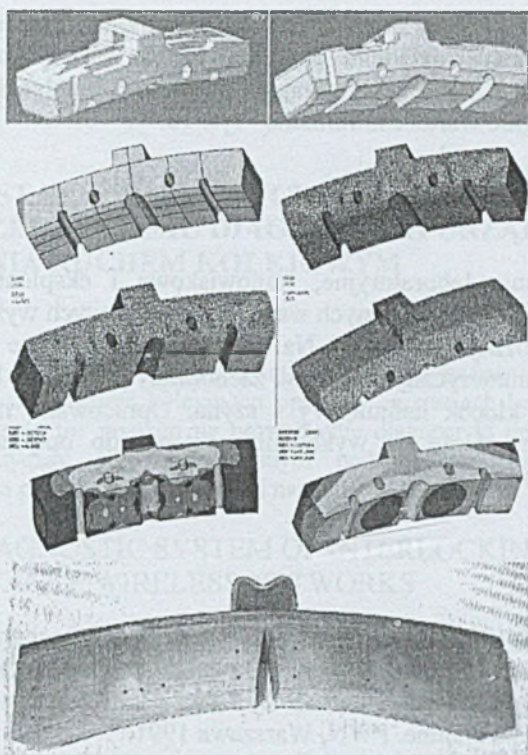
Rys. 8. Lokomotywa wytypowana do badań eksploatacyjnych

Fig. 8. Chosen locomotive for exploitation research

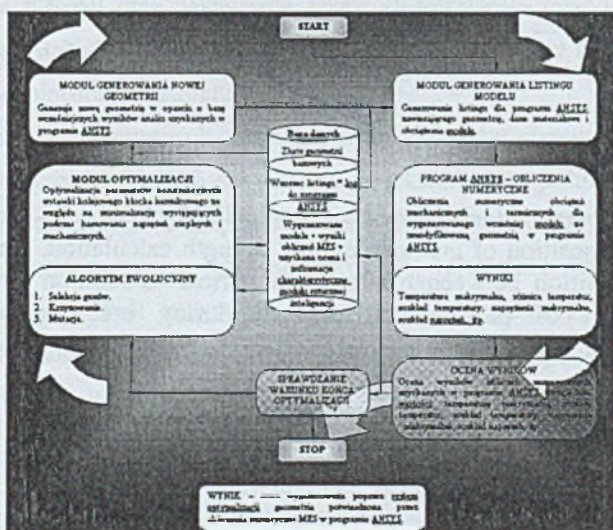
W trakcie tych badań rejestrowano nie tylko drogę i czas hamowania pojazdu (jak wymaga tego norma UIC), ale jednocześnie temperaturę w szesnastu punktach wstawki (w tym 7 mm pod powierzchnią kontaktu), temperaturę powierzchni klocka hamulcowego, obręczy, tarczy koła oraz obsady. Badania prowadzono w warunkach "na mokro" i "na sucho" z różnych prędkości początkowych hamowania. Pozwoliło to na porównanie rezultatów badań stanowiskowych oraz eksploatacyjnych oraz bezpośrednie porównanie dróg hamowania, a także rozkładu temperatur dla wstawek kompozytowych i wykonanych z żeliwa P10 w warunkach eksploatacyjnych. Otrzymane wyniki badań pozwoliły również na weryfikację poprawności opracowanych modeli numerycznych zjawisk zachodzących w układzie koło - kłosek hamulcowy - szyna w warunkach hamowania pociągu.

3. MODEL NUMERYCZNY ZJAWISK ZACHODZĄCYCH PODCZAS HAMOWANIA POCIĄGU

Dokładny model zjawisk zachodzących podczas hamowania pociągu dla rozpatrywanego układu jest trudny do wykonania ze względu na złożoność zachodzących procesów. Dlatego też modelując rozpatrywany układ model zdekomponowano na część termiczną i mechaniczną oraz model zużycia i przepływu powietrza. Wynikiem działania modelu będzie superpozycja otrzymanych wyników z modelu zjawisk termicznych oraz mechanicznych. Wyniki w postaci rozkładu prędkości strugi powietrza z modelu przepływu zostaną wyeksportowane do modelu zjawisk termicznych po wcześniejszym wyznaczeniu wartości współczynników wymiany ciepła z otoczeniem dla każdego punktu układu. Następnie rezultaty obliczeń modelu zjawisk termicznych w postaci rozkładu temperatur, zostaną przeliczone na obciążenia mechaniczne w oparciu o wyznaczone podczas badań laboratoryjnych współczynniki rozszerzalności cieplnej - rys. 9. Na podstawie wyników uzyskanych z modelu obciążeń termicznych, mechanicznych oraz modelu przepływu wyznaczone zostanie zużycie liniowe i objętościowe klocków hamulcowych i koła. Kolejnym etapem prowadzonych prac będzie wykonanie systemu do optymalizacji konstrukcji wstawki hamulcowej ze względu na minimalizację naprężeń cieplnych i mechanicznych oraz zużycia elementów układu. System ten oparto na opisanym modelu numerycznym w połączeniu z algorytmem ewolucyjnym. Algorytm ewolucyjny posłuży do oceny jakości uzyskanych wyników symulacji numerycznej i na podstawie znajomości genów, które spowodowały poprawę otrzymanych wyników, wygeneruje nową geometrię.



Rys. 9. Kolejne etapy tworzenia modelu numerycznego: system CAD Catia, modele w programach MES oraz finalny produkt klocka hamulcowego
Fig. 9. Following stages of model creating: in CAD system Catia, FEM system and final product



Rys. 10. Schemat systemu optymalizacji konstrukcji wstawki hamulcowej
Fig. 10. Scheme of optimization system for braking shoe

Wygenerowana geometria zostanie przesłana do modeli numerycznych i poddana obliczeniom. Wynikiem działania systemu będzie nowa konstrukcja wstawki hamulcowej, dla której funkcja zawierająca obciążenia cieplne i mechaniczne oraz zużycie układu osiągnie wartość minimalną - rys. 10.

4. WNIOSKI

Wykonane badania laboratoryjne, stanowiskowe i eksploatacyjne umożliwiły porównanie własności trybologicznych wstawek hamulcowych wykonanych z różnych materiałów oraz o różnej konstrukcji. Na ich podstawie możliwe było opracowanie i weryfikacja modeli numerycznych zjawisk zachodzących podczas hamowania pociągu w układzie koło - klocek hamulcowy - szyna. Opracowane modele numeryczne pozwolą w dalszym etapie na wykonanie systemu do optymalizacji konstrukcji nowych wstawek hamulcowych.

Literatura

1. Grant celowy nr 6T120782001C/5667, pt.: "Opracowanie technologii i uruchomienie produkcji nowych wstawek kompozytowych klocka hamulcowego dla polskiego i zagranicznego taboru kolejowego".
2. Orłowski Z.: Naprężenia cieplne. PWN, Warszawa 1991.
3. Szarguta J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa 1992.
4. Taler J.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. WNT, Warszawa 2003.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Piec

Abstract

The paper presents stages of made investigations of wheel - brake shoe - rail system and proposition of methodology of strength calculation. This methodology based on superposition between results of numerical calculation from thermal and mechanical model of phenomenon proceed during braking with possibility construction optimization.

Praca wykonana w ramach badań kierunkowych BK-233/RT-4/2004.