

Adam MAŃKA

OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE KOMPOZYTOWYCH KLOCKÓW HAMULCOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MES

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane problemy związane ze stosowaniem kolejowych klocków hamulcowych wykonanych z żeliwa P10 i propozycję metodyki obliczeń wytrzymałościowych nowych konstrukcji klocków wykonanych z materiałów kompozytowych. Metodykę obliczeń numerycznych oparto na superpozycji wyników otrzymanych z dwóch modeli: modelu zjawisk termicznych i modelu zjawisk mechanicznych zachodzących podczas hamowania. Przedstawiono również schemat optymalizacji konstrukcji klocków hamulcowych ze względu na minimum naprężeń powstających podczas hamowania przy użyciu połączenia programu ANSYS oraz algorytmu ewolucyjnego.

STRENGTH CALCULATION OF COMPOSITE BREAK SHOE WITH FEM UTILIZATION

Summary. The paper present chosen problem with using railway brake shoe made from cast iron P10 and proposition of methodology of strength calculation in railway brake shoe made from composite material. Methodology of numerical calculation based on results superposition from thermal and mechanical model of phenomenon proceed during braking. The paper present also scheme of optimization of railway brake shoe construction with use evolutionary algorithm and program ANSYS.

1. WSTĘP

Stosowane obecnie w polskim taborze kolejowym wstawki klocków hamulcowych wytwarzane są jako odlewy z żeliwa P10. Zarówno opracowane materiały stosowane na wstawki hamulcowe, jak i technologia ich wytwarzania, sięgają lat sześćdziesiątych XX w. Niewielkie modyfikacje składu chemicznego materiału, polegające głównie na dodaniu fosforu w ilości 1%, jedynie nieznacznie skorygowały szereg wad przypisywanych żeliwnym klockom hamulcowym. Podczas hamowania wstawkami wykonanymi z tego materiału bardzo często obserwowano intensywne iskrzenie, które bywało przyczyną pożarów w okolicach torowiska. Dodatkowo hamowaniu w określonych warunkach, szczególnie przy niewielkich prędkościach, towarzyszyło piszczenie wstawek. Częstotliwość generowanego hałasu wahała się w okolicach od 800 do 1000 Hz, czyli częstotliwościach dobrze słyszalnych dla człowieka. Oprócz wymienionych wad, wstawki hamulcowe wykonane z żeliwa wykazywały również brak stabilności współczynnika tarcia dla prędkości hamowania

poniżej 35 [km/h]. Do wymienionych wad można dodać również niską trwałość wstawek hamulcowych wykonanych z żeliwa, co w realiach konieczności funkcjonowania kolei na prawach rynkowych było jednym z głównych powodów prowadzenia prac mających za zadanie poszukiwanie nowych konstrukcji kolejowych wstawek hamulcowych. Równie istotną przyczyną poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych kolejowych wstawek hamulcowych były wymogi stawiane kolejom poprzez przepisy Unii Europejskiej związane z bezpieczeństwem w transporcie szynowym i ochroną środowiska. Dlatego też, podejmowane w Katedrze Transportu Szynowego (KTS) prace związane z projektowaniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych kolejowych wstawek hamulcowych nastawione są na poszukiwanie rozwiązań spełniających zarówno wymogi wytrzymałościowe i eksploatacyjne, jak i wymagania zapewnienia bezpieczeństwa w transporcie i ochronie środowiska [1].

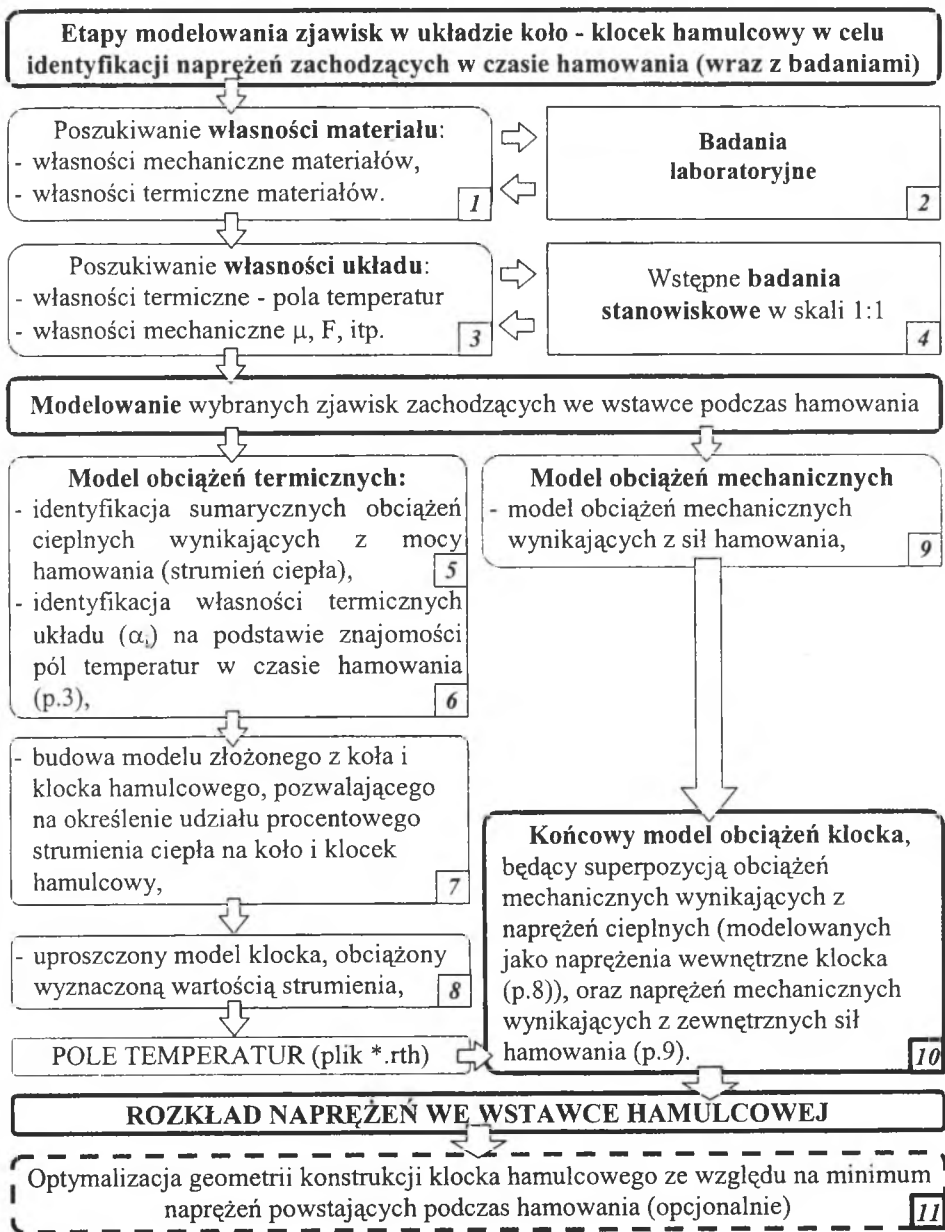
2. METODYKA OBLICZEŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH KOLEJOWYCH KLOCKÓW HAMULCOWYCH

Prowadzone do tej pory prace nad poszukiwaniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych, ograniczały się głównie do wprowadzania zmian składu chemicznego materiału stosowanego na wstawki hamulcowe, a następnie do wykonywania badań na stanowiskach w skali rzeczywistej poprzez wykonywanie szeregu zahamowań przewidzianych w normach kart UIC i porównywania otrzymanych wyników. Podejście takie nie gwarantuje uzyskania możliwie najlepszych własności wstawek hamulcowych w krótkim okresie czasu. Dlatego też w Katedrze prowadzi się prace nad opracowaniem metodyki poszukiwania metodami inżynierskimi nowych konstrukcji różnych typów kolejowych wstawek hamulcowych poprzez stosowanie obliczeń wytrzymałościowych z wykorzystaniem MES.

Wymagania stawiane klockom hamulcowym wynikają głównie z ekstremalnych obciążeń termicznych oraz obciążeń mechanicznych powstających podczas hamowania. Dlatego też, w celu zamodelowania naprężeń powstających w trakcie hamowania we wstawce hamulcowej należy wziąć pod uwagę naprężenia mechaniczne pochodzące od zmian temperatur oraz występujące jednocześnie naprężenia mechaniczne wynikające z sił hamowania. Złożoność zjawisk zachodzących podczas hamowania spowodowała konieczność dekompilacji zadania modelowania na dwie części: modelowanie zjawisk termicznych oraz modelowanie zjawisk mechanicznych. Wyniki pól temperatur uzyskane z pierwszej części można zaimportować do modelu obciążeń mechanicznych. Różnice temperatur w modelu obciążeń mechanicznych przeliczane są na naprężenia mechaniczne. Tak obciążony model obciążony jest następnie siłami wynikającymi z hamowania, a uzyskane wyniki naprężeń we wstawce hamulcowej stanowią superpozycję naprężeń wynikających z obciążeń termicznych i mechanicznych powstających podczas hamowania.

W wyniku kolejnych prób modelowania zjawisk zachodzących we wstawce hamulcowej podczas hamowania opracowano schemat ich modelowania – rys.1. Schemat ten uwzględnia konieczność identyfikacji wielu wartości wielkości fizycznych charakteryzujących zarówno stosowane materiały, jak i cały układ koło –

kłosek hamulcowy. Schemat postępowania przy modelowaniu nowej konstrukcji klocków hamulcowych składa się z kilku etapów.



Rys. 1. Schemat metodyki obliczeń wytrzymałościowych kolejowych klocków hamulcowych
Fig. 1. Scheme of methodology of strength calculation in railway brake shoe

Zakłada się wstępnie, że na wejściu do procesu modelowania znajduje się nowy materiał konstrukcyjny, którego przydatność do wykorzystania na kolejowe klocki hamulcowe zostanie poddana weryfikacji w późniejszym etapie poprzez wstępne badania stanowiskowe (p.4, rys.1). Założono również możliwość optymalizacji geometrii konstrukcji klocka hamulcowego ze względu na minimum naprężeń wynikających ze zjawisk cieplnych i mechanicznych występujących podczas hamowania (rys. 1- p.11, rys. 6).

Chcąc przeprowadzić obliczenia wytrzymałościowe klocków hamulcowych o nowej konstrukcji, należy posiadać szereg wartości różnych wielkości fizycznych opisujących własności cieplne i mechaniczne badanego materiału. Podstawowe wielkości opisujące własności mechaniczne przedstawia tablica 1, tablica 2 natomiast - własności termiczne badanych materiałów.

Tablica 1

Własności mechaniczne materiału

Lp.	Własności mechaniczne materiału Mechanical property	Jednostka Unit
1	Gęstość (Density ρ)	[g/cm ³]
2	Moduł Younga E (Young's modulus)	[Pa]
3	Współczynnik Poissona ν (Poisson's modulus)	

Tablica 2

Własności termiczne materiału

Lp.	Własności termiczne materiału Thermal property	Jednostka Unit
1	Współczynnik rozszerzalności cieplnej Thermal expansion coefficient α	[K ⁻¹]
2	Współczynnik emisji cieplnej Thermal emission coefficient	
3	Ciepło właściwe Specific heat c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
4	Współczynnik przewodnictwa cieplnego Thermal conduction coefficient- conductivity λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

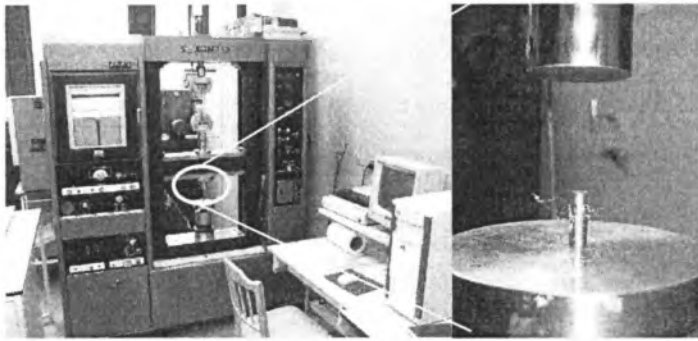
Chcąc zamodelować podstawowe zjawiska zachodzące we wstawce podczas hamowania, należy oprócz własności opisujących materiał, posiadać informacje o wartościach parametrów opisujących układ koło – kłosek hamulcowy – tablica 3.

Tablica 3

Podstawowe własności mechaniczne, termiczne
i konstrukcyjne układu

Lp.	Własność układu Mechanical property	Jednostka Unit
1	Współczynnik tarcia w funkcji prędkości, nacisku i temperatury Friction coefficient	
2	Współczynnik przejmowania ciepła α' dla powierzchni zewnętrznych klocka i koła Convection (film) coefficient	[W/m ² K]
3	Przestrzenna geometria koła i klocka hamulcowego Three-dimensional geometry of wheel and brake shoe	(rysunki 2 i 3D)

Poszukiwanie wartości wielkości fizycznych niezbędnych do prawidłowego zamodelowania układu klocki – koło hamulcowe powinno stanowić pierwszy etap prac (rys. 1 p.1 i p.3). Podczas prac prowadzonych przez Katedrę do wyznaczenia własności mechanicznych materiału wykorzystano próbki z badanych materiałów i przeprowadzono badania na maszynie wytrzymałościowej INSTRON (rys. 2). Wstępne badania stanowiskowe (rys.1 p.4) przeprowadza się w celu wstępnego określenia przydatności badanego materiału na wstawki hamulcowe, a także w celu wyznaczenia wartości współczynnika tarcia w funkcji prędkości, nacisku i temperatury próbki.



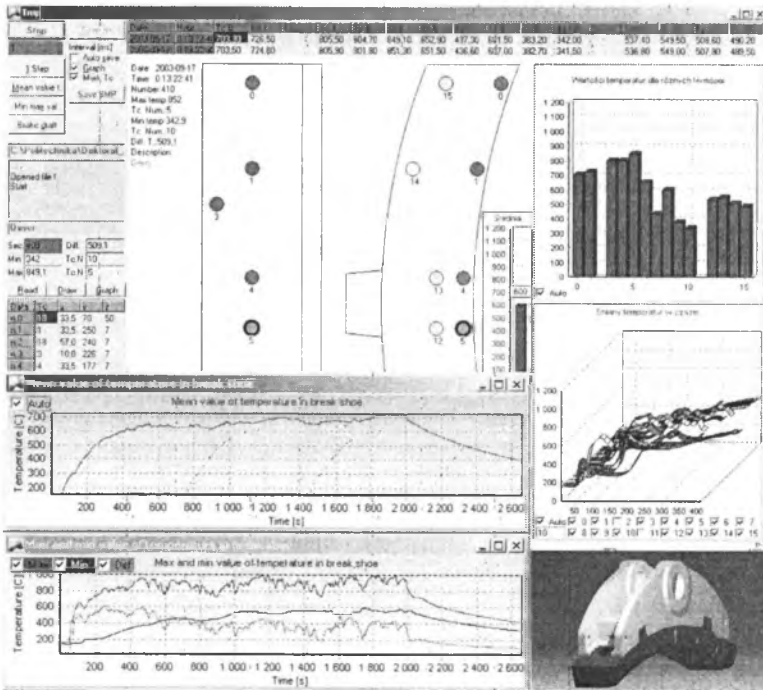
Rys. 2. Badania własności mechanicznych materiału
Fig. 2. Research of material mechanical property

Dla danej grupy materiałów, ze względu na duży wpływ współczynnika przyjmowania ciepła na dokładność wyników obliczeń pól temperatur, celowe jest również wykonanie badań zgodnych z wymaganiami kart UIC 504-1 na stanowisku bezwładnościowym w skali 1:1 (rys. 1, p.6). Wykonane w Katedrze badania zmian pól temperatur pozwoliły wyznaczyć wartości współczynnika przyjmowania ciepła poprzez konwekcję α_i , dla wszystkich powierzchni wstawki hamulcowej. Wielkości te są trudne do wyznaczenia na drodze analitycznej ze względu na ich silną zależność od geometrii i temperatury wstawki, prędkości i temperatury strugi przepływającego powietrza oraz rodzaju stosowanego na wstawki materiału. Wielkości te nie są również dostępne w literaturze (znane są jedynie współczynniki α_i dla typowych kół kolejowych). Wyznaczenie współczynników przyjmowania ciepła (α_i) dla wszystkich powierzchni wstawki było możliwe dzięki rejestracji wartości temperatur w szesnastu punktach wstawki i późniejszej wizualizacji przebiegu zmian pól temperatur. Przykład otrzymanych przebiegów i pól temperatur po wizualizacji w specjalnie napisanym do tego celu programie "Tmp_1" przedstawiono na rysunku 3.

Wartości współczynników przyjmowania ciepła, otrzymano poprzez porównanie przebiegów i pól temperatur wstawki hamulcowej uzyskane na podstawie badań stanowiskowych z wynikami otrzymanymi w programie ANSYS i kolejnymi zmianami wartości tych współczynników aż do momentu uzyskania rozkładu temperatur we wstawce wystarczająco zbliżonych do wyników badań.

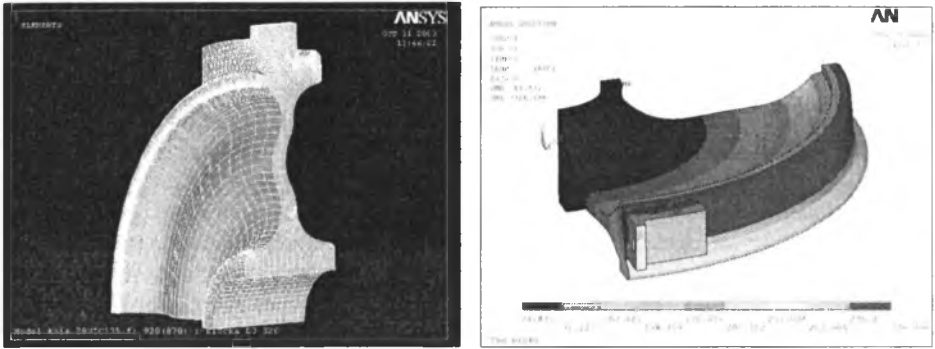
Wykonany, w programie ANSYS, model układu koło – klocki hamulcowy jest obciążany sumarycznym strumieniem cieplnym o wartości wynikającej z mocy

hamowania zastosowanej podczas badań stanowiskowych (założenie całkowitej zamiany mocy hamowania na ciepło procesu tarcia). Otrzymane iteracyjnie wartości α ; będzie można wielokrotnie wykorzystywać dla obliczeń termicznych wstawek hamulcowych wykonanych z materiałów o podobnych własnościach termicznych bez konieczności powtórzenia ich wyznaczania na bazie porównania wstępnych wyników badań z polami temperatur w modelu wstawki wygenerowanymi przez program ANSYS. Oprócz wartości współczynników α , również wartość procentowego udziału całkowitego strumienia ciepła działającego na wstawkę jest wielkością znaną w literaturze tylko dla żeliwa P10 (30% całkowitego strumienia ciepła oddziałuje na wstawkę). Dlatego też w celu uproszczenia dalszych etapów obliczeń numerycznych, zbudowano odpowiedni model numeryczny układu koło - klocek hamulcowy, pozwalający na określenie tej wartości dla danego materiału (rys.1, p.7). Model ten zawiera koło i klocek hamulcowy o geometrii zgodnej z geometrią układu wykorzystywanego do badań stanowiskowych.



Rys. 3. Program "Tmp_1" z wykresami zmian wartości temperatur we wstawce
 Fig. 3. Program "Tmp_1" with chart of temperature value in break shoe

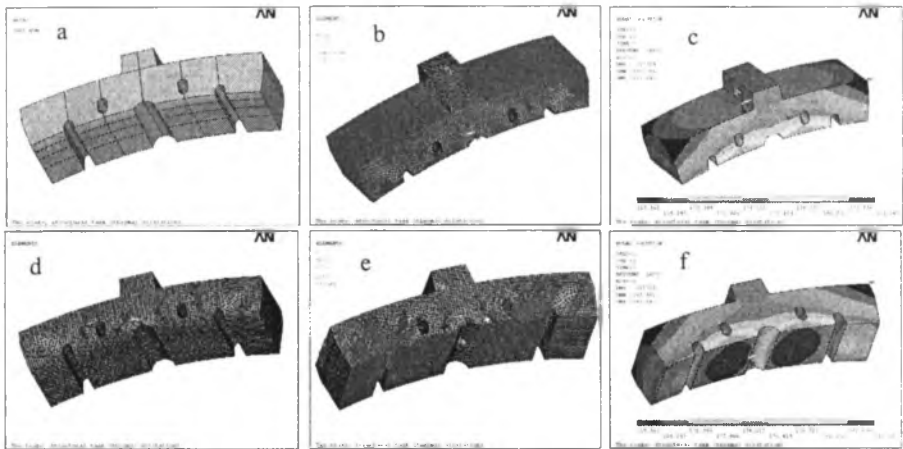
Biorąc pod uwagę, że przedstawiony układ jest symetryczny, zamodelowano wyłącznie połowę klocka i jedną czwartą koła - rys.4. Po wyznaczeniu udziału procentowego strumienia ciepła, które działa na wstawkę hamulcową, następny etap obliczeń, w tym optymalizację (rys.1. p.11) przeprowadzać można na modelu, który nie zawiera już koła (eliminacja dużej liczby równań, koniecznych do rozwiązania w MES).



Rys. 4. Model układu koło - klocek hamulcowy do wyznaczania procentowego udziału całkowitego strumienia ciepła

Fig. 4. Model of wheel - brake shoe system for participation of heat flux in percentage term evaluate

Do dalszych etapów obliczeń wytrzymałościowych wykorzystany jest model samego klocka hamulowego (rys. 5a).



Rys. 5. Uproszczony model numeryczny klocka hamulowego

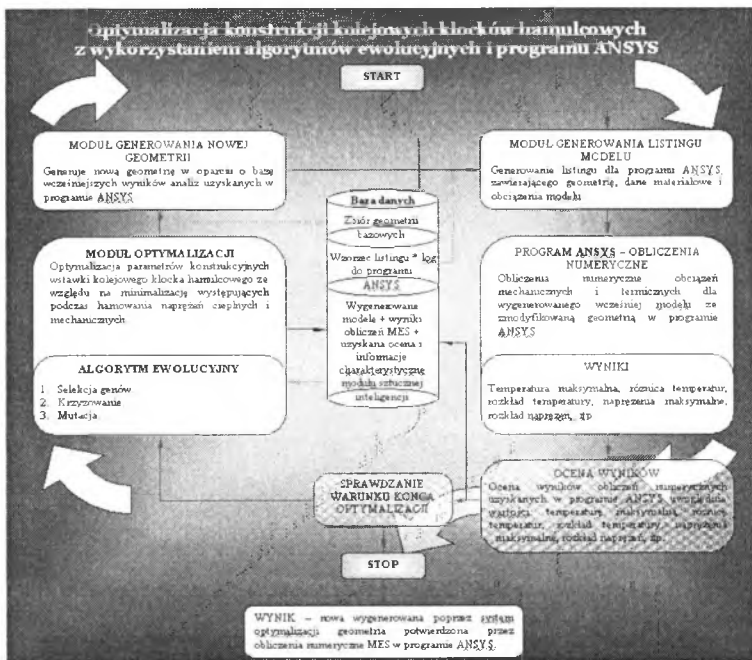
Fig. 5. Reduced of brake shoe numerical model

Do obliczeń naprężeń wynikających z obciążeń cieplnych wykorzystuje się model klocka obciążony strumieniem cieplnym na powierzchni kontaktu – o wcześniej wyznaczonej wartości - rys. 5e. Pozostałym powierzchniom przypisuje się konwekcję o wartościach wyznaczonych na podstawie wcześniejszych analiz, co pokazano na rysunku 1 - p.5,6,7 i 5b. Wyznaczone w ten sposób pola temperatur stanowią obciążenie początkowe dla dalszych obliczeń wytrzymałościowych wynikających z

obciążeń mechanicznych - rys.5 c,f. Końcowy wynik pola naprężeń stanowi superpozycję naprężeń wynikających z obciążeń termicznych i mechanicznych.

3. PROJEKT OPTYMALIZACJI KONSTRUKCJI KOLEJOWYCH KLOCKÓW HAMULCOWYCH

Na podstawie prowadzonych badań i przeprowadzonej analizy literaturowej można stwierdzić, że oprócz własności stosowanego na klocki hamulcowe materiału, znaczący wpływ na rozkład i wielkość naprężeń we wstawce powstających w czasie hamowania ma również jego geometria. Dlatego też kolejnym etapem prowadzonych prac będzie opracowanie algorytmu optymalizacji konstrukcji wstawki ze względu na minimum naprężeń powstałych podczas hamowania. Projekt takiego algorytmu przedstawiony został na rysunku 6.



Rys. 6. Optymalizacja konstrukcji wstawek kolejowych klocków hamulcowych przy użyciu algorytmu ewolucyjnego i programu ANSYS

Fig. 6. Optimization of railway brake shoe construction with use evolutionary algorithm and program ANSYS

Jest on oparty na module generowania nowej geometrii wstawki (ukształtowanie dylatacji) na podstawie wcześniejszych rezultatów obliczeń otrzymanych w programie ANSYS. Wynikiem obliczeń omawianego algorytmu będzie geometria wstawki hamulcowej o zadanych wcześniej ograniczeniach konstrukcyjnych (gabaryty, ograniczenia technologiczne) o takim ukształtowaniu dylatacji, która umożliwi zminimalizowanie naprężeń we wstawce powstałych w wyniku hamowania.

Proponowana metodyka optymalizacji jest odpowiedzią na zaobserwowane u wiodących producentów krajowych i zagranicznych projektowania wstawek o "przypadkowej" geometrii dylatacji i przeprowadzanie wielu kosztownych badań eksperymentalnych w celu określenia możliwie optymalnej konstrukcji.

Przedstawione podejście do projektowania nowych konstrukcji wstawek hamulcowych umożliwi generowanie rozwiązań konstrukcyjnych spełniających wymogi wytrzymałościowe oraz zwiększy bezpieczeństwo w transporcie szynowym, przy jednoczesnej redukcji kosztów wynikających ze znacznie mniejszego zużycia eksploatacyjnego tworzyw kompozytowych.

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. Szarguta J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury, WNT, Warszawa 1992.
3. Orłoś Z.: Naprężenia cieplne, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Piec

Abstract

The paper present proposition of methodology of strength calculation in railway break shoe made from composite material and new geometry. This methodology based on superposition between results of numerical calculation from thermal and mechanical model of phenomenon proceed during breaking with possibility construction optimization.