

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Zastosowanie układu równań cieplnej dynamiki tarcia w obliczeniach MES pól temperatury i naprężeń hamulca tarczowego

Piotr Grześ, Michał Kuciej

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Białostocka  
email: p.grzes@pb.edu.pl, m.kuciej@pb.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W tej pracy zaprezentowano model numeryczny do obliczeń pól temperatury i naprężeń kolejowego hamulca tarczowego. Głównym celem badań było wyznaczenie charakterystyki cieplnej nowego materiału organicznego przeznaczonego na okładziny hamulcowe. W opracowanym modelu obliczeniowym MES uwzględniono sprzężenie prędkości hamowania, współczynnika tarcia, temperatury oraz nacisków kontaktowych. Przeprowadzone symulacje komputerowe hamowania jednokrotnego zweryfikowano na podstawie przebiegów czasowych temperatury tarczy zmierzonych na pełnowymiarowym stanowisku bezwładnościowym w Instytucie Kolejnictwa w Warszawie. Przed przystąpieniem do obliczeń, wyznaczono doświadczalnie właściwości termofizyczne materiału ciernego w zależności od temperatury, a następnie dane te zaadaptowano w programie COMSOL Multiphysics®. Uzyskane zmiany temperatury tarczy w trzech punktach pomiarowych, prędkości pojazdu oraz współczynnika tarcia są zgodne z wynikami badań doświadczalnych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** temperatura, naprężenia, tarcza wentylowana, metoda elementów skończonych

#### 1. Wprowadzenie

Modelowanie pól temperatury par ciernych zarówno za pomocą metod analitycznych jak i numerycznych wymaga przyjęcia szeregu założeń upraszczających zjawisko generacji ciepła na skutek tarcia. W obu przypadkach analizowane są najczęściej procesy hamowania jednokrotnego przy stałej wartości współczynnika tarcia, ciśnienia kontaktowego i liniowo zmniejszającej się prędkości. Uwzględnienie zmienności tych wielkości oraz wzajemnego sprzężenia wymaga rozwiązania układu równań cieplnej dynamiki tarcia i zużycia CDTZ. Zawiera ono zagadnienie początkowe dla równania ruchu, zagadnienie początkowo-brzegowe przewodzenia ciepła, prawo zmiany ciśnienia kontaktowego, doświadczalne zależności właściwości termofizycznych, współczynników tarcia i intensywności zużycia od temperatury, a także prawo wyznaczenia temperatury maksymalnej w postaci sumy temperatury średniej w obszarze kontaktu oraz temperatury błysku [1, 2]. Nadal jednak rozwijane są modele kontaktowe uwzględniające ponadto interakcje współpracujących powierzchni na skutek zmian rozszerzalności cieplnej, siły tarcia i degradacji materiału.

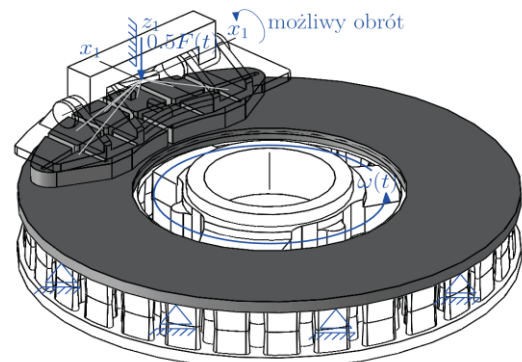
W tej pracy zaproponowano kontaktowy model numeryczny hamulca tarczowego, który uwzględnia sprzężenie prędkości, temperatury, ciśnienia kontaktowego i współczynnika tarcia. Naciski kontaktowe, występujące we wzorze na tarciowy strumień ciepła, wyznaczono na podstawie docisku okładziny do tarczy. W ramach tego modelu ustalono, które parametry i w jakim stopniu wpływają na dokładność obliczeń oraz czas ich prowadzenia. Zmiany temperatury w czasie hamowania porównano z danymi doświadczalnymi.

#### 2. Sformułowanie zagadnienia

Analizowany jest proces hamowania jednokrotnego tarczowego hamulca kolejowego zgodnie z parametrami początkowymi przyjętymi podczas badań stanowiskowych (rys. 1). Należą do nich masa hamowana przypadająca na jeden układ hamulcowy  $G = 5\text{ t}$ , symulowana prędkość początkowa pojazdu  $V_0 = 80\text{ km/h}$  oraz siła docisku okładzin do tarczy  $F$ , którą aproksymowano do postaci eksponencjalnej:

$$F(t) = F_m(1 - e^{-t/t_m}) \quad (1)$$

gdzie:  $F_m = 20\text{ kN}$  – nominalna wartość siły docisku,  
 $t_m = 1,5\text{ s}$  – czas narastania siły docisku.



Rys. 1. Model CAD hamulca z warunkami brzegowymi

Poza podstawowymi parametrami operacyjnymi rejestrowanymi podczas badania, dokonano pomiaru temperatury w sześciu punktach, po trzy na każdą stronę

tarczy hamulcowej, 1 mm pod powierzchnią tarcia. Punkty oznaczone T1-T3 były rozmieszczone co 120° odpowiednio na promieniu  $r_{eq} - 40$  mm,  $r_{eq}$  oraz  $r_{eq} + 40$  mm zgodnie z wytycznymi Karty UIC [3].

Na podstawie zadanej siły docisku  $F(t)$  oraz zmierzonej na stanowisku badawczym wypadkowej siły tarcia  $F_t(t)$ , wyznaczono przebiegi czasowe współczynnika tarcia badanej pary czarnej. Następnie dane te aproksymowano w programie Surfer.

### 3. Symulacje komputerowe hamowania z wykorzystaniem metody elementów skończonych

Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych wykorzystano moduł Thermal Stresses w programie COMSOL Multiphysics®. Stanowi on połączenie modułów Heat Transfer, Structural Analysis oraz Thermal Expansion, które dotyczą obliczeń temperatury i naprężeń z uwzględnieniem rozszerzalności cieplnej materiałów.

W obszarze nagrzewania, wprowadzono warunek strumienia ciepła generowanego podczas tarcia:

$$q(r, \theta, 0, t) = f(V, T_{av1-3})r\omega(t)p(r, \theta, 0, t) \quad (1)$$

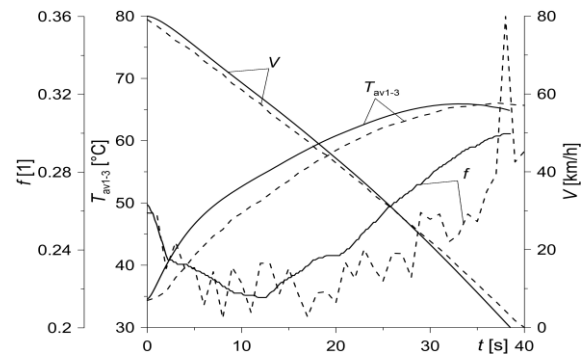
gdzie:  $\omega(t)$  – prędkość kątowna tarczy,  $p(r, \theta, 0, t)$  – ciśnienie kontaktowe wyznaczane z rozwiązania kontaktowego.

Rozdział strumieni ciepła skierowanych do tarczy i okładziny hamulcowej wyznaczony został za pomocą wzoru Charrona z uwzględnieniem wrażliwości termicznej materiałów oraz cieplnej przewodności kontaktowej równej 2 kW/(m<sup>2</sup> K).

W celu obliczenia naprężeń, odebrano wszystkie niezbędne stopnie swobody (rys. 1). Za pomocą specjalnego elementu Rigid połączono górne powierzchnie okładziny i odebrano przemieszczenia w kierunku  $x_1$  i  $y_1$ . Pozostawiono możliwość przesuwania w kierunku  $z_1$  oraz obrót względem osi  $x_1$ . Na cylindrycznej ścianie wewnętrznej tarczy odebrano obrót względem osi głównej tarczy. Na ścianie tarczy położonej w płaszczyźnie symetrii dodano warunek przesuwania. Symulację ruchu obrotowego tarczy zrealizowano za pomocą narzędzi Translational Motion w module Heat Transfer oraz warunku Slip Velocity dostępnego w module Structural Analysis.

### 4. Wyniki i dyskusja

Uśrednione przebiegi czasowe temperatury tarczy w trzech punktach T1-T3, zmiany współczynnika tarcia oraz prędkości pojazdu obliczone za pomocą MES oraz zmierzone na pełnowymiarowym stanowisku dynamometrycznym pokazano na rys. 2. Istotnym czynnikiem wpływającym na pole temperaturowe tarczy i okładziny była aproksymacja danych doświadczalnych do utworzenia zależności współczynnika tarcia od temperatury i prędkości. Posłużono się wartością średnią z sześciu termopar. Natomiast w ramach prezentacji wyników porównano pomiary z trzech termopar przypadających na jedną stronę tarczy. Ponadto jak ustalono, pominięcie przewodności cieplnej kontaktowej prowadziło do zaniżenia temperatury tarczy, natomiast odwrotny efekt występował przy warunku idealnego kontaktu cieplnego.



Rys. 2. Zmiany  $T_{av1-3}$ ,  $f$ , i  $V$  podczas hamowania (linie przerywane – badania doświadczalne, linie ciągłe – MES)

Tabela 1. Właściwości materiałów hamulca [4]

	Tarcza (żeliwo)	Okładzina (kompozyt organiczny)
$E$ [GPa]	110	1,32
$\nu$ [-]	0,28	0,3
$\alpha$ [1/K]	$11 \cdot 10^{-6}$	$42,3 \cdot 10^{-6}$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7200	1787
$K$ [W/(m K)]	52	$K(T)$
$c$ [J/(kg K)]	447	$c(T)$

### 5. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań zaprezentowano wyniki symulacji komputerowej hamowania jednokrotnego. Nowatorskim elementem pracy jest przeprowadzanie obliczeń numerycznych z uwzględnieniem wzajemnej zależności pól temperatury, prędkości poślizgu, nacisków kontaktowych, współczynnika tarcia i rozszerzalności cieplnej materiałów. Na podstawie otrzymanych wyników sformułowano następujące wnioski:

- 1) wyznaczone numerycznie ewolucje temperatury tarczy oraz zmiany prędkości zgadzają się z odpowiednimi przebiegami uzyskanymi z pomiarów stanowiskowych,
- 2) powiązanie wszystkich parametrów hamowania w jednej symulacji wymaga bardzo długiego czasu obliczeń, stąd szczególnie ważne jest uwzględnienie tylko najistotniejszych cech nagrzewania tarcowego.

Praca została wykonana w ramach projektu Nr 2017/27/B/ST8/01249, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

### Literatura

- [1] Grzes P., Determination of the maximum temperature at single braking from the FE solution of heat dynamics of friction and wear system of equations, Numer. Heat Transf. Part A Appl., Vol. 71, No. 7, pp. 737-753, 2017.
- [2] Chichinadze A.V., Processes in heat dynamics and modelling of friction and wear (dry and boundary friction), Tribol. Int., Vol. 28, pp. 55-58, 1995.
- [3] UIC 541-3 – Disc brakes and their application – General conditions for the certification of brake pads, 8th edition, March, 2017.
- [4] Grzes P., Yevtshenko A., Kuciej M., Wasilewski P., Influence of the metallic fibres of the material of the lining on temperature of the railway disc brake – experimental study and numerical calculations, The 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (25th ICTAM-Virtual), Virtual 2021.