

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Modelowanie numeryczne zużycia okładziny ciernej kolejowego hamulca tarczowego

Michał Kuciej, Piotr Grześ

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

STRESZCZENIE: W tej pracy zaprezentowano przestrzenne modele numeryczne hamulca tarczowego do wyznaczenia zużycia okładziny z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nagrzewania tarciovego. Wykonane obliczenia odpowiadały parametrom hamowania na pełnowymiarowym stanowisku bezwładnościowym ze stałą mocą hamowania. W modelach MES hamulca, głębokość zużycia wyznaczano na podstawie prawa Archarda z rozkładów ciśnienia występujących przy zadanych przebiegach czasowych siły docisku, współczynnika tarcia oraz przy stałej prędkości obrotowej tarczy. W tym celu zastosowano specjalne narzędzia do deformacji geometrii oraz powtórnej generacji siatki elementów skończonych dostępne w programie COMSOL Multiphysics®. W modelu geometrycznym zastosowano uproszczenia polegające na usunięciu żeber tarczy. Współczynniki intensywności zużycia badanego materiału ciernej skojarzonego z żeliwną tarczą otrzymano na podstawie symulacji MES oraz pomiaru masy przed i po przeprowadzeniu badania na stanowisku dynamometrycznym. Obliczone rozkłady zużycia, nacisków kontaktowych oraz temperatury pozwalają na ocenę jakościową i ilościową procesu tarcia dla nowych mieszanek ciernych.

SŁOWA KLUCZOWE: naciski kontaktowe, zużycie, okładzina cierna hamulca kolejowego, metoda elementów skończonych

1. Wprowadzenie

Do trzech głównych mechanizmów biorących udział w procesach tarcia i zużycia w hamulcach ciernych zalicza się [1]:

- 1) siły adhezji. Składniki materiału ciernej łączą się z nierównościami przeciwległej powierzchni, a następnie na skutek ruchu względnego tworzy się siła tarcia,
- 2) zużycie ściernie. Składniki materiału okładziny ścierają współpracujące powierzchnie,
- 3) deformacje. Materiał ciernej odkształca się w wyniku ścinania międzyfazowego, a jego wysoka histereza powoduje, że praca deformacji występuje w postaci ciepła.

Do parametrów decydujących o intensywności zużycia należą przede wszystkim twardość materiału, temperatura, prędkość poślizgu i ciśnienie kontaktowe. Opis wzajemnych zależności tych wielkości stanowi układ cieplnej dynamiki tarcia i zużycia CDTZ [2]. Jakkolwiek proces zużycia współpracujących powierzchni prowadzi do wyrównywania ciśnienia kontaktowego, to zmiany temperatury mogą zaburzać te tendencje. Przegląd aktualnie stosowanych modeli matematycznych procesów tarcia i zużycia zawarto w pracach [3, 4].

Symulacje procesu tarcia do obliczeń nacisków kontaktowych oraz zużycia w hamulcu tarczowym za pomocą metody elementów skończonych przeprowadzono w artykule [5]. Opis modelowania numerycznego procesu nagrzewania tarciovego za pomocą metody elementów skończonych w kontekście procesu zużycia z uwzględnieniem skali mikro zawarto w pracy [6]. Jako alternatywne podejście w stosunku do klasycznej metody elementów skończonych w celu analizy zużycia materiału, zaproponowano powiązanie MES z metodami

bezsiatkowymi smoothed particle hydrodynamics (SPH). Jak ustalono takie hybrydowe podejście, radykalnie skraca czas prowadzenia obliczeń zużycia w procesie nagrzewania tarciovego.

W tej pracy rozbudowano model numeryczny MES hamulca tarczowego do obliczeń zużycia [7], o złożony kształt okładziny hamulcowej pojazdu kolejowego, przy jednoczesnym uwzględnieniu zmian w czasie współczynnika tarcia, siły docisku oraz temperatury. Współczynniki intensywności zużycia k_{wear} z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nagrzewania tarciovego nowego organicznego materiału ciernej wyznaczono na podstawie obliczeń MES oraz masy okładzin zmierzonej przed i po badaniu hamowania ciągłego przy stałej mocy na pełnowymiarowym stanowisku bezwładnościowym.

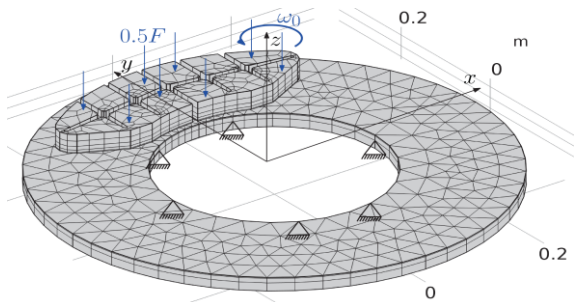
2. Sformułowanie zagadnienia

Symulowany jest proces hamowania przy stałej prędkości pojazdu równej 80 km/h oraz stałej nominalnej mocy hamowania równej 20 kW dla hamulca pokazanego na rys. 1. W celu uzyskania stałej mocy hamowania przy zmianach współczynnika tarcia, wartość siły była korygowana w czasie symulowanego procesu trwającego 1200 s (rys. 2). Podstawowe wymiary hamulca to: promień tarcia $r_{eq} = 0,253$ m, pole powierzchni jednej okładziny $A_{pad} = 340$ cm², oraz promień toczny koła $R_w = 0,435$ m.

Należy zaznaczyć, że analizowane w tej pracy zagadnienie kontaktu z tarcieniem z założenia wymagało dostosowania szeregu parametrów odpowiednich dla danego procesu. Do przeprowadzenia obliczeń użyto solvera segregated w środowisku COMSOL Multiphysics®. W odróżnieniu od fully coupled, dzieli on rozwiązywane

zagadnienie na podgrupy i poszukuje rozwiązania oddzielnie. Podczas hamowania w obszarze kontaktu miało miejsce nagrzewanie tarciove strumieniem o gęstości:

$$q(r, \theta, t) = 0.5f(t)\omega_0 r F(t) A_{pad}^{-1} \quad (1)$$



Rys. 1. Siatka MES hamulca z warunkami brzegowymi

Zużycie okładziny ciernej podczas hamowania obliczono według prawa Archarda danego w postaci [9]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = k_{wear} \frac{p_n}{p_{n,ref}} \|\mathbf{v}_{slip}\| \quad (1)$$

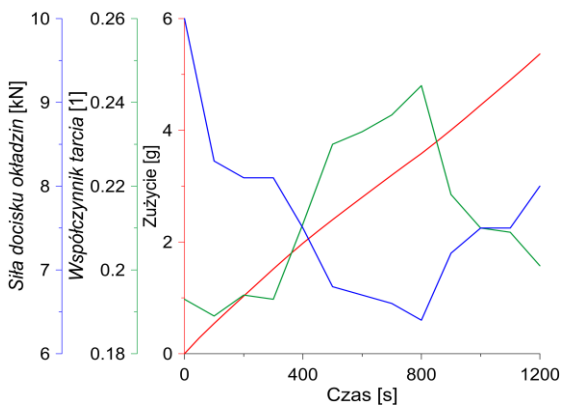
gdzie: h – zużycie liniowe, k_{wear} – współczynnik intensywności zużycia, p_n – ciśnienie kontaktowe, $p_{n,ref}$ – ciśnienie kontaktowe odniesienia (1 Pa), \mathbf{v}_{slip} – prędkość.

Tabela 1. Właściwości materiałów i parametry zużycia

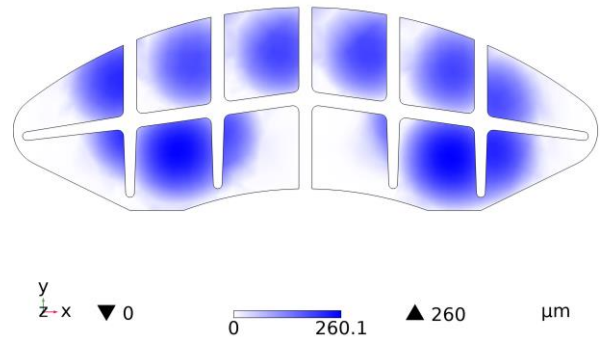
	Żeliwo (tarcza)	Materiał organiczny (okładzina)
E [GPa]	110	1,32
ν [-]	0,28	0,3
ρ [kg/m ³]	7200	1787
α [1/K]	$11 \cdot 10^{-6}$	$42,3 \cdot 10^{-6}$
K [W/(m K)]	52	$K(T)$
c [J/(kg K)]	447	$c(T)$

3. Wyniki

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń zużycia podczas hamowania z uwzględnieniem zmian temperatury okładziny i tarczy hamulcowej.



Rys. 2. Zmiany zużycia, siły docisku okładzin oraz współczynnika tarcia podczas hamowania



Rys. 3. Rozkład głębokości zużycia liniowego h (μm) okładziny w chwili 1200 s

4. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań zaprezentowano wyniki symulacji komputerowej zużycia okładziny ciernej hamulca tarczowego podczas hamowania ze stałą mocą. Na podstawie otrzymanych wyników ustalono, że:

- 1) rozkład głębokości zużycia okładziny w obszarze kontaktu jest niejednorodny (rys. 3),
- 2) zmiany współczynnika tarcia z jednoczesną korekcją siły docisku w celu uzyskania stałej mocy hamowania, w niewielkim stopniu wpływały na zmiany profilu czasowego zużycia masowego okładziny,
- 3) współczynnik intensywności zużycia obliczony na podstawie symulacji komputerowych z uwzględnieniem zmian temperatury nie różni się w stosunku do współczynnika otrzymanego przy pominięciu nagrzewania tarciowego.

Nowatorskim elementem pracy jest uwzględnienie w modelu obliczeniowym zużycia podczas hamowania ciągłego, zmienności ciśnienia i współczynnika tarcia oraz nagrzewania tarciowego przy złożonym kształcie okładziny ciernej.

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

Literatura

- [1] Day A. J., *Braking of road vehicles*, 1st ed., Butterworth-Heinemann/Elsevier, Oxford 2014.
- [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] Grzelczyk D., Awrejcewicz J., *Wear processes in a mechanical friction clutch: theoretical, numerical, and experimental studies*, Math. Probl. Eng., 2015, pp. 1-28.
- [4] Xiao X., Yin Y., Bao J., Lu L., Feng X., *Review on the Friction and Wear of Brake Materials*, Adv. Mech. Eng., Vol. 8, No. 5, pp. 1-10, 2016.
- [5] Söderberg A., Andersson S., *Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software*, Wear, Vol. 267, pp. 2243-2251, 2009.
- [6] Baranowski P., Damaziak K., Malachowski J., Sergienko V. P., Bukharov S.N., *Modeling of abrasive wear by the meshless smoothed particle hydrodynamics method*, J. Frict. Wear, Vol. 37, pp. 94-99, 2016.
- [7] <https://www.comsol.com/model/disc-brake-pad-wear-89961>
- [8] UIC 541-3 – Disc brakes and their application – General conditions for the certification of brake pads. 8th edition, March; 2017.
- [9] https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.sme/sme_ug_solid.0.7.097.html.