

Jerzy OSIŃSKI¹
Zbigniew WOŁEJSZA², Wojciech KOWALSKI²

SYMULACJA HAMOWANIA Z ZASTOSOWANIEM OKŁADZIN CIERNYCH Z KOMPOZYTU WĘGIEL - WĘGIEL

Streszczenie. W pracy przedstawiono układ równań opisujący proces hamowania, złożony z równania mechanicznego i bilansu cieplnego. Przedstawiono symulację hamowania, przyjmując tarcze wykonane z kompozytu węgiel-węgiel. Omówiono także stanowisko badawcze i porównanie wyników doświadczalnych i numerycznych.

SIMULATION OF BRAKING WITH FRICTION DISCS MADE OF CARBON-CARBON COMPOSITES

Summary. It's presented equations system, described braking process, consists of equations: mechanical and heat balance. It's presented simulation of braking, taking into consideration disc made of carbon-carbon composites. Also is discussed testing stand and comparison between experimental and numerical results.

1. WSTĘP

Znaczące przyspieszenie rozwoju konstrukcji hamulców nastąpiło dzięki zastosowaniu nowych materiałów ciernych posiadających lepsze właściwości. Dobrym przykładem tego jest kompozyt węgiel - węgiel o zdecydowanie lepszych właściwościach ciernych w najwyższych temperaturach. Materiały tego rodzaju stosowane są w hamulcach nowoczesnych samolotów (np. Boeing, ATR etc.) i superszybkich pociągów ekspresowych (np. TGV). W Polsce dotychczas się ich nie stosuje. W celu wdrożenia ich do konstrukcji prowadzone są intensywne badania, między innymi w Pracowni Podwozi Instytutu Lotnictwa. Badane są różne cechy tego materiału: chemiczne, strukturalne, termograwimetryczne, zależności współ-

¹ Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska,

² Instytut Lotnictwa w Warszawie

czynnika tarcia od temperatury, energii, nacisków. Prowadzone są także symulacje hamowania na stanowiskach badawczych.

Zaprojektowanie hamulca z okładzinami z kompozytu C/C wymaga wykonania symulacji hamowania - równania opisujące pracę hamulca są silnie nieliniowe, ze względu na istniejące zależności współczynnika tarcia od temperatury i prędkości względnej.

Oprócz własnych badań wykorzystano także wyniki badań innych autorów dostępne w literaturze, w szczególności badania statycznych współczynników tarcia [1].

2. OPIS DYNAMIKI HAMULCA

Proces hamowania opisano nieliniowym układem równań, w którym występuje równanie mechaniczne:

$$I\ddot{\varphi} + c\dot{\varphi} + k\varphi = -M_h - M_o \quad (1)$$

gdzie:

- I - zredukowany do osi hamulca moment bezwładności pojazdu hamowanego,
- φ - kąt obrotu,
- k - sztywność tarcz hamulcowych,
- c - tłumienie w materiale okładzin hamulcowych,
- M_h - moment hamowania określony zależnością:

$$M_h = r P \mu(\varphi, \dot{\varphi}, T) \quad (2)$$

gdzie: r - promień tarcz hamulcowych,

P - siła docisku,

μ - funkcja opisująca współczynnik tarcia w zależności od przemieszczenia prędkości i temperatury,

M_o - moment innych oporów występujących podczas hamowania (np. opór powietrza, odwrócona siła ciągu w samolocie odrzutowym etc.).

W przypadku uproszczonych obliczeń, których celem jest określenie skuteczności hamowania (a nie np. badanie możliwości wystąpienia drgań samowzbudnych) można traktować tarcze okładzin ciernych jako sztywne i przyjąć

$$c = k = 0 \quad (3)$$

- równanie bilansu cieplnego stwierdzającego, że przyrost ciepła okładzin hamulcowych jest różnicą ciepła dostarczonego i rozproszonego

$$\Delta Q = Q_s - Q_r \quad (4)$$

umożliwiającego wyznaczenie aktualnej temperatury podczas hamowania.

Przyrost ciepła jest określony zależnością

$$\Delta Q = \alpha m \Delta T \quad (5)$$

gdzie :

- α - ciepło właściwe materiału okładzin,
- m - masa okładzin,
- ΔT - przyrost temperatury.

Ciepło dostarczone może być wyznaczone jako różnica energii kinetycznych

$$\Delta E_h = I (\omega_k^2 - \omega_p^2) / 2 \quad (6)$$

lub

przyrost pracy siły tarcia

$$\Delta P_t = \mu r P \varphi(t) dt \quad (7)$$

W ocenie ciepła rozproszonego konieczne jest uwzględnienie odprowadzenia ciepła do reszty układu związanego z hamulcem - jest to część najtrudniejsza do oceny (np. nagrzewanie koła z ogumieniem), przewodzenie ciepła do powietrza zgodnie z zależnością:

$$\Delta Q_{rp} = \alpha_p S T \Delta t \quad (8)$$

gdzie:

- α_p - współczynnik przenikania,
- S - powierzchnia,
- Δt - odcinek czasu,

Zależności dotyczące bilansu cieplnego pochodzą z monografii [2]. Ocena szeregu wielkości występujących w bilansie cieplnym może być trudna, w przypadku złożonych kształtów powierzchni konieczne jest zastosowanie metody elementów skończonych [2].

3. SYMULACJA CYFROWA HAMOWANIA

W procesie hamowania wydzielono trzy etapy:

- włączanie hamulca (czas narastania docisku pomiędzy tarczami zależny od konstrukcji hamulca),
- czas hamowania (stały moment hamujący do zatrzymania),
- czas stygnięcia okładzin hamulcowych.

Dane do symulacji dobrano w ten sposób, aby odpowiadały hamowaniu samolotu IRYDA. Zgodnie z opisem w rozdziale 1, wymaga to rozwiązania sprzężonego układu równań

$$\begin{aligned} I \dot{\varphi} &= - r P \mu(\varphi, \dot{\varphi}, T) \\ c_p m \dot{T} + \alpha_s S T - r P \dot{\varphi} \mu(\varphi, \dot{\varphi}, T) &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

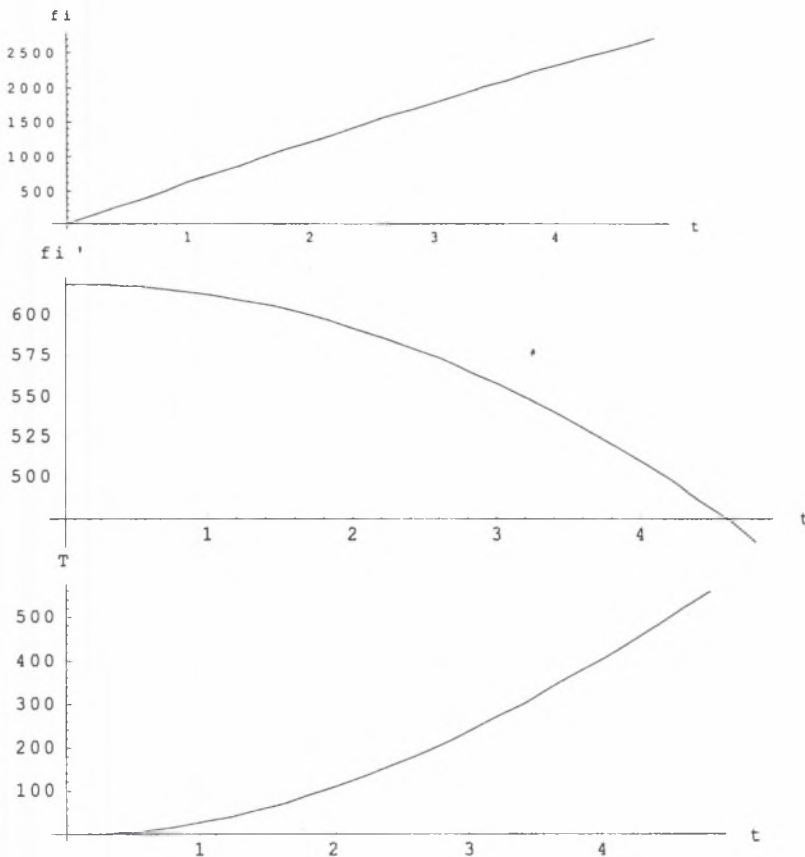
w którym zmiennymi są przemieszczenie lub temperatura. Niemożliwe jest ich bezpośrednie rozwiązanie ze względu na brak analitycznego zapisu funkcji współczynnika tarcia.

Zaproponowano dwie metody przybliżone. W pierwszej dokonuje się stabilizowania wartości współczynnika tarcia i wyznacza rozwiązanie przybliżone wg następującego schematu:

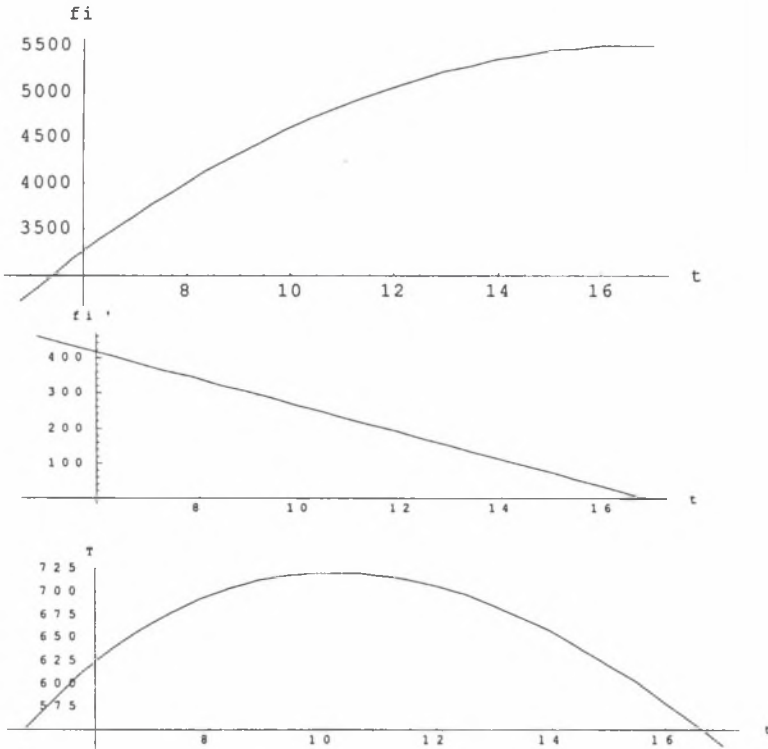
- przyjęcie warunków początkowych,
- założenie kroku czasowego,
- rozwiązanie na odcinku kroku czasowego, z założeniem stałego współczynnika tarcia wyliczenia końcowej prędkości obrotowej i temperatury,
- powtórzenie obliczeń w następnym kroku.

W drugiej metodzie tworzy się aproksymację wielomianową współczynnika tarcia i rozwiązuje numerycznie układ równań. Stosując ją wykonano symulację z zastosowaniem programu MATHEMATICA. Przykładowe wyniki symulacji (przebiegi kąta obrotu prędkości obrotowej i temperatury) przedstawiono na rysunkach 1-3:

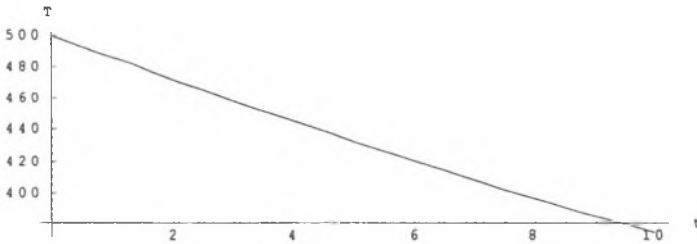
- 1) odcinek włączenia hamulca,
- 2) hamowanie ze stałym momentem,
- 3) krzywa studzenia (po zatrzymaniu tarcz).



Rys.1
Fig. 1



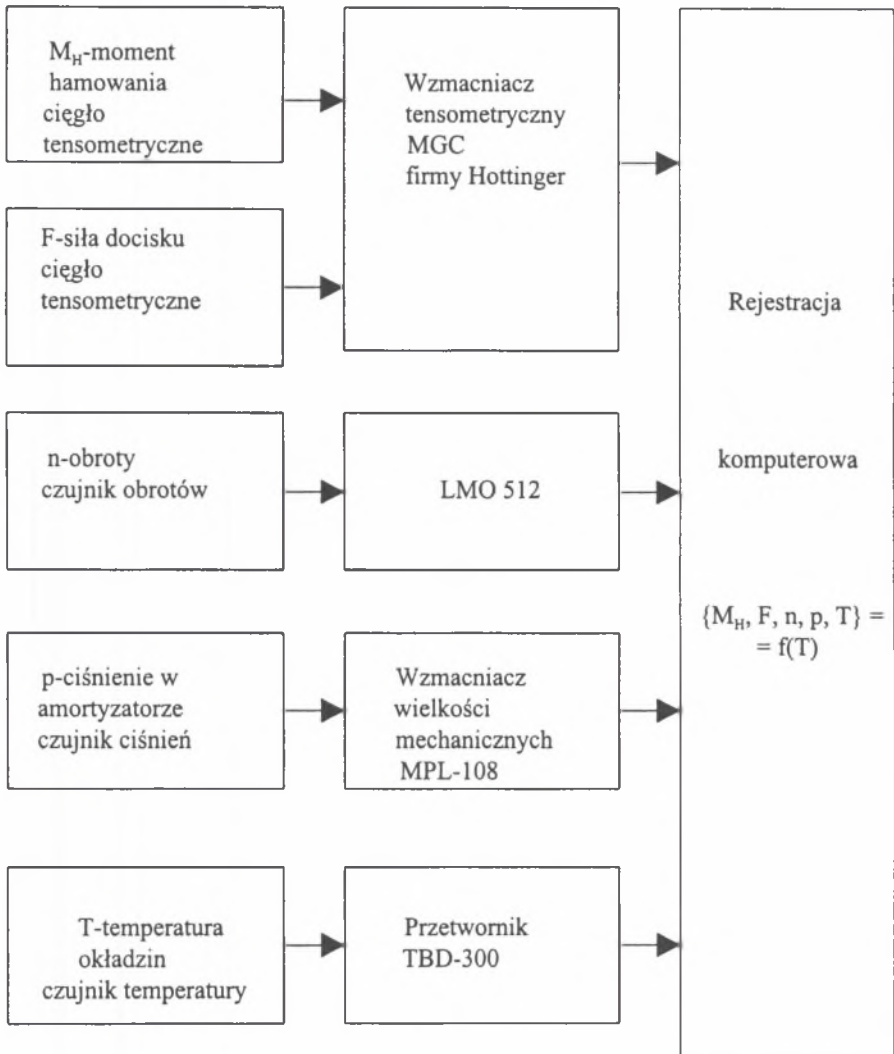
Rys.2
Fig. 2



Rys.3
Fig. 3

4. SYMULACJA HAMOWANIA NA STOISKU BADAWCZYM

Badania wykonano na stoisku badawczym IL-68 w Laboratorium Badań Podwozi Lotniczych Instytutu Lotnictwa, - schemat pomiarowy przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4
Fig. 4

5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodę umożliwiającą badania hamulców z okładzinami z nowych materiałów, np. kompozytu węgiel-węgiel (C/C). Porównanie wyników symulacji cyfrowej i doświadczalnej umożliwia wyznaczenie dynamicznego współczynnika tarcia w rzeczywistych warunkach pracy hamulca – przy dużych prędkościach obrotowych i wysokich temperaturach. Wyniki wskazują, że tarcie jest silnie nieliniowo zależne od temperatury i prędkości obrotowej.

Literatura

1. Bajkowski J., Grzesikiewicz W., Landjerit B.: Modelowanie i badania współczynników tarcia kompozytowych materiałów ciemnych. XIX Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn. Zielona Góra-Świnoujście, wrzesień 1999, s.221-223.
2. Wiśniewski S., Wiśniewski T.i S.: Wymiana ciepła. WNT, Warszawa 1997.
3. Osiński Z: Sprzęgła i hamulce. PWN, Warszawa.
4. Konferencja hamulcowa -97. Łódź 1997.
5. Ścieszka S.F.: Hamulce cieme. WZP-ITE, Radom 1998.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek Sitarz
Profesor Politechniki Śląskiej

Abstarct

Significant improving of brake construction has taken place since the new friction materials have been used. An example of such material is carbon-carbon composite. It's presented equations system, described braking process, consists of equations: mechanical and heat balance. It's presented simulation of braking, taking into consideration disc made of carbon-carbon composites. Also is discussed testing stand and comparison between experimental and numerical results.