

Marceli ŻOŁNIERZ, Wojciech GRZEGORZEK, Stanisław ŚCIESZKA
Politechnika Śląska, Gliwice

NIESTABILNOŚĆ TERMOSPŘĘŻYSTA W HAMULCACH CIERNYCH

Streszczenie. Artykuł przedstawia mechanizm powstawania niestabilności termosprężystej oraz jej niekorzystny wpływ na działanie układu hamulcowego. Zamieszczono również wyniki symulacji numerycznej obrazującej wpływ własności materiałów pary czarnej na granicę występowania niestabilności termosprężystej.

THERMOELASTIC INSTABILITY IN FRICTION BRAKES

Summary. The paper presents mechanism of generation thermoelastic instability phenomena and its unfavorable effect on the friction brake system. Also the effect of brake material properties and the friction of coefficient on occurring of thermoelastic instability are presented.

1. Wprowadzenie

Hamulce cierne są ważnym elementem maszyn i urządzeń stosowanych w przemyśle górnym, od których w dużym stopniu zależy prawidłowe funkcjonowanie współpracujących z nimi urządzeń i bezpieczeństwo ludzi. W trakcie pracy hamulców ciernych generowana jest energia cieplna jako końcowy rezultat transformacji tribologicznej. W wyniku sprężystych odkształceń stykających się elementów zmienia się rozkład nacisków. Niejednorodność w rozkładzie nacisku powoduje w konsekwencji miejscowe zwiększenie intensywności generowanego ciepła i wyższą temperaturę na powierzchni bieżni hamulcowej, w okolicy większych nacisków. Prowadzi to do powstawania niestabilności termosprężystej [2,3,4,6,8], której konsekwencją jest tworzenie się na powierzchniach trących niejednorodnych pól temperatur, zwanych gorącymi plamami [1,5]. Chcąc wyeliminować problem niestabilności termosprężystej w hamulcach należy tak kształtować system

tribologiczny oraz jego parametry pracy, aby generowane ciepło tarcia nie powodowało powstawania niestabilności termosprężystej.

Rozwój technik komputerowego modelowania i symulacji procesów zachodzących w obiektach fizycznych daje szerokie możliwości na etapie projektowania wirtualnych prototypów. Znajomość wpływu parametrów materiałów tworzących parę cierną (okładzina cierna i bieżnia hamulca) na występowanie niestabilności termosprężystej stanowi ważny element informacji niezbędny w procesie projektowania układu hamulcowego. Pozwala to na wstępny dobór materiałów tworzących elementy węzła tarcia i przeprowadzenie analizy numerycznej, bez konieczności przeprowadzania kosztownych testów na obiekcie rzeczywistym.

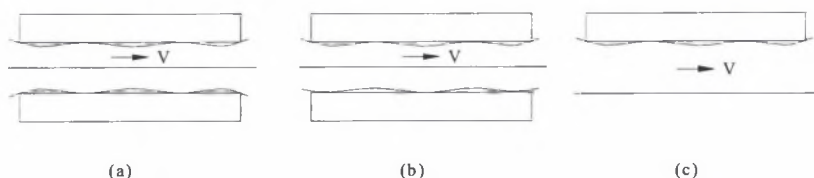
2. Niekorzystne efekty niestabilności termosprężystej

Temperatura gorących płam jest relatywnie wysoka i może osiągać nawet 800°C [4]. Obecność tak wysokiej lokalnej temperatury niesie z sobą niepożądane efekty. Jednym z nich jest fakt, że podwyższona lokalnie temperatura powoduje miejscowe zwiększenie grubości tarczy hamulcowej oraz jej odkształcenia sprężyste, co przyczynia się do zaburzeń w jednorodności rozkładu nacisku. Kolejny niepożądany efekt to generowanie pod wpływem oddziaływań tribologicznych dużych naprężeń na powierzchni bieżni w strefach wokół gorących płam, co może prowadzić do płynięcia plastycznego i ostatecznie do inicjacji pęknięć w tarczy [10]. Zmiana kształtu elementów ciernych hamulca oraz zmiana współczynnika tarcia mają duży wpływ na zmianę wartości siły hamowania, co jest jednym ze źródeł powstawania drgań układu hamulcowego oraz elementów z nim współpracujących [4].

3. Typy deformacji bieżni hamulcowej

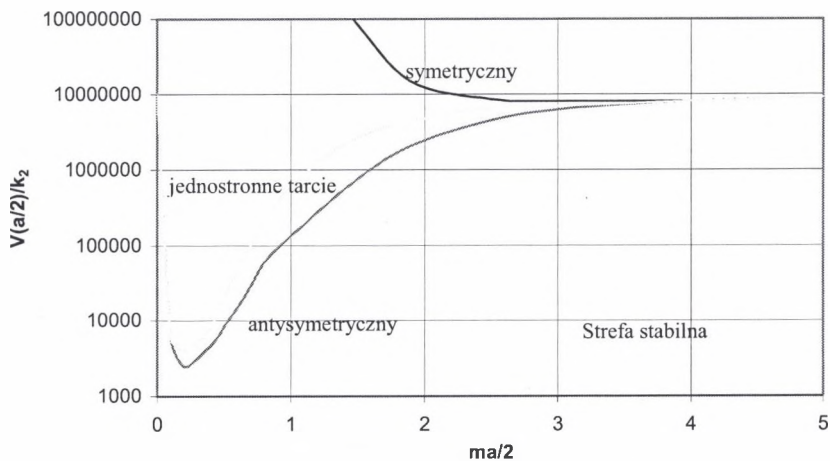
Już od wielu lat problem niestabilności termosprężystej wzbudza zainteresowanie naukowców i inżynierów [1-11]. Jednym z pierwszych, który zademonstrował mechanizm powstawania niestabilności termosprężystej był Barber [2]. Z kolei Anderson i Knapp [1] zaobserwowali, że gorące płamy są przyczyną pogarszania się trwałości materiału. Natomiast Burton i inni [3] wykazali, że jednorodny nacisk pomiędzy dwoma trącymi elementami powoduje niestabilność termosprężystą dopiero wówczas, gdy prędkość poślizgu przekroczy

pewną wartość krytyczną. Hamulce bębnowe zawierają tylko jedną powierzchnię trącą, w związku z czym następuje w nich jednostronne nagrzewanie bieżni hamulcowej. Na rys. 1 pokazano schematycznie najczęściej spotykane modele hamulców ciemnych z jedną powierzchnią trącą oraz model symetrycznej i antysymetrycznej podwójnej powierzchni trącej.



Rys. 1. Modele deformacji tarczy: (a) symetryczny, (b) antysymetryczny, (c) jednostronne tarcie [6]
Fig. 1. Models of deformation (a) symmetric, (b) antisymmetric, (c) one side heating [6]

Bezwymiarowa wartość prędkości krytycznej $\frac{v \left(\frac{a}{2} \right)}{k_2}$, która na rysunku 2 została przedstawiona dla trzech modeli deformacji tarczy jest funkcją bezwymiarowej grubości bieżni $m \frac{a}{2}$ (bębna, tarczy).



Rys. 2. Granica stabilności modeli deformacji tarczy [6]
Fig. 2. Stability boundary of tree modes [6]

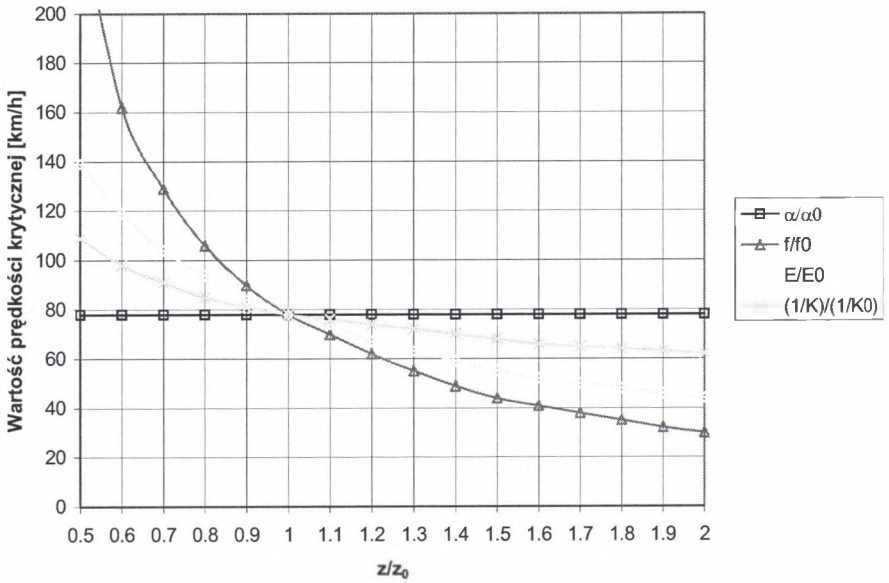
gdzie:

- v – prędkość poślizgu,
- a – grubość bieżni,
- k_2 – współczynnik dyfuzji cieplnej,
- m – częstotliwość przestrzenna zaburzenia sinusoidalnego.

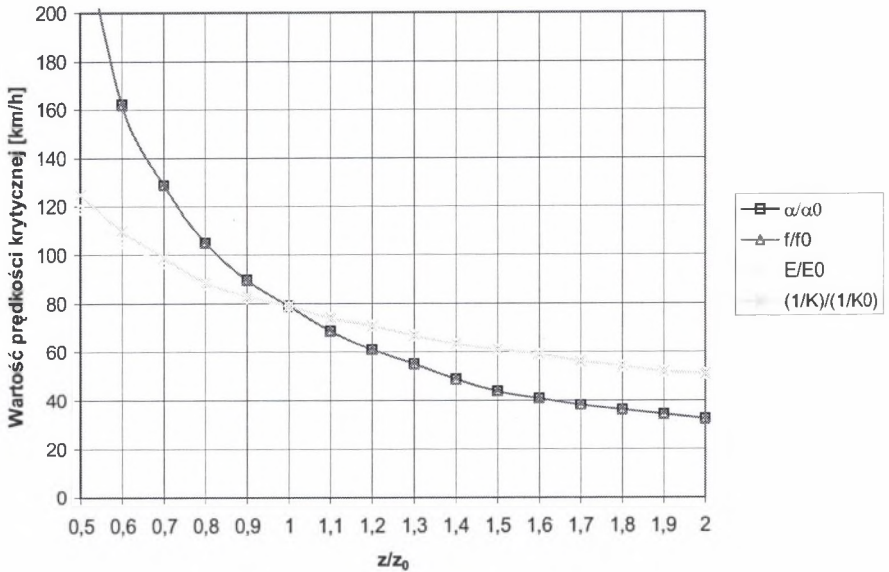
Trzy linie obrazują granicę stabilności, powyżej której układ cierny staje się niestabilny. Rysunek 1 pokazuje również, że stabilność w przypadku jednostronnego tarcia zachowuje się podobnie jak w przypadku niesymetrycznym z dwustronnym tarciem. Natomiast prędkość krytyczna w przypadku jednostronnego tarcia jest wyższa od prędkości dla przypadku niesymetrycznego. Wskazuje to, że układy hamulcowe z jedną powierzchnią trącą są bardziej stabilne od hamulców tarczowych, jeżeli obydwa układy hamulcowe mają taką samą grubość bieżni, wykonane są z tych samych materiałów i posiadają taką samą długość okładziny. Jednakże rzeczywiste tarcze hamulcowe mają dużo krótszą długość styku z okładziną niż bębny hamulcowe. Krótszy styk ogranicza liczbę gorących plam. W takim przypadku hamulce tarczowe mogą okazać się bardziej stabilne od hamulców bębnowych [8].

4. Wpływ własności materiałów pary cierniej na prędkość krytyczną

Lee i Barber [6, 7, 8] badali układy hamulcowe tarczowe i bębnowe na rzeczywistych obiektach. Opracowali modele hamulców i za pomocą metod numerycznych wykonali symulację zjawiska niestabilności termosprężystej. Następnie porównali wyniki uzyskane z badań eksperymentalnych z wynikami pochodzącymi z symulacji. W wyniku przeprowadzonych prac przedstawiono wpływ najważniejszych właściwości materiałów pary cierniej na wartość prędkości krytycznej (rys. 3 i 4). Bezwymiarowa wartość oznaczona przez z/z_0 została użyta do porównania wpływu różnych własności materiałów. Współczynniki α , f , E i K zostały odpowiednio odniesione do współczynników bazowych α_0 , f_0 , E_0 i K_0 . Wykazano również, że współczynnik tarcia oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału bieżni mają największy wpływ na prędkość krytyczną. Natomiast w przypadku materiału okładziny cierniej jest to moduł sprężystości. Uwagę zwraca fakt, że współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału okładziny nie ma wpływu na prędkość krytyczną w przeciwieństwie do materiału bieżni. Można to tłumaczyć tym, że materiał bieżni ma znacznie wyższy współczynnik przewodności cieplnej niż okładziny [8].



Rys. 3. Wpływ własności materiału okładziny na prędkość krytyczną [6]
 Fig. 3. The effect of friction material properties on the critical speed [6]



Rys. 4. Wpływ własności materiału bieżni na prędkość krytyczną [6]
 Fig. 4. The effect of drum materials properties on the critical speed [6]

Podobne obliczenia przy użyciu MES, lecz dla hamulca tarczowego wykonał Du [4]. Uzyskane wyniki obliczeń są zgodne z tymi, jakie otrzymali Lee i Barber za pomocą obliczeń analitycznych, a których obraz graficzny przedstawia rysunek 2. Wynika stąd, że analiza MES z dużą dokładnością odzwierciedla zachowanie się rzeczywistego obiektu, dając projektantom szerokie możliwości w zakresie budowy wirtualnych prototypów.

5. Podsumowanie

Złożoność zjawisk tribologicznych zachodzących w hamulcach ciernych oraz brak odpowiednich metod analitycznych pozwalających uchwycić problem niestabilności termosprężystej powoduje konieczność opracowania metody, która najwierniej odzwierciedli procesy zachodzące w trakcie pracy hamulca. W związku z tym, że testy na obiektach rzeczywistych są kosztowne i czasochłonne, najkorzystniejszą metodą do prognozowania niestabilności termosprężystej jest analiza numeryczna i oparte na niej programy MES. Z kolei, ciągle rosnące wymagania stawiane przed hamulcami ciernymi, dotyczące trwałości jak i niezawodności, zmuszają konstruktorów do bardziej wnikliwego potraktowania zjawisk zachodzących w hamulcach. Rozwój programów MES i zawartych w nich algorytmów obliczeniowych pozwala zamodelować układ tribologiczny z uwzględnieniem wielu czynników, mających istotny wpływ na pracę pary cieiernej. Oznacza to w praktyce możliwość skrócenia czasu badań nad prototypem prowadzących do optymalizacji jego parametrów dla konkretnych warunków pracy.

LITERATURA

1. Anderson A. E., Knapp R. A.: Hot Spotting in Automotive Friction Systems. Intl. Conf. On Wear of Materials, 1989, Vol. 2, s. 673÷680.
2. Barber J. R.: Thermoelastic Instability in the Sliding of Conforming Solids. Proc. R. Soc. London, 1969, Vol. 312, s. 381÷394.
3. Burton R. A., Nerlikar V., Kilaparti S. R.: Thermoelastic Instability in a Seal-Like Configuration. Wear, 1973, Vol. 24, s. 177÷188.
4. Du S.: Thermoelastic Effects in Automotive Brakes. Ph. D. dissertation, University of Michigan, Anna Arbor, 1997.
5. Kao T. K., Richmond J. W.: Brake Disc Hot Spotting and Thermal Judder. Int. J. Of Vehicle Design, 2000, Vol.23, Nos. 3/4.
6. Lee K., Barber J. R.: Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disc Brakes. Journal of Tribol., 1993, Vol. 115, s. 607÷614.

7. Lee K., Barber J. R.: Effect of Intermittent Contact on the TEI of Automotive Disc Brake Systems. *Thermoelastic Problems and the Thermodynamics of Continua*, 1995, Vol. 198, s. 27+32.
8. Lee K.: Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Drum Brakes. *Journal of Tribology*, 2000, Vol. 122, s. 849+855.
9. Ścieszka S.F.: *Hamulce cieme. Zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i tribologiczne*. WZP-ITE, Radom 1998.
10. Thomas J. M., et all: Thermal cracking in disc brakes. *Engineering Failure Analysis*, 2002, Vol. 9, s. 63+76.
11. Zagrodzki P.: Nonlinear Transient Behavior of a Sliding System With Frictionally Excited Thermoelastic Instability. *Journal of Tribology*, 2001, Vol. 123, s. 699+708.

Recenzent: Prof. nzw. dr hab. inż. Jan Senatorski

Abstract

Thermoelastic instability in brake is investigated using layer model with frictional heating generation. Using of realistic material properties of brakes, the stability behavior of the one-side heating is similar to that of the antisymmetric mode of two-side heating but the critical speed of the former is higher then that of the latter. The effect of brake material properties and the friction of coefficient on the critical speed are examined. The most effect properties are found to be coefficient of friction and the thermal expansion coefficient of brake materials.