

Stanisław ŚCIESZKA, Marcel ŻOŁNIERZ
Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA NIESTABILNOŚCI TERMOSPŘĘŻYTEJ HAMULCÓW CIERNYCH W OPARCIU O KRYTERIUM DOPUSZCZALNEGO ODKSZTAŁCENIA OSIOWEGO TARCZY HAMULCA

Streszczenie. Ciepło generowane w hamulcach mechanicznych wywołuje odkształcenia termosprężyste tarcz hamulcowych, co prowadzi do zmiany rozkładu nacisków na powierzchniach ciernych tarcz. To wzajemnie powiązane ze sobą oddziaływanie prowadzi do wytworzenia tzw. gorących plam, jeżeli początkowa prędkość hamowania jest wystarczająco wysoka. Tak opisany proces nazywa się niestabilnością termosprężystą. W artykule przedstawiono zastosowanie metody elementów skończonych (MES) do modelowania tego procesu w hamulcach tarczowych maszyn wyciągowych. Przedstawiono wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych (grubość tarczy) i materiałowych tarczy (współczynnika rozszerzalności cieplnej, przewodności cieplnej i modułu sprężystości) na wartość prędkości krytycznej. Jako kryterium oceny przejścia ze strefy stabilności do niestabilności przyjęto kryterium dopuszczalnego odkształcenia osiowego tarczy hamulca.

EVALUATION OF THE THERMOELASTIC INSTABILITY IN FRICTION BRAKES BASED ON THE AXIAL DISC DISTORTION-RISE LIMIT CRITERION

Summary. The heat generated in mechanical brakes causes thermoelastic distortion of disc and affects the distribution of contact pressure. This interaction is unstable if the sliding speed is sufficiently high leading eventually to the development of hot spots. The phenomenon is referred to as frictionally-excited thermoelastic instability or TEL. This paper describes application of finite element modelling of the phenomenon in mining winding machine friction disc brakes. The effects of friction material properties, disc material properties and disk thickness on the critical speed were investigated. The most influential property was found to be the thermal expansion coefficient of disc material. As the criterion for stability/instability evaluation the axial disc distortion-rise limit was applied in the finite element analysis.

1. Wstęp

Już pod koniec ubiegłego wieku zauważono, że hamulce tarczowe zastosowane w samochodach oraz szybkich kolejach są źródłem drgań o niskiej częstotliwości, nazywanej w literaturze angielskojęzycznej „judder”. Drgania te były odczuwalne przez pasażerów jako „wstrząsanie” i były szczególnie silne w trakcie intensywnego hamowania pojazdów z dużej prędkości początkowej. Konstruktorzy i eksploatacy powyższych pojazdów, wraz z doświadczeniem zdobytym na temat innych źródeł drgań oraz sposobów ich eliminacji, zaproponowali wyjaśnienie przyczyn zjawiska. Sugerowano wiele mechanizmów wyjaśniających to, uciążliwe w eksploatacji pojazdów, a także innych maszyn transportowych, zjawisko drgań niskoczęstotliwościowych [2]. Najważniejsze z przyczyn tych drgań, sugerowanych przez badaczy tego zjawiska to: niewyważenie tarczy oraz nierównomierne nanoszenie warstw tribologicznych na tarczy, prowadzące do zróżnicowania grubości tarczy na jej obwodzie. Aktualnie najczęściej za główną przyczynę zjawiska uważa się wzajemne oddziaływanie między dwoma sprzężonymi procesami, a mianowicie: termosprężystą deformacją tarczy i jej nierównomiernym w wyniku tarcia nagrzewaniem. Zjawisko to nazywa się *niestabilnością termosprężystą* [3]. Pomiar temperatury na powierzchni tarcz w hamulcach, które generowały drgania wykazywały zmienną wartość temperatury wzdłuż obwodu. Zmiany te przyjmowały kształt tzw. gorących plam, równomiernie rozłożonych wzdłuż tarczy [1].

Mechanizm sprzężenia zwrotnego, odpowiedzialny za niestabilność termosprężystą, przedstawiony został na rys.1. Generowane podczas hamowania ciepło tarcia wywołuje termosprężyste odkształcenia tarczy (bieżni hamulca), które z kolei zmienia wstępny rozkład nacisków jednostkowych $p(x,y,t)$, czyli także dystrybucję ciepła tarcia $q(x,y,t)$. Można założyć następujący bilans energii:

$$q(x, y, t) = \mu p v(x, y, t), \quad (1)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia,

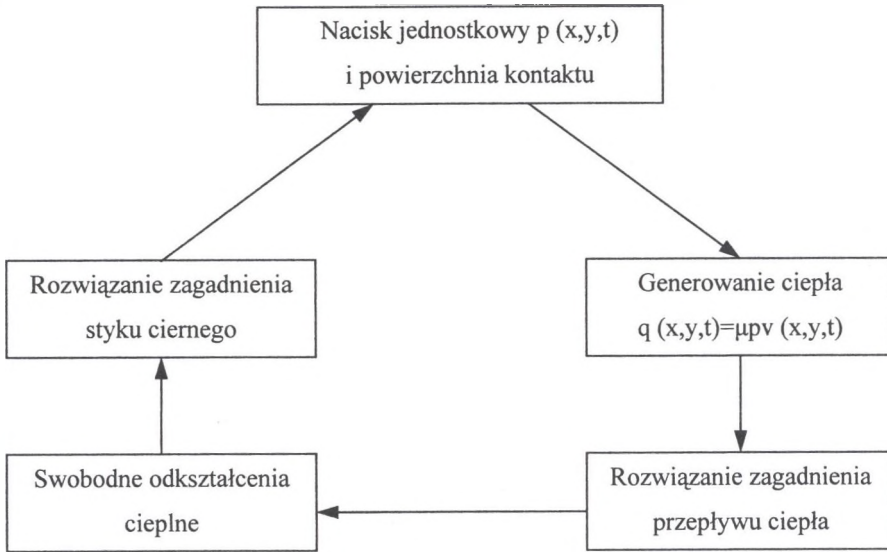
v – prędkość poślizgu,

p – naciski jednostkowe na powierzchni styku pary ciernej,

x, y , – kierunki oddziaływania nacisków jednostkowych i generowania ciepła,

t – czas oddziaływania nacisków jednostkowych i generowania ciepła.

Sprzężenie zwrotne (rys.1) wskazuje, że istnieje krytyczna wartość prędkości v_{kr} , powyżej której każdy układ cierny będzie niestabilny [3].



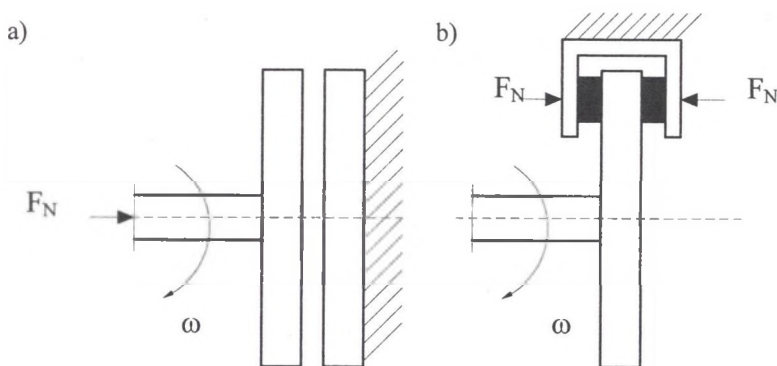
Rys. 1. Proces sprzężenia zwrotnego występujący przy rozwiązywaniu zagadnienia niestabilności termosprężystej

Fig. 1. The feedback mechanism responsible for thermoelastic instability

Powyżej prędkości krytycznej v_{kr} , niejednorodne zaburzenia w polu temperatur prowadzą do występowania charakterystycznych, gorących plam lub pasm [1].

Ideą byłoby zaprojektowanie hamulca, który w żadnych warunkach jego użytkowania nie osiągałby prędkości v_{kr} . Wartość krytyczna prędkości (v_{kr}) jest istotnie zależna od geometrycznych i materiałowych cech konstrukcyjnych hamulca, stąd metody numeryczne (najczęściej MES) są stosowane dla poszukiwań najkorzystniejszego rozwiązania konstrukcyjnego. Stosowane są dwa rodzaje metod numerycznych. Pierwsza to „symulacja cyfrowa”, w której system jest opisany przy użyciu MES, a temperatura w punktach węzłowych jest wyliczana stopniowo po każdym kroku (przyroście) czasowym przy użyciu algorytmu [3]. W drugiej metodzie, polegającej na znajdowaniu wartości własnych macierzy zastosowano opis pola temperatur i jego zaburzeń, które zostały sformułowane przez Burtona [3]. W obu metodach natrafiono na trudności związane z faktem, że analizowane ciała poruszają się i należy wprowadzić do równań także opis przepływu konwekcyjnego w tych ciałach. Liczby Pecleta w tych warunkach mają wysokie wartości, co prowadzi do ograniczenia zaburzeń rozkładu temperatur do bardzo cienkiej warstwy elementów ciemnych i stwarza konieczność stosowania bardzo gęstej siatki elementów skończonych. Yi i in. [3] wykazali, że osiowo niesymetryczne zaburzenia w osiowo symetrycznych hamulcach i sprzęgłach mogą być analizowane, zakładając, że zaburzenia mają charakter Fouriera.

W tym wypadku, analiza każdej liczby Fouriera jest ograniczona do dwuwymiarowej powierzchni przekroju poprzecznego, na której nie ma konwekcji. Takie rozwiązanie nie może być jednak stosowane do układów hamulcowych, które nie są osiowo symetryczne (rys. 2) np. hydraulicznych hamulców tarczowych w maszynach wyciągowych, a także hamulców tarczowych samochodowych i kolejowych. Aktualnie prowadzone są prace nad rozszerzeniem powyższej metody dla systemów hamulcowych w pełni osiowo niesymetrycznych [4].



Rys. 2. Hamulce tarczowe: a) osiowo symetryczny b) osiowo niesymetryczny
Fig. 2. Disk brakes: a) axisymmetric, b) non-axisymmetric

2. Budowa modelu MES hamulca tarczowego maszyny wyciągowej

2.1. Wstęp

Metoda elementów skończonych z dużym powodzeniem wykorzystywana jest do analizy termicznej hamulców samochodowych, kolejowych oraz lotniczych. W prognozowaniu warunków termicznych hamulców maszyn wyciągowych, jak dotąd, nie znalazła ona powszechnego zastosowania. Jednakże możliwość jednoczesnego uwzględnienia wielu istotnych zjawisk towarzyszących pracy hamulca, a tym samym wierniejsze odzwierciedlenie procesu hamowania, stanowi ważną zaletę MES podczas projektowania lub modernizacji układów hamulcowych. Wykorzystanie MES do prognozowania warunków termicznych daje możliwość prowadzenia relatywnie obszernej analizy wpływu zmian konstrukcyjnych, materiałowych oraz parametrów tarcia na przebieg charakterystyk, opisujących pracę hamulca. Analiza termiczna hamulca wymaga określenia wartości energii tarcia, generowanej w trakcie hamowania. Stosuje się do tego odpowiedni współczynnik,

kórego wartość zawiera się w przedziale od 0,9 do 1. Według Taylora i Farrena wartość tego współczynnika, dla większości metali wynosi ok. 0,9. Ponadto, istotne staje się określenie, jaki jest rozdział strumienia ciepła pomiędzy tarczą a okładziną. Określa to współczynnik rozdziału ciepła. Dodatkowo tarcza chłodzona jest przez otaczający ją ośrodek, do którego oddaje określoną porcję ciepła, zależną od temperatury otoczenia oraz prędkości obrotowej tarczy. Związane są z tym zjawiska konwekcji swobodnej i wymuszonej, niezbędne do uwzględnienia w analizie MES, w celu wiernego odwzorowania procesu hamowania.

Całkowite ciepło generowane na powierzchni tarcia uzależnione jest od współczynnika tarcia, nacisku jednostkowego i prędkości poślizgu, zgodnie ze wzorem (1).

Klasyczne metody elementów skończonych dobrze sprawdzają się przy obliczeniach części nieruchomych, natomiast trójwymiarowe modelowanie części ruchomych wymusza stosowanie gęstej siatki elementów skończonych. Związane jest to z problemem niestabilności numerycznej w sytuacji, gdy liczba Pecleta $Pe > 2$. Z tego względu konieczne staje się stosowanie bardzo małych elementów skończonych rzędu kilku μm , co wynika z przekształcenia zależności (2):

$$h_x = \frac{Pe \lambda}{v \cdot \rho \cdot c_p}, \quad (2)$$

gdzie: h_x – rozmiar elementu skończonego wzdłuż wektora prędkości,

v – prędkość poślizgu,

ρ – gęstość materiału tarczy hamulca,

c_p – ciepło właściwe materiału tarczy hamulca,

λ – przewodność cieplna materiału tarczy hamulca,

Pe – liczba Pecleta.

W celu wyeliminowania tego problemu, została zaproponowana metoda hybrydowa łącząca szybką transformację Fouriera (FFT) i metodę elementów skończonych (FEM) [2], co pozwala na znaczne skrócenie czasu obliczeń. Do rozwiązania zagadnień konwekcji i dyfuzji użyty został algorytm Petrova-Galerkina. W tego typu obliczeniach liczba Couranta wymusza stosowanie odpowiedniego czasu iteracji, dla zapewnienia stabilności numerycznej [3]. Powyższy algorytm jest stabilny, gdy wartość liczby Couranta $C_r \leq 1$ (w przypadku zastosowania mas skupionych). Wartość liczby Couranta wylicza się z następującej zależności:

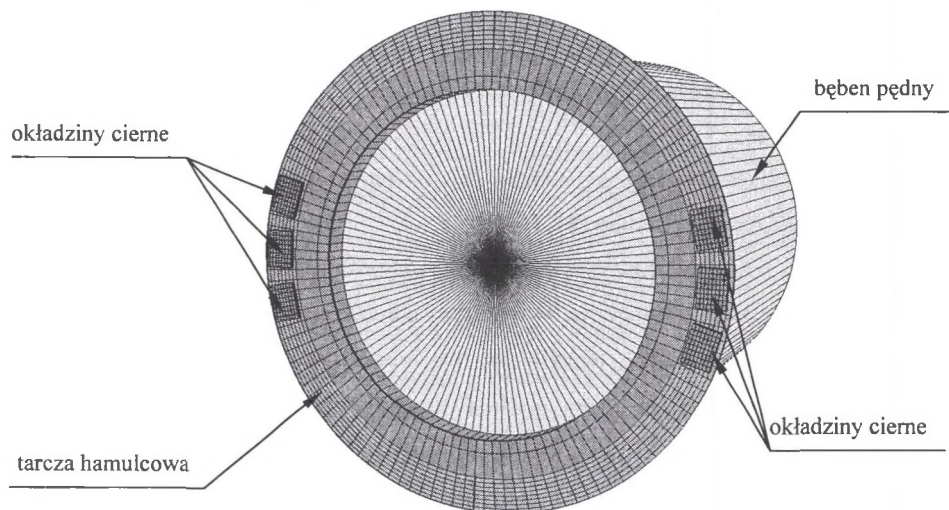
$$C_r = \frac{v \cdot \Delta t}{h_x}, \quad (3)$$

gdzie: C_r – liczba Couranta,
 Δt – czas iteracji.

2.2. Założenia w budowie modelu MES

Ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe stacji roboczej nie zastosowano tak gęstej siatki, jak wymagałby tego charakter analizy. Model hamulca tarczowego (rys.3) zbudowano z elementów 3D hexahedron 8 węzłowych (full integration & Herrmann formulation), a następnie wprowadzono odpowiednie warunki brzegowe, wynikające z modelu rzeczywistego oraz pewne ich uproszczenia, takie jak:

- ✓ zadano początkową prędkość tarczy hamulcowej,
- ✓ przyjęto początkową temperaturę dla całego modelu,
- ✓ przyjęto stałą temperaturę otoczenia (powietrza),
- ✓ przyjęto stałą wartość nacisku jednostkowego na okładzinę cierną,
- ✓ uwzględniono masę hamowanego urządzenia i nadwagi,
- ✓ uwzględniono konwekcję swobodną i wymuszoną,
- ✓ uwzględniono zależność własności termomechanicznych materiału tarczy od temperatury (załącznik),
- ✓ przyjęto przebieg współczynnika tarcia, wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych.



Rys. 3. Model MES hamulca tarczowego maszyny wyciągowej KWK Morcinek Szyb IW

Fig. 3. Finite element discretization of the disc brake system from winding machine – KWK Morcinek, shaft IW

Symulację przeprowadzono dla pary ciernej, której główne parametry zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1
Podstawowe warunki brzegowe oraz własności materiałowe tarczy hamulcowej i okładziny czarnej użyte w analizie MES

Parametr	Jednostka	Tarcza hamulcowa	Okładzina czarna
Promień wewnętrzny, R_2	m	1,450	–
Promień zewnętrzny, R_1	m	1,925	–
Moduł Younga, E	MPa	$f(T)$	$2 \cdot 10^8$
Pojemność cieplna, c_p	$\frac{N \cdot m}{kg \cdot K}$	$f(T)$	1000
Przewodność cieplna, λ	$\frac{N \cdot m}{s \cdot m \cdot K}$	$f(T)$	0,3
Rozszerzalność termiczna, α	$\frac{m}{m \cdot K}$	$f(T)$	$2 \cdot 10^{-5}$
Gęstość materiału, ρ	$\frac{kg}{m^3}$	7850	2000
Grubość elementów, b	mm	22	27
Temperatura otoczenia, T_0	°C	22	
Temperatura początkowa, T_p	°C	50	
Współczynnik tarcia, μ	–	$f(T, v)$	
Nominalny nacisk jednostkowy, p_n	MPa	–	1,0
Prędkość początkowa, v_0	$m \cdot s^{-1}$	10	–

Przebiegi zmienności własności materiału tarczy $f(T)$, przyjęto dla stali najbardziej zbliżonej składem chemicznym do stali St5. Skład chemiczny stali St5 określa norma PN-88/H-84020 zgodnie, z którą:

Tablica 2
Skład chemiczny stali St5 wg normy PN-88/H-84020

C %	Mn max %	Si max %	P max %	S max %
0,26÷0,37	0,80	0,35	0,045	0,045

Przyjęte charakterystyki dotyczą stali AISI 1030, której skład chemiczny przedstawia tablica 3.

Tablica 3
Skład chemiczny stali AISI 1030 wg normy DIN 1.1172

C %	Mn %	Si max %	P max %	S max %
0,27÷0,34	0,6÷0,9	0,35	0,04	0,05

3. Badania symulacyjne wpływu cech konstrukcyjnych i parametrów operacyjnych na stabilność termosprężystą analizowanego hamulca tarczowego maszyny wyciągowej

Przyjęcie kryterium wynikającego z wymogów konstrukcyjnych i istotnie ograniczającego zakres parametrów pracy urządzenia wyciągowego związane jest z wielkością szczeliny pomiędzy okładzinami ciemnymi a bieżnią tarczy hamulcowej i określono je jako kryterium dopuszczalnego odkształcenia osiowego tarczy hamulcowej. Maksymalna wielkość szczeliny, określona wymogami technicznymi, wynosi $1,5 \div 2$ mm. Wymogi te mają ścisły związek ze sposobem wywieranej siły docisku na okładziny cieme za pomocą pakietu sprężyn talerzowych znajdujących się w siłowniku hydraulicznym. Wielkość skoku pakietu sprężyn talerzowych ma istotny wpływ na wartość siły nacisku okładziny ciemnej do tarczy hamulca, a tym samym na zapewnienie wymaganego momentu hamowania.

Wyznaczenie granicy stabilnej pracy analizowanego hamulca tarczowego maszyny wyciągowej sprowadzało się do wyznaczenia maksymalnej prędkości, z jakiej następuje hamowanie bezpieczeństwa i przy której odkształcenie osiowe tarczy hamulcowej, na jej zewnętrznym promieniu, zawierało się w przedziale $1,35 \div 1,5$ mm.

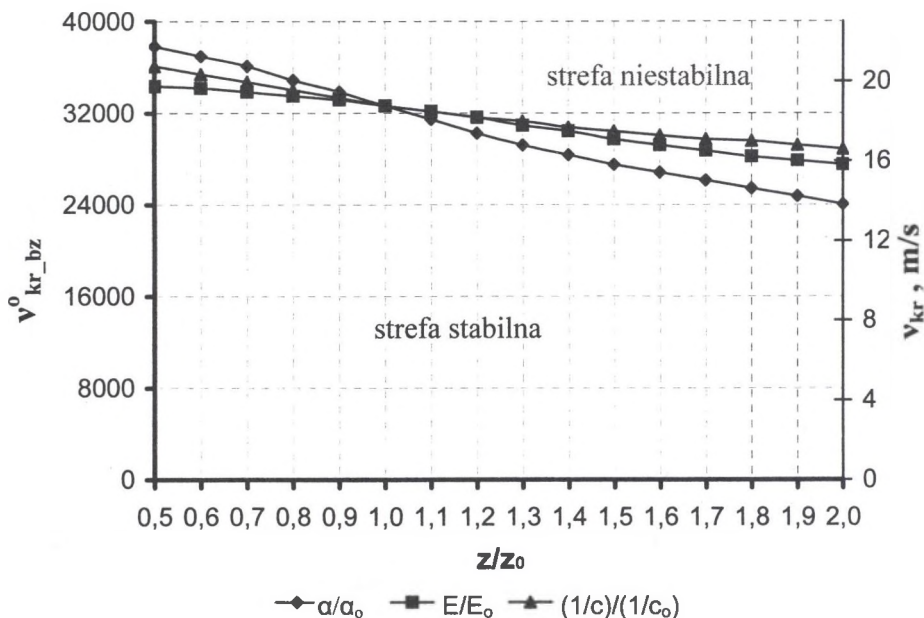
Bezwymiarową prędkość krytyczną dla kryterium dopuszczalnego odkształcenia osiowego tarczy $v_{kr_bz}^o$ wyznaczono z zależności:

$$v_{kr_bz}^o = v_{kr} \frac{\rho_{01} \cdot c_{01}}{\lambda_{01}} \cdot b_1 \quad (4)$$

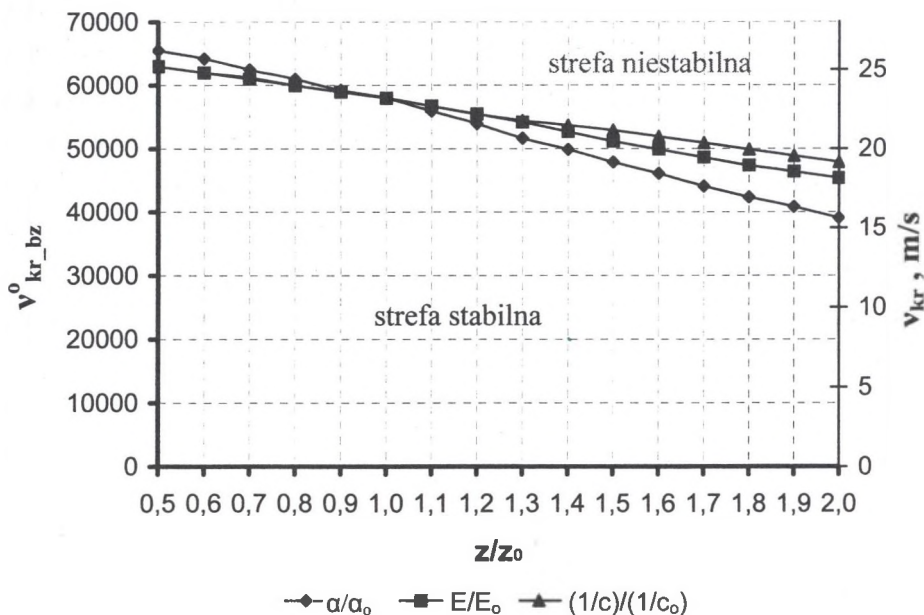
Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono wpływ własności materiałów tarczy hamulca maszyny wyciągowej dla trzech grubości tarczy hamulcowej na wartość prędkości krytycznej, przy której bicie boczne tarczy wynosiło od 1,35 do 1,5 mm. Współczynnik z_0 oznacza wartości bazowe własności α_0 , E_0 , c_{p0} materiału tarczy, do których odniesiono wielokrotności i podwielokrotności tych własności (z).

Gdzie:

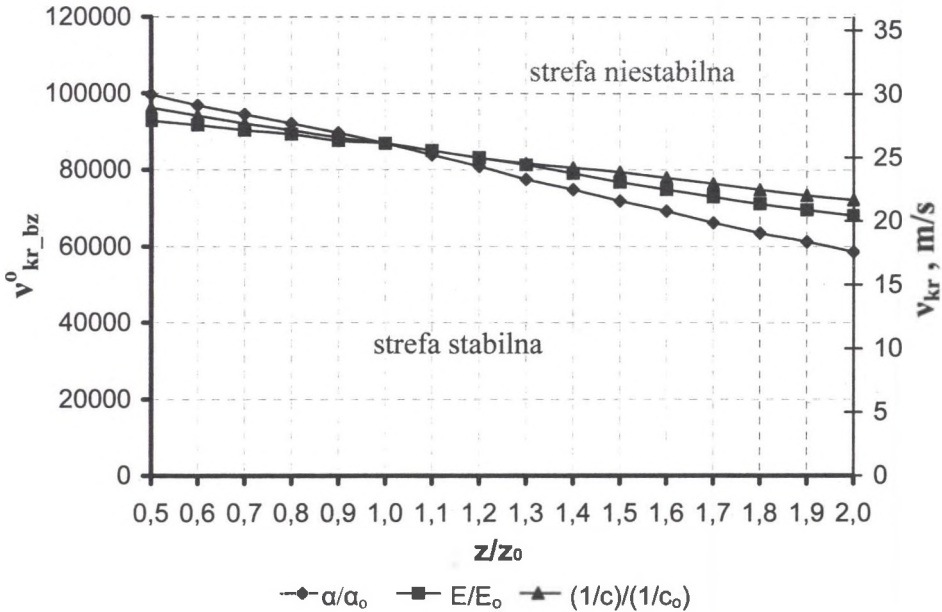
- v_{kr} – liniowa prędkość krytyczna [$m \cdot s^{-1}$],
- ρ_{01} – gęstość materiału tarczy hamulca; $7850 \text{ kg} \cdot m^{-3}$,
- c_{01} – ciepło właściwe materiału tarczy hamulca dla $T=20^\circ C$; $486 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$,
- λ_{01} – przewodność cieplna materiału tarczy hamulca dla $T=20^\circ C$; $51,9 \text{ W} \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$,
- b_1 – grubość tarczy hamulca (15 mm, 22 mm, 30 mm).



Rys. 4. Wpływ własności materiału tarczy hamulca na prędkość krytyczną dla grubości tarczy $b_1=15$ mm
 Fig. 4. The effect of disc material properties on the critical speed for the disc thickness $b_1=15$ mm



Rys. 5. Wpływ własności materiału tarczy hamulca na prędkość krytyczną dla grubości tarczy $b_1=22$ mm
 Fig. 5. The effect of disc material properties on the critical speed for the disc thickness $b_1=22$ mm



Rys. 6. Wpływ ciepła własności materiału tarczy hamulca na prędkość krytyczną dla grubości tarczy $b_1=30$ mm
 Fig. 6. The effect of disc material properties on the critical speed for the disc thickness $b_1=30$ mm

Otrzymane graficzne zależności podstawowych własności materiału tarczy, dla kryterium dopuszczalnego odkształcenia osiowego tarczy hamulca, wykazały istotny wpływ tych własności na wartość prędkości krytycznej. W przypadku kryterium dopuszczalnego odkształcenia osiowego wpływ własności materiału tarczy na prędkość krytyczną ma charakter zbliżony do liniowego, a uzyskane wartości prędkości krytycznej są wyższe od uzyskanych dla kryterium początku różnicowania wartości temperatur, na powierzchni po przeciwnych stronach tarczy hamulca. Największy wpływ na zakres stabilnej pracy hamulca tarczowego ma rozszerzalność cieplna materiału tarczy. Wpływ modułu Younga i ciepła właściwego mają zbliżone przebiegi charakterystyk prędkości krytycznej.

Można zauważyć, że dla tarczy o grubości 30 mm wartości prędkości krytycznej są najwyższe. Tym samym oznacza to, że hamulce tarczowe z tarczą o grubości 30 mm charakteryzują się największym obszarem stabilnej pracy.

Wykonując symulacje numeryczne, mające na celu wyznaczenie prędkości krytycznej według założonych kryteriów, nie stwierdzono wyraźnego występowania gorących plam.

4. Wnioski

Przeprowadzona w niniejszej pracy analiza literatury, związanej z problemem niestabilności termosprężystej, występującym w układach hamulcowych podczas hamowania, przegląd tradycyjnych metod obliczeń termicznych hamulców tarczowych maszyn wyciągowych oraz symulacja wpływu cech konstrukcyjnych hamulca tarczowego maszyny wyciągowej na stabilność termosprężystą w czasie hamowania bezpieczeństwa, obejmująca budowę modelu numerycznego MES, weryfikację doświadczalną tego modelu i przeprowadzone obliczenia numeryczne, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- ✓ zaawansowane algorytmy obliczeń przepływu ciepła zawarte w metodzie elementów skończonych pozwalają na symulowanie generowania zjawiska niestabilności termosprężystej podczas procesu hamowania, z uwzględnieniem wielu istotnych cech konstrukcyjnych hamulców ciernych,
- ✓ metody elementów skończonych pozwalają w prosty sposób i z dużą dokładnością wyznaczyć obszar stabilności termosprężystej układu hamulcowego, którego granicę stanowi prędkość krytyczna bieżni hamulca, powyżej której możliwe jest wystąpienie zjawiska niestabilności termosprężystej,
- ✓ analizując wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych metodą elementów skończonych dla procesu hamowania bezpieczeństwa maszyny wyciągowej szybu IW kopalni „Morcinek”, można stwierdzić, że:
 - dla wszystkich rozpatrywanych grubości tarczy hamulca maszyny wyciągowej najsilniejszy wpływ na wartość prędkości krytycznej, przy której rozpoczyna się zjawisko niestabilności termosprężystej, ma współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału tarczy,
 - wzrost współczynnika rozszerzalności cieplnej i modułu Younga materiału tarczy hamulca powoduje obniżenie wartości prędkości krytycznej, co oznacza zawężenie strefy stabilności termosprężystej hamulca,
 - wzrost ciepła właściwego materiału tarczy hamulca ma korzystny wpływ na zmniejszenie strefy stabilności termosprężystej, co jest równoważne ze wzrostem wartości prędkości krytycznej,
 - grubość tarczy hamulca ma znaczący wpływ na wartość prędkości krytycznej; wzrost grubości tarczy powoduje znaczne zwiększenie obszaru stabilności termosprężystej,

- grubość tarczy hamulca ma istotny wpływ na wielkość odkształcenia osiowego tarczy, a tym samym wpływa na zwiększenie wartości prędkości krytycznej,
- zastosowanie metody elementów skończonych pozwala na symulowanie procesu hamowania maszyn wyciągowych oraz umożliwia wyznaczenie maksymalnej prędkości krytycznej, poniżej której hamulec tarczowy będzie pracował w obszarze stabilności termosprężystej.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że uzyskane rezultaty symulacji numerycznej z wykorzystaniem wyników badań termowizyjnych świadczą o istotnym wpływie cech konstrukcyjnych hamulca tarczowego maszyny wyciągowej na jego stabilność termosprężystą.

LITERATURA

1. Anderson A. E., Knapp R. A.: Hot Spotting in Automotive Friction Systems. *Wear*, 1990, 135, s. 319÷337.
2. Lee Kwangjin, Barber J. R.: Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disc Brakes. *Journal of Tribology*, 1993, 115, s. 607÷614.
3. Yi Y., Barber J. R. i Hartsock D. L.: Thermoelastic instability in automotive disk brakes—Finite element analysis and experimental verification. *Proc. 3rd Contact Mechanics International Symposium, Peniche, Portugal, June 2001*, s. 1÷17.
4. Żołnierz M.: Symulacja wpływu cech konstrukcyjnych hamulca tarczowego maszyny wyciągowej na jego stabilność termosprężystą. Praca doktorska, Gliwice 2006.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Sadowski