

Marek SITARZ, Adam MAŃKA, Andrzej HEŁKA

WPLYW GEOMETRII DYLATACJI NA WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNE WSTAWEK HAMULCOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne aspekty wprowadzania dylatacji w kolejowych wstawkach hamulcowych. Omówiono problemy i rezultaty modelowania zjawisk termicznych i mechanicznych w układzie koło – klocek hamulcowy oraz wpływ ukształtowania i liczebności dylatacji na postacie i częstotliwości drgań własnych układu i ich wpływ na generowanie hałasu.

COMPARISON OF CONSTRUCTION OF RAILWAY BRAKE SHOE

Summary. The paper present constructional, technological and exploitation aspects of introducing dilatation gap in railway brakes shoe. Described also problems and results of modeling thermal and mechanical phenomena in wheel – brake shoe system. Take into account also influence shape and quantity of dilatation on form and characteristic frequency of system and their influence on noise generating.

1. WSTĘP

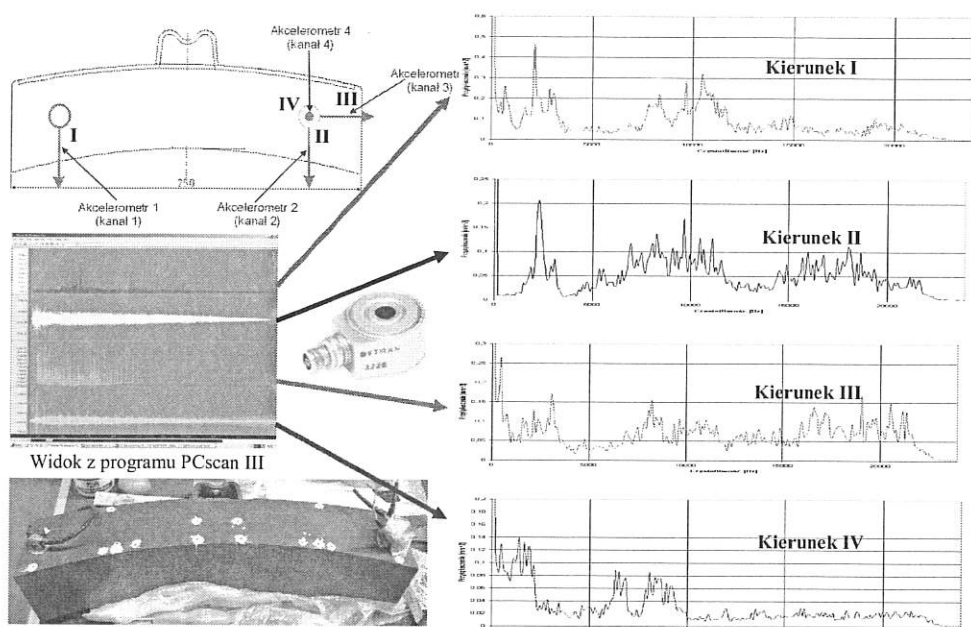
Eksploatowane obecnie w krajach Unii Europejskiej kolejowe wstawki hamulcowe stanowią zbiór konstrukcji różniących się znacznie swoją geometrią. Różnice w geometrii wynikają głównie z różnego ukształtowania i liczebności dylatacji. Niestety, brak jest danych literaturowych dotyczących metod doboru lub optymalizacji tych konstrukcji, a także na temat ich weryfikacji numerycznej. Wiodący producenci wstawek hamulcowych w większości przypadków nie potrafią udzielić jednoznacznych odpowiedzi na pytania dotyczące metod doboru geometrii konstrukcji oraz wpływu wprowadzenia dylatacji na własności eksploatacyjne produkowanych przez siebie wstawek hamulcowych. W związku z tym istnieje potrzeba realizowania badań numerycznych i doświadczalnych prowadzących do poprawy konstrukcji i możliwości świadomego sterowania własnościami eksploatacyjnymi wstawki hamulcowej.

Ze względu na fakt szczególnego wpływu elementów układu hamulcowego na bezpieczeństwo w transporcie szynowym oraz interdyscyplinarny charakter zjawisk zachodzących w układzie koło – klocek hamulcowy w trakcie hamowania pojazdu (zjawiska mechaniczne, termiczne, trybologiczne, termodynamiczne oraz zjawiska akustyczne, drgania i iskrzenie elementów ciernych), Katedra Transportu Szynowego, Wydziału Transportu Politechniki Ślą-

kiej prowadzi wieloletnie badania laboratoryjne, eksploatacyjne i numeryczne dotyczące układu wstawka hamulcowa - koło kolejowe.

2. TECHNOLOGICZNE, KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE ASPEKTY WPROWADZANIA DYLATACJI DO KONSTRUKCJI WSTAWEK HAMULCOWYCH

Na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku bezwładnościowym w skali rzeczywistej dla wstawek o różnej geometrii stwierdzono, że dylatacje mają wpływ na postacie i częstotliwości drgań własnych wstawki. Pomiaru i rejestracji przyspieszeń wstawki hamulcowej w funkcji czasu dokonano za pomocą dwóch trójosiowych akcelerometrów umieszczonych w dwóch przeciwnych miejscach wstawki – rys. 1.



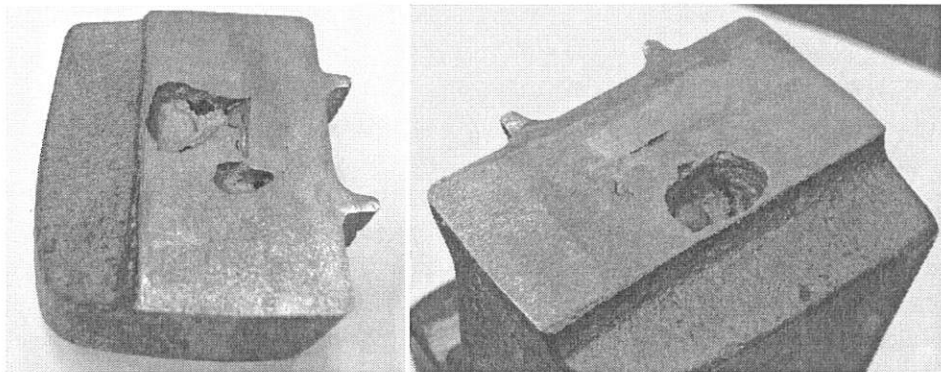
Rys. 1. Widok kompozytowej wstawki hamulcowej z rozmieszczonymi akcelerometrami oraz uzyskanymi wynikami podczas hamowania z 30 km/h

Fig. 1. The view of composite brake shoe with accelerometers and obtained data during braking from 30 km/h

Podczas badań stwierdzono, że wstawki hamulcowe generują hałas o szczególnej intensywności głównie przy prędkości 25-40 km/h. Podczas rejestracji hałasu w trakcie hamowania wstawkami wykonanymi z żeliwa P10 bez dylatacji uzyskano poziom hałasu przekraczający 130 dB, w prawie wszystkich zahamowaniach, natomiast dla wstawek z dylatacjami wykonanych z tego samego materiału rejestrowano w niewielkiej ilości zahamowań znacznie niższy poziom hałasu.

Drgania wstawki hamulcowej poza generowaniem hałasu, powodują również wzrost zużycia zarówno wstawki hamulcowej jak i koła. Wynika to wprost ze znacznego zwiększenia względnej drogi i prędkości ciał pary ciemnej [2].

Geometria dylatacji ma również wpływ na technologię wykonania wstawek hamulcowych. W trakcie wprowadzenia do konstrukcji wstawki hamulcowej dylatacji należy zwrócić uwagę na technologię jej wykonania.



Rys. 2. Widok przełomu wstawki hamulcowej z wadą powstałą podczas procesu odlewania
Fig. 2. The view of turning point with defect forming during casting

Dla procesu odlewania istotne jest, by konstrukcja miała możliwie mało przewężeń oraz elementów zakłócających znacznie przepływ ciepła (dylatacje oraz wtopki ze stali St4). Przedstawiona na rysunku 2 wada wstawki powstała w bezpośrednim sąsiedztwie dylatacji oraz wtopki.

3. OBCIĄŻENIA TERMICZNE I MECHANICZNE WSTAWKI HAMULCOWEJ Z DYLATACJAMI

W trakcie procesu hamowania całkowita suma energii kinetycznej ruchu postępowego wszystkich mas związanych z pociągiem oraz energii ruchu obrotowego elementów wirujących, tj. zestawów kołowych, wirników silników trakcyjnych i przekładni zębatych i potencjalnej pociągu zamieniana jest na energię dyssypacji. Energia ta w znacznej większości zamieniana jest na ciepło i rozpraszana do otoczenia poprzez konwekcję i emisję ciepłą. Energia tarcia natomiast zawiera w sobie składniki związane z [7]:

- generowaniem ciepła w układzie koło - klocek hamulcowy;
- drgania, hałas;
- energią odkształceń;
- energią powierzchniową;
- reakcjami trybologicznymi;
- tryboemisją, luminescencją i sublimacją;
- transformacje strukturalne materiałów ciernych.

Z badań prowadzonych przez J. Sadowskiego [4] wynika, że spotykane często w literaturze twierdzenie, że energia tarcia zamieniana jest na ciepło Q i odprowadzana do otoczenia, jest zbyt dużym uproszczeniem. Stosując podejście termodynamiczne podczas rozważań nad istotą tarcia można stwierdzić, że energia mechaniczna równoważna pracy sił tarcia A_{t1-2} wytracana jest całkowicie podczas tarcia na ciepło dyssypacji Q_{dyss} i pracę dyssypacji mechanicznej A_{dyss} wg wzoru 1 [4].

$$A_{t1-2} = Q_{dyss} + A_{dyss}$$

(1)

Ciepło dyssypacji Q_{dyss} powoduje nagrzewanie się elementów układu, natomiast praca dyssypacji mechanicznej A_{dyss} wynika z "rozdrabniania" i zużywania się ciał trących oraz z powstawania nowych powierzchni ciernych. Autor pracy [4] wskazuje, że udział pracy dyssypacji mechanicznej może sięgać w przypadku tarcia stali do 30%.

Podejście to pozwala wyjaśnić, dlaczego w przypadku hamowania wstawkami wykonanymi z tworzyw kompozytowych o przewodności cieplnej znacznie niższej od żeliwa, temperatury maksymalne kół kolejowych nie wzrastają proporcjonalnie do różnic tego współczynnika (jak można by oczekiwać na podstawie analizy rozkładu strumienia ciepła). Wynika stąd, że można tak sterować własnościami materiałowymi i konstrukcyjnymi, że generowany w trakcie hamowania sumaryczny strumień ciepła będzie znacznie niższy, a poprzez to obciążenia cieplne wstawek i kół kolejowych będą mniejsze. Z pracy [4] wynika również, że utrzymanie temperatury styku na poziomie zbliżonym do temperatury charakterystycznej (dla stali ok. 350°C) pozwala na maksymalizację odporności systemu trybologicznego na zużycie [4].

Stosując to podejście można zatem poszukiwać takich konstrukcji wstawek, które umożliwią redukcję temperatury w układzie oraz przy uwzględnieniu zagadnień termicznych, mechanicznych, przepływu strugi powietrza (konwekcja), jak również dynamiki przeprowadzić optymalizację konstrukcji.

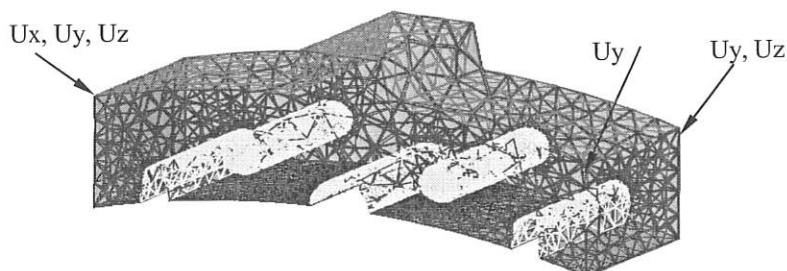
Modelując zjawiska w układzie koło – klocek hamulcowy zachodzące w trakcie hamowania pojazdu wprowadzono uproszczenia wynikające z trudności jednoczesnego uwzględnienia zjawisk sprzężonych, tj. zjawiska kontaktu w układzie koło - klocek oraz klocek - obsada hamulcowa, zjawiska termiczne, mechaniczne i dynamika układu. Podstawowe obciążenia termiczne i mechaniczne stosowane podczas obliczeń numerycznych zebrano w tabeli 1.

Tabela 1

Tabela podstawowych obciążeń termicznych i mechanicznych wstawki powstałych podczas hamowania pojazdu

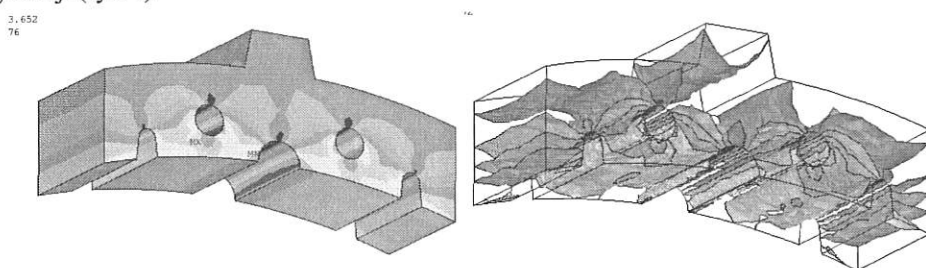
Typ obciążenia	Rodzaj	Miejsce obciążenia	Wartość	Jednostka
Termiczne	gęstość strumienia ciepła	Powierzchnia kontaktu wstawki z kołem	wynikająca z energii hamowania	W/m ²
	konwekcja	górne powierzchnie wstawki	wg wartości zapr. w UIC	W/m ² K
		boczne powierzchnie wstawki		W/m ² K
		powierzchnie dylatacji		W/m ² K
	warunki brzegowe	temperatura konwekcji	22 ⁰ C	⁰ C
		temperatura otoczenia	20 ⁰ C	⁰ C
		temperatura początkowa wstawki	20 ⁰ C	⁰ C
Mechaniczne	pochodzenia termicznego	w całej objętości wstawki	wynikające z analizy termicznej	Pa
	strukturalne	siły nacisku wstawki na koło	16 400	N
		siły tarcia	11% siły nacisku	N
	warunki brzegowe	utwierdzenia do wyznaczania naprężeń termicznych (3 podpory – 6 DOF)	-	-
		utwierdzenia sztywne powierzchni kontaktu z obsadą	-	-
		temperatura otoczenia	20 ⁰ C	⁰ C
		temperatura początkowa wstawki	20 ⁰ C	⁰ C

Zasadnicze znaczenie dla obciążeń termicznych ma nie tylko strumień cieplny, ale również rozkład wartości współczynnika konwekcji na poszczególnych powierzchniach zewnętrznych (rys. 3).



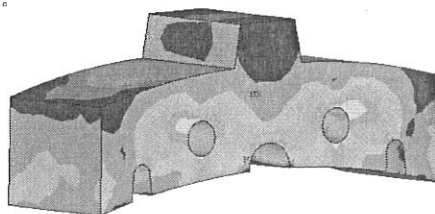
Rys. 3. Widok modelu wstawki hamulcowej typ D0 250 5D obciążonej termicznie
Fig. 3. The view of brake shoe model type D0 250 5D with thermal loads

Podczas symulacji przeprowadzonych na modelach numerycznych zaobserwowano, że wraz ze zwiększeniem gęstości strumienia ciepła oraz wzrostem współczynnika konwekcji znacznie rosną gradienty temperatur. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w pobliżu dylatacji (rys. 4).



Rys. 4. Gradient temperatur we wstawce D0 250 B
Fig. 4. Gradient of temperature in brake shoe type D0 250 B

Wartości i rozkład gradientów temperatur mają bezpośrednie przełożenie na naprężenia cieplne (rys. 5).

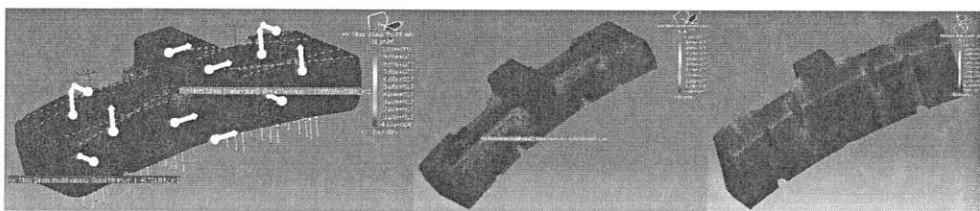
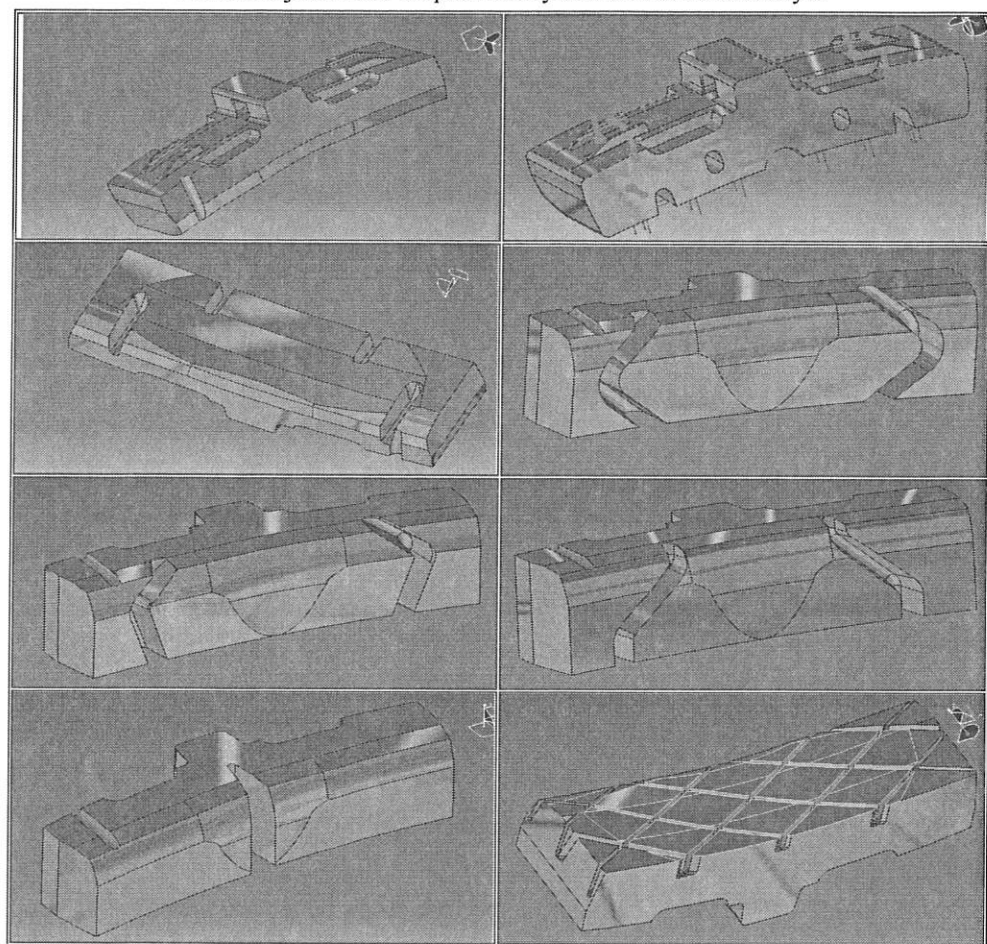


Rys. 5. Rozkład naprężeń termicznych wg hipotezy von Missesa
Fig. 5. Field of thermal stress according von Misses theory

Asymetria klocka hamulcowego wynikająca z pochyłu profilu tocznego koła wprowadza dodatkowe utrudnienia podczas próby utworzenia wstawki hamulcowej z optymalnym rozkładem naprężeń termicznych i mechanicznych. Typowe konstrukcje wstawek hamulcowych eksploatowanych w Polsce przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Konstrukcje obecnie eksploatowanych wstawek hamulcowych



Rys. 6. Przykład rozkładu obciążeń i naprężeń we wstawce ze zużyciem 15 [mm]

Fig. 6. Example of field of loads and stresses with 15 [mm] wear brake shoe

Obciążenia strukturalne modelu dostosowano w taki sposób, aby wiernie oddawały zjawiska statyczne i dynamiczne zachodzące w trakcie eksploatacji. W opracowanym modelu uwzględniono: siły pochodzące od nacisku obsady na wstawkę, siły tarcia w strefie kontaktu pomiędzy klockiem a kołem, siły wynikające z drgań klocka w trakcie hamowania (stick - slip) oraz utwierdzenie sztywne klocka poprzez obsadę i kontakt obsada - klocek jako "smooth body".

4. ANALIZA MODALNA WSTAWEK HAMULCOWYCH

Jak już wspomniano, powstające podczas hamowania drgania, szczególnie podczas hamowania przy prędkościach 25-40 km/h, wzbudzają wstawkę hamulcową w drgania o takiej częstotliwości, że generuje ona hałas o intensywności przekraczającej często 130 dB. Utworzenie wstawki, która posiada dylatację w swojej środkowej części, powoduje "przeniesienie" częstotliwości rezonansowej w taki zakres, który nie występuje w trakcie eksploatacji wstawki. Przedstawione w tabeli 3 częstości drgań własnych oraz odpowiadające im postacie (tabela 4) stanowią przykład analizy modalnej wykonanej w programie CATIA V5.

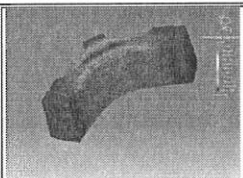
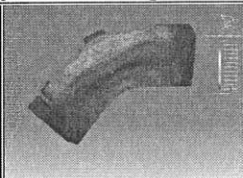
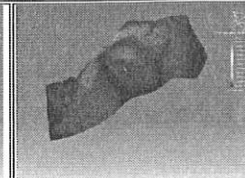
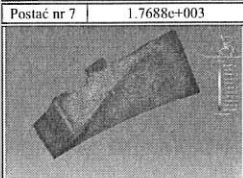
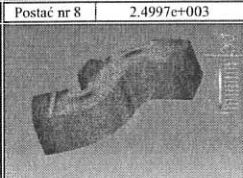
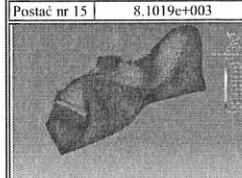
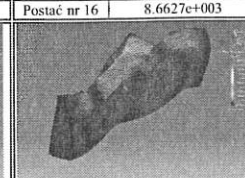
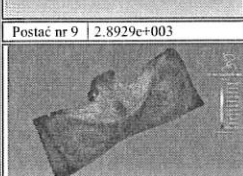
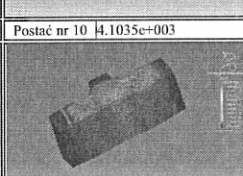
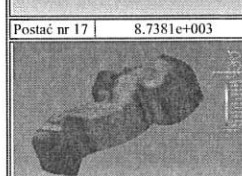
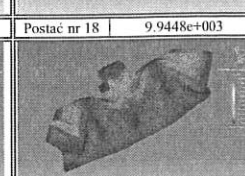
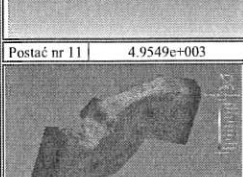
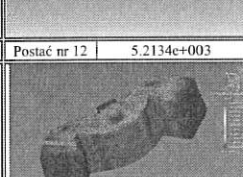
Tabela 3

Wyniki analizy modalnej wstawki wykonanej z żeliwa P10 bez dylatacji

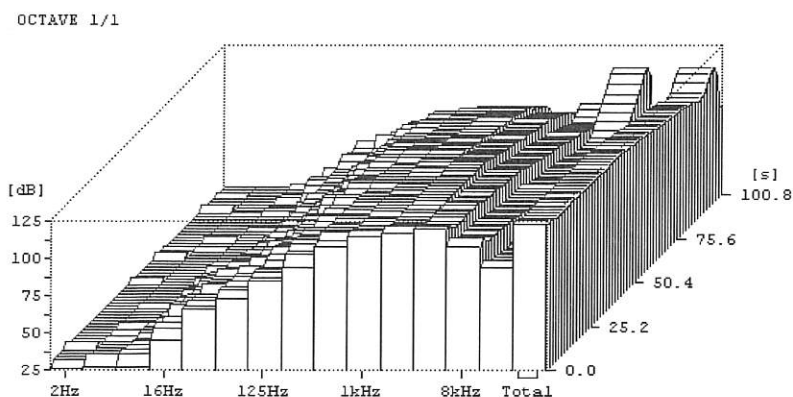
Nr postaci	Częstotliwość Hz	8	2.4997e+003	17	8.7381e+003	26	1.3606e+004
1	0.0000e+000	9	2.8929e+003	18	9.9448e+003	27	1.3847e+004
2	0.0000e+000	10	4.1035e+003	19	1.0187e+004	28	1.3979e+004
3	6.6025e-005	11	4.9549e+003	20	1.0394e+004	29	1.4314e+004
4	2.5572e-004	12	5.2134e+003	21	1.2248e+004	30	1.4421e+004
5	3.5245e-004	13	5.3764e+003	22	1.2466e+004		
6	5.6804e-004	14	7.2116e+003	23	1.2787e+004		
7	1.7688e+003	15	8.1019e+003	24	1.2851e+004		
		16	8.6627e+003	25	1.3527e+004		

Tabela 4

Postacie i częstotliwości drgań własnych wstawki hamulcowej bez dylatacji

					
Postać nr 7	1.7688e+003	Postać nr 15	8.1019e+003	Postać nr 16	8.6627e+003
					
Postać nr 9	2.8929e+003	Postać nr 17	8.7381e+003	Postać nr 18	9.9448e+003
					
Postać nr 11	4.9549e+003	Postać nr 19	1.0187e+004	Postać nr 20	1.0394e+004
					
Postać nr 13	5.3764e+003	Postać nr 14	7.2116e+003		

Na podstawie badań laboratoryjnych i stanowiskowych stwierdzono, że nawet niewielka zmiana konstrukcji układu polegająca na wprowadzeniu dylatacji we wstawce hamulcowej skutecznie eliminuje generowanie hałasu w czasie hamowania. Po korelacji wyników analizy modalnej z wynikami uzyskanymi z pomiarów (rys. 7.) można stwierdzić, że dla zahamowań wstawkami bez dylatacji generowanie drgań odbywa się w szerokim zakresie częstotliwości.



Rys. 7. Obraz widma częstotliwości dla zahamowania wstawką bez dylatacji wykonaną z żeliwa P10 wg programu nr 119 karty 541-4 UIC

Fig. 7. The view of frequency spectrum for braking with brake shoe without dilatation gap made from cast iron P10 according to n. 199 card 541-4 UIC

Można jednak zauważyć szczególne nasilenie przy prędkości pojazdu od 25 do 40 km/h. (90 sekunda). Jak pokazały wyniki analizy modalnej wstawek, wprowadzenie dylatacji powoduje znaczną zmianę postaci drgań własnych i przypadających im częstotliwości.

5. WNIOSKI

Reasumując, dylatacje wstawek hamulcowych mają wpływ na następujące aspekty:

1. Eksploatacyjne:

- umożliwiają zmniejszenie zużycia w wyniku redukcji temperatur maksymalnych i równomierniejszego ich rozkładu;
- powodują redukcje obciążeń termicznych koła;
- umożliwiają zmniejszenie zużycia poprzez redukcję drgań oraz zmniejszenie względnej drogi tarcia;
- pozwalają na redukcję hałasu generowanego podczas hamowania przy prędkościach około 30 km/h;
- pozwalają na gaszenie iskier generowanych przez produkty zużycia;
- wprowadzają zmienną powierzchnię kontaktu w czasie okresu eksploatacyjnego;
- mogą być przyczyną złożenia powierzchni tocznej kół;
- pozwalają na usuwanie produktów zużycia z powierzchni kontaktu, a poprzez to wpływają na zmniejszenie zużycia elementów trących i zwiększenie stabilności współczynnika tarcia.

2. Konstrukcyjne:

- powalają na lepszy rozkład naprężeń;
- umożliwiają lepszy rozkład stref kontaktu, a poprzez to lepszy rozkład temperatury (gęstości strumienia ciepła);
- zmieniają częstotliwości i odpowiadające im postacie drgań własnych;
- zmniejszają masę wstawki a poprzez to masę nieodsprężynowaną pojazdu;
- wprowadzają dodatkowe karby konstrukcyjne, które osłabiają wytrzymałość wstawki;
- powodują często znaczny wzrost gradientu temperatur, a poprzez to wzrost naprężeń termicznych.

3. Technologiczne:

- stwarzają trudności na etapie projektowania i prowadzenia procesu technologicznego, powodują konieczność wprowadzania dodatkowych operacji technologicznych, sprzyjają procesom powstawania wad materiałowych np. podczas odlewania,;
- redukują ilość materiału niezbędnego do wytworzenia wstawki;
- weryfikacja konstrukcji wstawki żeliwnej z dylatacjami wg zaleceń normatywnych za pomocą próby kafarowej przestaje być reprezentatywna dla całej wstawki hamulcowej, a uzyskane w ten sposób wyniki badań nie gwarantują poprawnych własności eksploatacyjnych.

Literatura

1. Grant celowy nr 6T120782001C/5667, pt.: "Opracowanie technologii i uruchomienie produkcji nowych wstawek kompozytowych klocka hamulcowego dla polskiego i zagranicznego taboru kolejowego".
2. Piec P.: Zjawiska kontaktowe w elementach pojazdów szynowych, WiZPITE, Kraków 1999
3. Orłóś Z.: Naprężenia cieplne. PWN, Warszawa 1991.
4. Szarguta J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa 1992.
5. Taler J.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. WNT, Warszawa 2003.
6. Sadowski J.: Termodynamiczne aspekty procesów trybologicznych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 1997.
7. Kostkowski E.: Przepływ ciepła. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Paweł Piec
Profesor Politechniki Krakowskiej