

OCENA ROZKŁADU ŚREDNIEGO WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA KOLEJOWEGO HAMULCA TARCZOWEGO

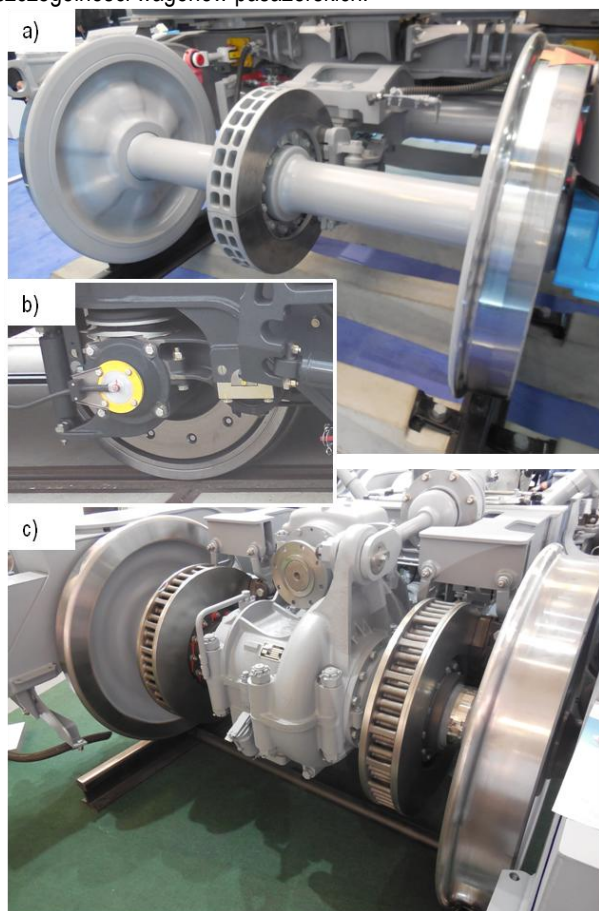
Streszczenie

Jednym z badań prowadzonych na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym jest pomiar współczynnika tarcia dla hamulca tarczowego lub klockowego przy różnych symulacjach hamowań pociągu. Podczas symulowanych badań hamulcowych zgodnie z programem badań przewidzianym dla kolejowego hamulca tarczowego [3], rejestruje się przebiegi chwilowego współczynnika tarcia w funkcji czasu hamowania. Następnie obliczany jest średni współczynnik tarcia wyznaczony z całki chwilowego współczynnika tarcia po drodze hamowania. Jest to badanie jakie prowadzi się dla pary ciernej hamulca w szczególności dla dopuszczenia do eksploatacji danego materiału z jakiego wykonany jest klocek lub okładzina cierna.

Celem artykułu jest ocena wyników badań rozkładu średniego współczynnika tarcia hamulca tarczowego używanego w czasie serii hamowań w tych samych warunkach początkowych przy różnym stanie technicznym tarczy hamulcowej.

WSTĘP

W pojazdach szynowych, ze względu na ciągły wzrost prędkości jazdy w celu uzyskania wymaganej drogi hamowania, stosuje się hamulec tarczowy jako hamulec zasadniczy. Dotyczy to w szczególności wagonów pasażerskich.



Rys. 1. Widok kolejowego hamulca tarczowego zamocowanego: a) na osi tocznej zestawu kołowego, b) na kole zestawu kołowego, c) na osi napędnej zestawu kołowego

W przypadku elektrycznych zespołów trakcyjnych EZT również stosuje się hamulec tarczowy, jednak hamowanie odbywa się przy użyciu hamulca elektrodynamicznego wspomaganego w ostatej fazy hamulcem elektropneumatycznym (tarczowym) [5]. Na rysunku 1 przedstawiono widok hamulca tarczowego występującego w różnych pojazdach szynowych.

Do niewielu wad hamulca tarczowego zalicza się jego wrażliwość na oblodzenie pary ciernej (również na obecność wody lub śniegu) oraz brak możliwości kontroli stanu pary ciernej tarcza-okładzina w całym procesie eksploatacji. Jest to szczególnie zauważalne w wagonach kolejowych, w których tarcze hamulcowe zamocowane są na osi zestawu kołowego między kołami [7]. W celu sprawdzenia zużycia okładzin ciernych i tarcz hamulcowych, konieczne jest wykorzystanie kanału rewizyjnego dla przeprowadzenia kontroli a w sytuacji osiągnięcia granicznego zużycia elementów ciernych również ich wymiany [2]. Na rysunku 2 przedstawiono widok zestawu kołowego z zamocowanymi tarczami hamulcowymi wagonu pasażerskiego.

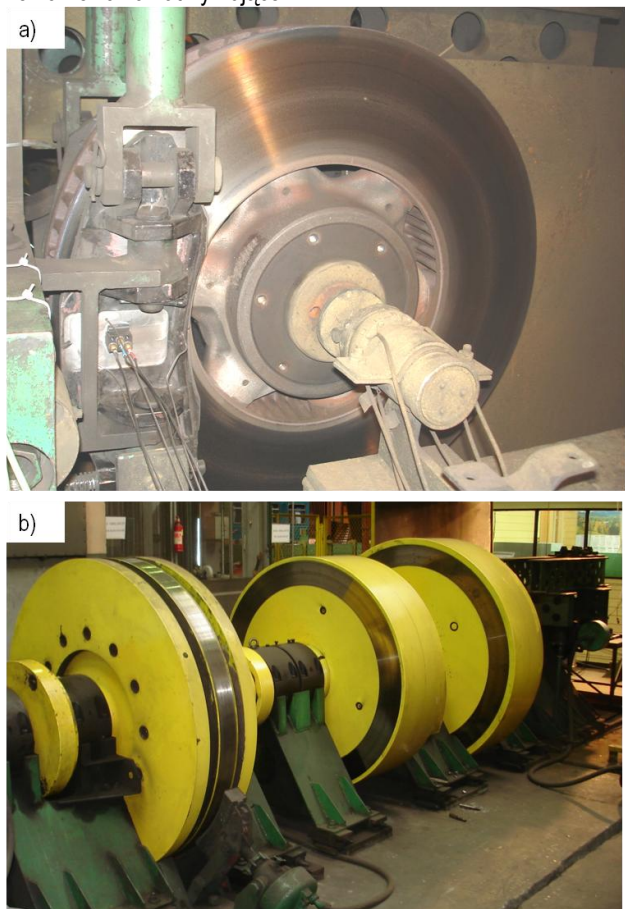


Rys. 2. Widok z kanału rewizyjnego na zestaw kołowy wózka GP200 z tarczami hamulcowymi wagonu pasażerskiego z2AMG-FP

1. METODYKA BADAŃ

Badania o charakterze ciernym (gdzie rejestrowano zmianę współczynnika tarcia w czasie hamowania) przeprowadzone zostały w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców klockowych i tarczowych.

wych pojazdów szynowych. Obiektem badań były tarcze hamulcowe typu 590×110, 610×110 oraz 640×110 z wentylującymi łopatkami, co przedstawia rysunek 3 oraz komplety okładzin typu 175 i 200 FR20H.2 z materiału organicznego. W czasie badań przeprowadzono hamowania zatrzymujące.



Rys. 3. Obiekt badań na stanowisku hamulcowym kolejowego hamulca tarczowego: a) tarcza hamulcowa typu 640×110 z zamocowanym kompletem okładzin ciernych typu 200, b) widok na część napędową stanowiska hamulcowego z masami wirującymi

Do badań wykorzystano program badawczy 2B1 (I) zgodnie z załącznikiem C.2 zawartym w Kodeksie UIC 541-3. Hamowania zatrzymujące przeprowadzono z prędkości $v = 120 \text{ km/h}$. Masa hamującą przypadającą na jedną tarczę wyniosła w czasie badań w zależności od zastosowanej tarczy $M=4,4, 4,7$ i $6,7 \text{ t}$. Nacisk okładzin do tarczy wyniósł $N=25 \text{ kN}$ (dla tarczy o średnicy 590 mm) oraz $N=28 \text{ kN}$ (dla tarcz o średnicy 610 i 640 mm). Podczas badań na stanowisku bezwładnościowym rejestrowano chwilowy współczynnik tarcia μ_a , w każdej chwili hamowania zgodnie z zależnością (1) [3]:

$$\mu_a = \frac{F_t}{F_b} \quad (1)$$

gdzie: F_t – chwilowa siła styczna odniesiona do promienia hamowania r ,
 F_b – całkowita chwilowa siła nacisku na tarczę hamulcową.

Następnie obliczany był średni współczynnik tarcia μ_m , wyznaczany z całki oznaczonej chwilowego współczynnika tarcia po drodze hamowania s_2 zgodnie z równaniem (2) [3]:

$$\mu_m = \frac{1}{s_2} \int_0^{s_2} \mu_a ds \quad (2)$$

gdzie: s_2 – droga hamowania w metrach.

Na podstawie zależności (1) oraz (2) wyznaczane zostały charakterystyki $\mu_a=f(t)$ oraz $\mu_m=f(v)$. Podczas badań stanowiskowych hamulca kolejowego rejestruje się przebieg chwilowego współczynnika tarcia w czasie hamowania od zadanej prędkości hamowania aż do zatrzymania. Na tej podstawie określa się chwilę osiągnięcia wartości maksymalnej oraz minimalnej chwilowego współczynnika tarcia. Przebiegi otrzymane z zależności (2) stanowią końcowe zestawienia sprawdzające zachowanie się współczynnika tarcia w całym zakresie prędkości hamowania danego pojazdu.

Podczas badań rozkładu średniej temperatury tarczy hamulcowej, wykonano serię 40 hamowań do oceny statystycznej. Badanie również miało na celu wyznaczenie minimalnej ilości powtórzeń, zapewniających otrzymanie wyników w zadowalającym przedziale ufności, wynoszącym 95%, przy przyjętym poziomie istotności, $\alpha=0,05$, przy którym obserwuje się najmniejszy współczynnik zmienności.

Analizie statystycznej poddano wartość średniego współczynnika tarcia w chwili zatrzymania przy nieziennej prędkości początku hamowania, nacisku na tarczę i masie hamującej. Każde kolejne hamowanie było poprzedzone chłodzeniem tarczy na wolnym powietrzu poprzez jej swobodny obrót, przez co symulowano jazdę wagonu z prędkością 100 km/h. Po obniżeniu temperatury tarczy do wartości $T=50^\circ\text{C}$ przerywano jej chłodzenie i rozpoczynano kolejne hamowanie.

W celu wyznaczenia minimalnej liczby hamowań, wykorzystano zależności na następujące wzory statystyczne [1, 4]:

1. Wartość średnia:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

gdzie: x_i – i-ta wartość zmiennej, $x=1, 2, \dots, n$,
 n – liczba hamowań.

2. Odchylenie standardowe:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

3. Pół przedział ufności:

$$\frac{1}{2} L_{1-\alpha} = t_{(n-1; 1-\alpha)} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

gdzie: t – współczynnik testu t-studenta.

4. Górna i dolna granica przedziału ufności:

$$x^{(+)} = \bar{x} + \frac{1}{2} L_{1-\alpha} \quad (6)$$

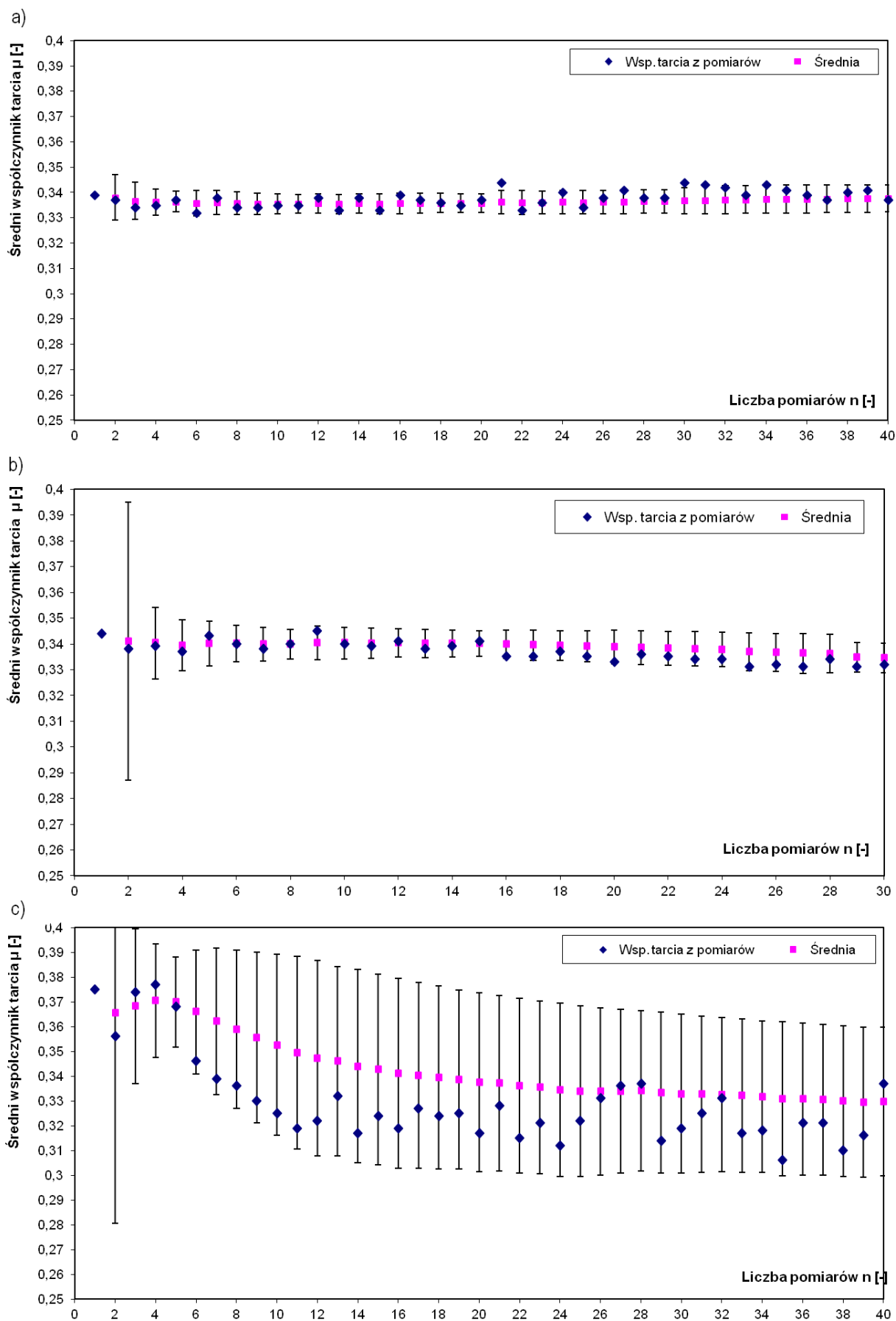
$$x^{(-)} = \bar{x} - \frac{1}{2} L_{1-\alpha}$$

5. Współczynnik zmienności:

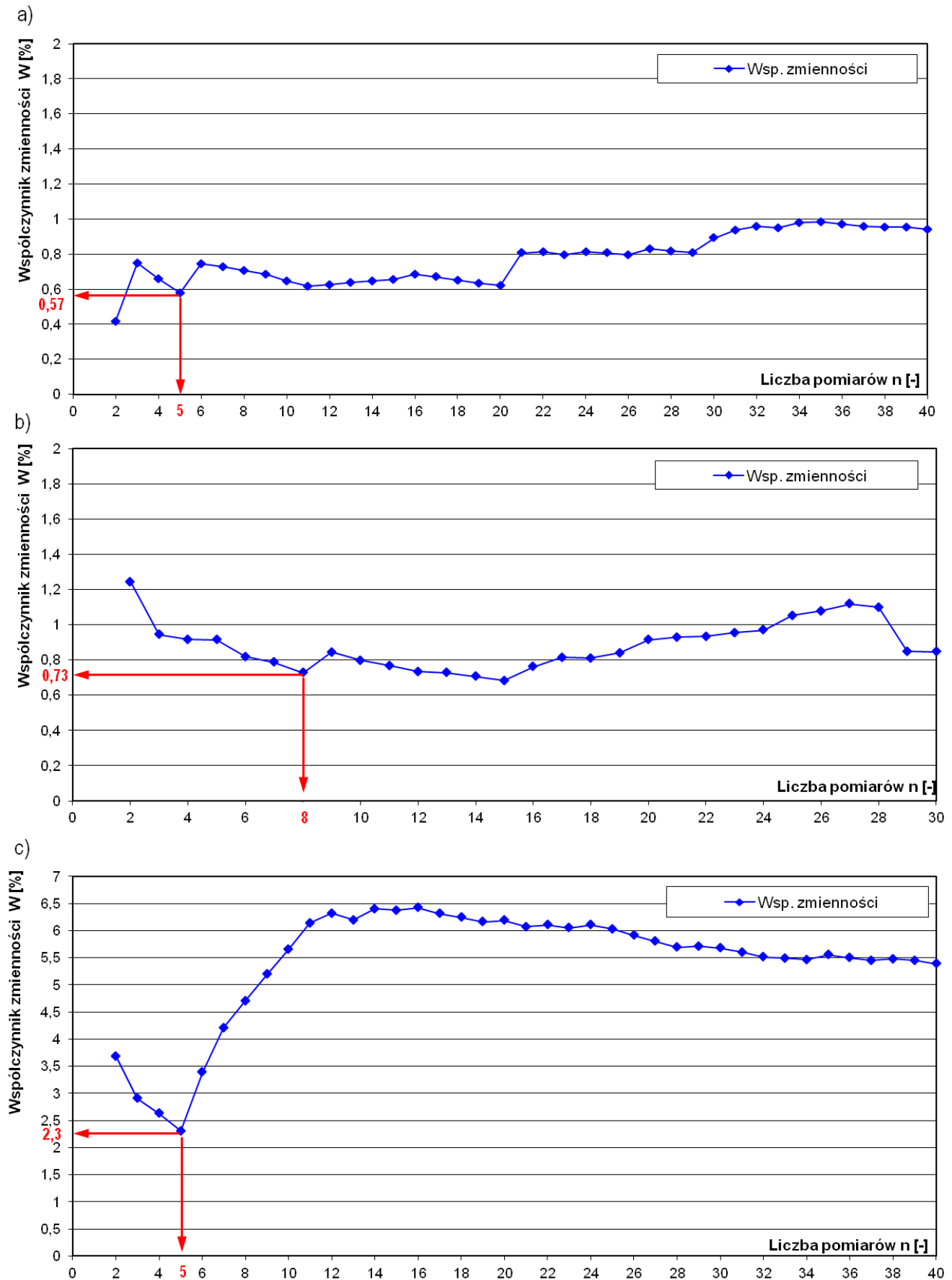
$$W = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (7)$$

2. WYNIKI BADAŃ

Po zastosowaniu zależności (3-7), otrzymano wyniki z obliczeń statystycznych z pomiaru średniego współczynnika tarcia μ_m . Rysunek 4 prezentuje wartości współczynnika tarcia uzyskanego z danego hamowania oraz wartość średnią współczynnika tarcia z uwzględnieniem górnej i dolnej granicy przedziału ufności przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$.



Rys. 4. Przebieg współczynnika tarcia między okładziną a tarczą hamulcową oraz średnia jego wartość uzyskana na tarczy:
 a) 590×110 (nowa), b) 610×110 (regenerowana), c) 640×110 (regenerowana)



Rys. 5. Przebieg współczynnika zmienności uzyskanego z obliczeń statystycznych dla tarczy: a) 590×110 (nowa), b) 610×110 (regenerowana), c) 640×110 (regenerowana)

Na rys. 5 jest przedstawiony procentowy przebieg współczynnika zmienności W wyznaczonego z pomiaru współczynnika tarcia, na podstawie którego możliwe było określenie liczby pomiarów. Na podstawie rysunku 5, po wykonaniu 40 pomiarów stwierdzono, że minimalna liczba powtórzeń hamowań, zapewniających otrzymanie wyników średniego współczynnika tarcia w oczekiwanym przedziale ufności, przy przyjętym poziomie istotności $\alpha=0,05$, wynosi 5 pomiarów dla tarczy nowej.

W przypadku tarcz regenerowanych, na podstawie analizy statystycznej wyników uzyskanych z pomiaru średniego współczynnika tarcia przyjęto, że do badań zasadniczych na stanowisku hamulcowym należy wykonać 5 (dla tarczy typu 640) lub 8 (dla tarczy typu 610) powtórzeń hamowania. Dla tej liczby hamowań otrzymano najniższy współczynnik zmienności w oczekiwanym przedziale ufności i przy założonym poziomie istotności. Ze względu na wartości liczbowe współczynnika zmienności dla pomiarów średniego współczynnika tarcia nie przekraczającego 10%, zgodnie z [4], stwierdzono nieistotne zróżnicowanie statystyczne analizowanych wielkości.

PODSUMOWANIE

Analizując wyniki badań na stanowisku hamulcowym kolejowego hamulca tarczowego w czasie hamowań zatrzymujących można stwierdzić, że:

- 1) Na przebieg średniego współczynnika tarcia również wpływ ma stan tarczy hamulcowej. Regenerowane pierścienie cierne poprzez ich przetoczenie powodują wahania średniego współczynnika przy hamowaniach w tych samych warunkach początkowych.
- 2) Hamowania zatrzymujące przeprowadzone na nowej tarczy hamulcowej (590×110) wykazały, że odchylenie standardowe o średniej wartości współczynnika tarcia wyniosło $26 \cdot 10^{-4}$, w przypadku tarcz regenerowanych, wartości te odpowiednio wyniosły $30 \cdot 10^{-4}$ (dla tarczy 610×110) i $184 \cdot 10^{-4}$ (dla tarczy 640×110). Zadowalający wynik w przypadku tarczy o średnicy 610mm może wynikać z przeprowadzonej mniejszej próby (30 hamowań zamiast 40-tu w przypadku tarcz 590 i 640).
- 3) Czynniki wpływającymi na wahania średniego współczynnika tarcia rozumianego ich dużym rozrzutem od wartości średniej, może mieć wpływ wartość bicia osiowego tarczy oraz mikropęknięcia na powierzchni tarczy hamulcowej. Zgodnie z [6] tarcz po wprasowaniu na oś zestawu kołowego nie może charakteryzować się wartością bicia osiowego większego niż 0,5mm.
- 4) Mikropęknięcia występujące na powierzchni tarczy hamulcowej, są również widoczne po przetoczeniu pierścienia ciernego w szczególności w okolicy promienia wewnętrznego. Zjawisko pęknięć termicznych w wyniku cyklicznego hamowania i chłodzenia tarczy hamulcowej świadczy o zmianach metalograficznych w warstwie wierzchniej tarczy [8]. Dodatkowo mikropęknięcia mogą dodatkowo wpłynąć na zmiany płaskości powierzchni tarczy, co również może mieć wpływ na ograniczony kontakt okładziny z tarczą hamulcową a w konsekwencji na niższą wartość średniego współczynnika tarcia.
- 5) Na podstawie analizy statystycznej wyników średniego współczynnika tarcia przyjęto, że do badań zasadniczych na stanowisku hamulcowym należy wykonać 5 powtórzeń dla tarczy nowej. Dla tej liczby hamowań otrzymano zadowalający współczynnik zmienności w oczekiwanym przedziale ufności i przy założonym poziomie istotności, nie przekracza 0,6%. W przypadku tarcz regenerowanych przy wykonaniu 5-ciu powtórzeń współczynnik zmienności znajduje się w przedziale 1-2,3%, co można uznać za wynik akceptowalny.

Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, program LIDER V, umowa nr LIDER/022/359/L-5/13/NCBR/2014

BIBLIOGRAFIA

1. Gajek L., Kaluszka M., *Wnioskowanie statystyczne – modele i metody*. WNT, Warszawa 2000.
2. Gruszewski M., *Wybrane zagadnienia eksploatacji hamulca tarczowego*, Technika transportu Szynowego 6-7/1995, s. 84-86.
3. Karta UIC 541-3, *Hamulec: hamulec tarczowy i okładziny hamulcowe, warunki ogólne dla prób na stanowisku badawczym*, Wydanie 6-te listopad 2006.
4. Krysicki W., Włodarski L., *Analiza matematyczna w zadaniach*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2007.
5. Piechowiak T., *Hamulce pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
6. Rail Consult Gesellschaft für Verkehrsberatung mbH. *Wagon osobowy Z1 02, układ jezdny-tom 2*. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa.
7. Sorochtej M., *Hamulec tarczowy pojazdów szynowych*. Przegląd kolejowy 6/93.
8. Ścieszka S.F., *Hamulce cierne. Zagadnienia materiałowe, konstrukcyjne i tribologiczne*. Wydawnictwo Gliwice-Radom 1998.

ESTIMATION OF THE DISTRIBUTION OF THE AVERAGE FRICTION COEFFICIENT OF DISK BRAKE STATION

Abstract

One of the studies conducted on stationary test position of the brake measurement of the coefficient of friction for disc brakes or block brake at various imitations of braking of the train. During the model tests of brake pads in accordance with the test program provided for the station disk brake [3] registers the mileage of temporary friction coefficient in function of time of braking. Then calculated the average coefficient of friction calculated from the integral of the temporary coefficient of friction on the way of braking. This study, conducted for friction pairs of brakes, in particular, approval of this material, and what made the block or friction pad.

The purpose of this paper is to assess the results of studies of the distribution of average coefficient of friction of disk brakes, are obtained during a series of braking in the same initial conditions under different technical condition of the brake disc.

Autorzy:

Dr inż. **Wojciech Sawczuk** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3, Tel. 61 665-2023, Fax. 61 665-2204, e-mail: wojciech.sawczuk@!put.poznan.pl