

WOJCIECH SAWCZUK*

BADANIE WYBRANYCH PARAMETRÓW PROCESU
HAMOWANIA HAMULCA TARCZOWEGORESEARCH ON SELECTED PROCESS PARAMETERS
OF DISC BRAKE

Streszczenie

W niniejszym artykule zaprezentowano metodykę badań oraz wyniki uzyskane na bezwładnościowym stanowisku po przeprowadzeniu badań ciernych na kolejowym hamulcu tarczowym. Na podstawie serii badań o charakterze trybologicznym przebadano pary cierne hamulca tarczowego i wyznaczono charakterystyki procesu hamowania w zależności od prędkości hamowania, docisku okładzin do tarczy hamulcowej oraz mas hamujących. Na podstawie wyników z ciernych badań stanowiskowych wyznaczono zależności współczynnika tarcia (chwilowego i średniego), temperatury oraz drogi hamowania, w funkcji zużycia okładzin i prędkości początku hamowania.

Słowa kluczowe: hamulec tarczowy, średni współczynnik tarcia, temperatura tarczy w chwili zatrzymania, droga hamowania, czas hamowania

Abstract

This paper presents a method of research and results obtained at inertial station after carrying out friction tests of railway disc brake. On the basis of series of tests of tribological character, friction sets of disc brake were tested and characteristics of the process of braking depending on braking velocity, disc's clam to the brake disc and braking masses were defined. On the basis of results from friction stationary research, dependencies of coefficient of friction (instantaneous and average), temperature of disc brake and braking distance in the function of the wear of pads and speed at the beginning of braking were determined.

Keywords: disc brake, average friction coefficient, disc temperature at stoppage, braking distance, time of braking

* Dr inż. Wojciech Sawczuk, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

Ze względu na coraz większe prędkości jazdy pociągów pasażerskich i towarowych hamulec tarczowy staje się podstawowym urządzeniem hamulcowym zarówno w wagonach, jak i w lokomotywach. Również szereg zalet tego rodzaju hamulca, jak np. stały przebieg współczynnika tarcia w funkcji prędkości w stosunku do tradycyjnego hamulca klockowego, uzasadnia jego stosowanie i to zarówno w pojazdach kolejowych, jak i w pojazdach szynowych komunikacji miejskiej. Mimo wielu zalet układu hamulcowego, zamocowanie tarcz hamulcowych na osi pomiędzy kołami zestawu kołowego znacznie utrudnia kontrolę zużycia pary ciernej tarcza–okładzina. Wymusza ono na obsłudze i pracownikach zakładów naprawczych wchodzenie pod wagon w celu zdiagnozowania układu hamulcowego, sprawdzenia poprawności jego działania, kontroli zużycia oraz przeprowadzenia niektórych napraw bieżących. W artykule przedstawiono zależności przebiegu współczynnika tarcia, temperatury tarczy oraz czasu i drogi hamowania w funkcji wybranych grubości okładzin ciernych oraz innych parametrów hamowania uzyskanych po przeprowadzeniu stanowiskowych badań kolejowego hamulca tarczowego w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu.

2. Metodyka stanowiskowych badań ciernych hamulca tarczowego

Badania dotyczące wyznaczenia charakterystyk procesu hamowania w zależności od zużycia okładzin ciernych zostały przeprowadzone w oparciu o założenia eksperymentu czynnego zgodnie z [6, 7]. W czasie badań celowo i w określony sposób zmieniano parametry wejściowe (stanu układu hamulcowego) i obserwowano ich wpływ na zmianę parametru wyjściowego.

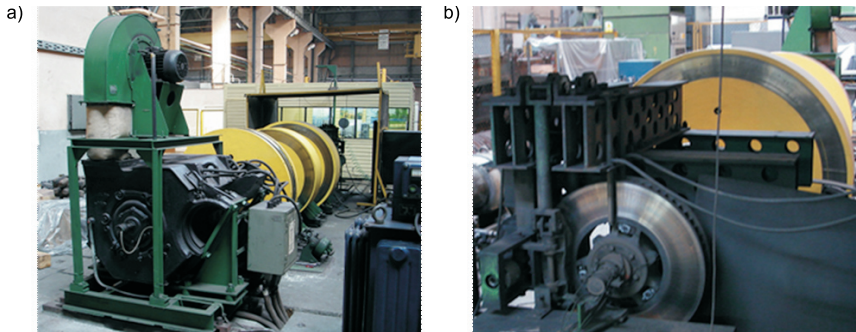
Badaniami została objęta tarcza hamulcowa o wymiarach 610×110 z wentylującymi łopatkami wykonana z żeliwa szarego oraz trzy komplety okładzin hamulcowych typu 200 FR20H.2 firmy Fenoplast. Do badań stanowiskowych zastosowano jedną parę okładzin nowych o grubości $G_1 = 35$ mm oraz dwie pary zużyte o grubości $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm.

Badania zostały przeprowadzone na stanowisku hamulcowym bezwładnościowym, przedstawionym na rys. 1. Na stanowisku jest możliwe wykonanie badań kolejowego hamulca klockowego oraz hamulca tarczowego, odzwierciedlających rzeczywiste warunki, jakie występują podczas hamowania wagonu.

Badania stanowiskowe na hamulcach kolejowych prowadzono zgodnie z programami zawartymi w karcie UIC 541-3. Każdy program badań odnosi się do specyficznych warunków pracy hamulca w czasie eksploatacji pojazdu. Do badań wybrano program badawczy C – szybka jazda. Parametrami sterowanymi w czasie badań trybologicznych były:

- grubość okładziny ciernej: $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm,
- docisk okładziny do tarczy: $p = 28$ i 44 kN,
- prędkość początku hamowania: $v = 50, 80, 120, 160$ i 200 km/h,
- masa hamująca przypadająca na jedną tarczę: $M = 4,4$ i $7,5$ t.

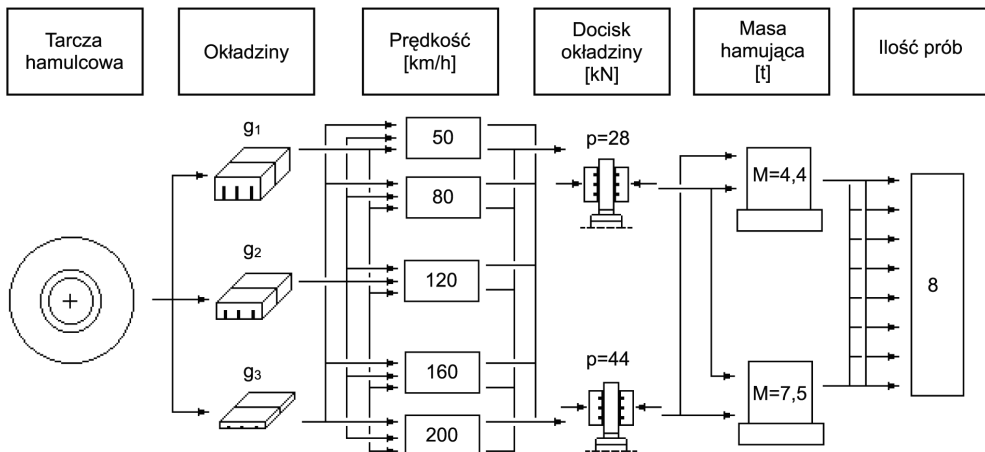
Przed rozpoczęciem zasadniczych badań o charakterze trybologicznym przeprowadzono serię hamowań docierającą okładziny cierne. Zgodnie z [4] hamowania wstępne należy prowadzić do chwili uzyskania odnowienia powierzchni ciernej okładziny przekraczającej 75% powierzchni przed docieraniem.



Rys. 1. Stanowisko hamulcowe do badań kolejowych układów hamulcowych (klockowych i tarczowych): a) widok części napędowej stanowiska, b) widok części pomiarowej stanowiska

Fig. 1. Test stand for examining railway braking systems (block and disk brakes): a) view of the bench drive part, b) view of the measuring part

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg procesu badań na stanowisku hamulcowym z uwzględnieniem możliwych kombinacji hamowań. W czasie badań zmieniano grubości okładzin ciernych, prędkości hamowania, docisk okładzin ciernych do tarczy oraz masy hamujące. Podczas badań, dla każdej grubości okładziny, prędkości początku hamowania, docisku do tarczy i masy hamującej wykonano po 8 powtórzeń. Uzasadnienie powyższej ilości prób wynika z przeprowadzonych badań wstępnych poprzedzających badania zasadniczych. Minimalnej ilości powtórzeń, zapewniających otrzymanie wyników w zadowalającym przedziale ufności, wynoszącym 95%, przy przyjętym poziomie istotności, $\alpha = 0,05$, przy którym zaobserwowano najmniejszy współczynnik zmienności – wyniosła 8. W sumie podczas badań trybologicznych wykonano 480 hamowań bez docierania okładzin ciernych.



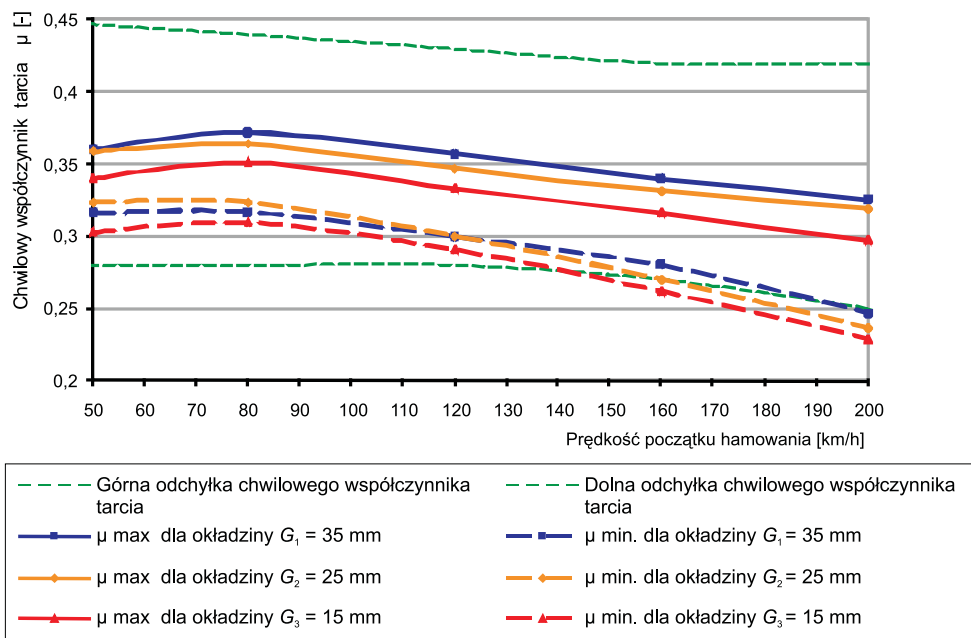
Rys. 2. Schemat przebiegu badań z uwzględnieniem kombinacji hamowań

Fig. 2. Scheme of the investigation course considering braking combination

3. Wyniki badań

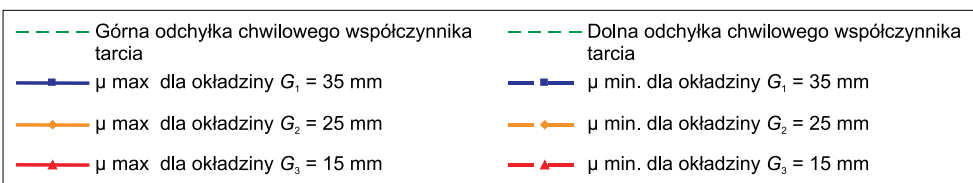
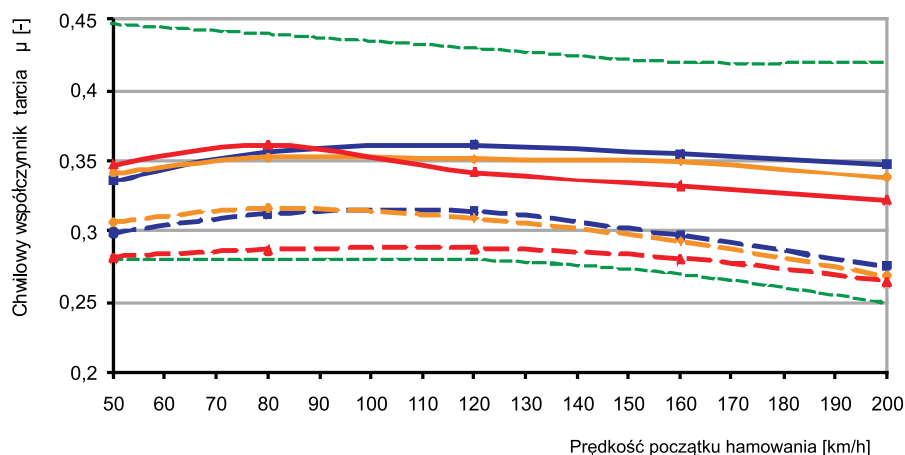
Badanie współczynnika tarcia przeprowadzono na parze ciernej utworzonej z okładziny typu FR20H.2 wykonanej z materiału organicznego oraz tarczy hamulcowej *Kovis* z żeliwa szarego. Celem badania było wyznaczenie współczynników tarcia w zależności od grubości okładzin ciernych, nacisku N okładziny do tarczy oraz masy hamującej M .

Wyniki z badań chwilowego współczynnika tarcia dla trzech okładzin (35, 25 i 15 mm) zostały przedstawione na rys. 3 i 4 z uwzględnieniem granicy górnej i dolnej chwilowego współczynnika tarcia dla pojazdów szynowych zawartego w karcie UIC 541-3 [4] dla kolejowego hamulca tarczowego. Po scałkowaniu wartości chwilowego współczynnika tarcia po drodze hamowania s oraz ponownym podzieleniu przez s otrzymano wartość średnią współczynnika tarcia. Zależność średniego współczynnika tarcia dla tych samych parametrów hamowania, jak przy badaniu chwilowego współczynnika tarcia, przedstawiają rys. 5 i 6. Wyniki zostały odniesione do odchyłki górnej i dolnej średniego współczynnika tarcia wymaganego przez kartę UIC 541-3 [4].



Rys. 3. Zależność chwilowego współczynnika tarcia od prędkości początku hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 44$ kN i masie hamującej $M = 7,5$ t

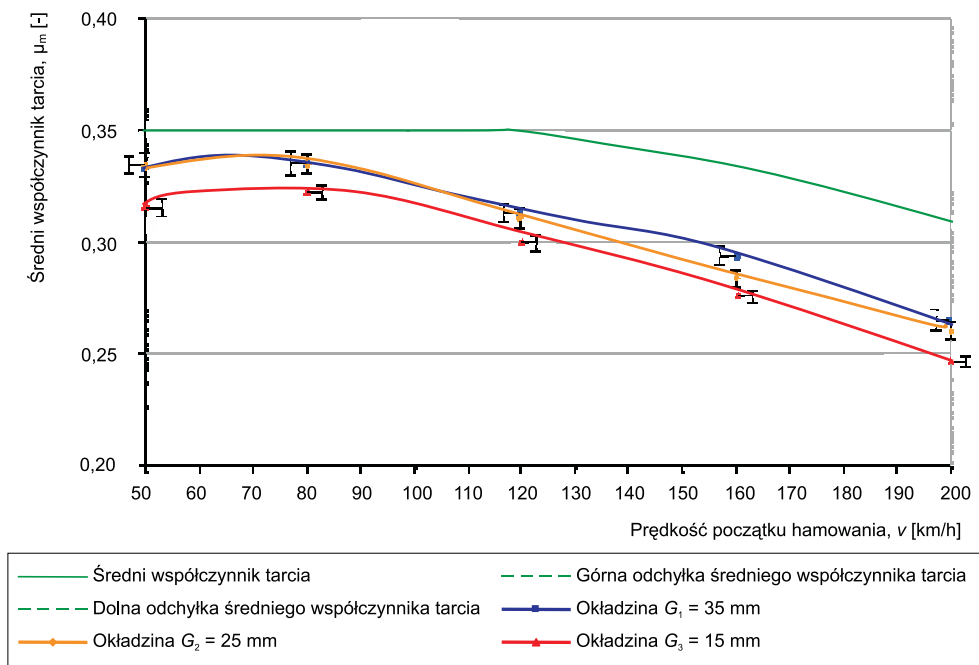
Fig. 3. . Dependence of the instantaneous friction coefficient on the braking start speed for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 44$ kN and braking mass $M = 7,5$ t



Rys. 4. Zależność chwilowego współczynnika tarcia od prędkości początku hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 28$ kN i masie hamującej $M = 4,4$ t

Fig. 4. Dependence of the instantaneous friction coefficient on the braking start speed for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 28$ kN, and braking mass $M = 4,4$ t

Podczas badań stanowiskowych stwierdzono, że zakresy wartości chwilowego współczynnika tarcia w funkcji prędkości początku hamowania dla trzech rozpatrywanych grubości okładzin ciernych w dużej części pokrywają się ze sobą. Jedynie różnice określono w obrębie dolnej granicy wartości chwilowego współczynnika tarcia badanych okładzin. W przypadku okładziny nowej o grubości 35 mm uznano wyższą wartość współczynnika tarcia w całym zakresie prędkości początku hamowania względem okładzin o grubości 25 i 15 mm przy docisku okładziny do tarczy z siłą $N = 44$ kN i masą hamującą $M = 7,5$ t. W pozostałych przypadkach hamowań np. docisk do tarczy $N = 28$ kN i masą hamującą $M = 4,4$ t, obserwuje się wpływ grubości okładziny na obniżenie chwilowego współczynnika tarcia dopiero przy hamowaniach z prędkości powyżej 80 km/h. Ponadto podczas badań stwierdzono, że poza hamowaniem z naciskiem okładziny do tarczy $N = 44$ kN i masie hamującej $M = 7,5$ otrzymane wartości maksymalnego i minimalnego współczynnika tarcia mieszczą się w przedziale między górną a dolną granicą wartości chwilowego współczynnika tarcia zalecanego przez kartę UIC 541-3 dla pary cierniej: żeliwna tarcza i okładzina z tworzywa sztucznego. Hamowania powyżej 160 km/h dla powyższego przypadku ($N = 44$ kN i $M = 7,5$ t) powodują obniżenie wartości minimalnego współczynnika tarcia poniżej wartości dolnej granicy chwilowego współczynnika tarcia, co stwierdzono dla okładziny o grubości 25 i 15 mm.

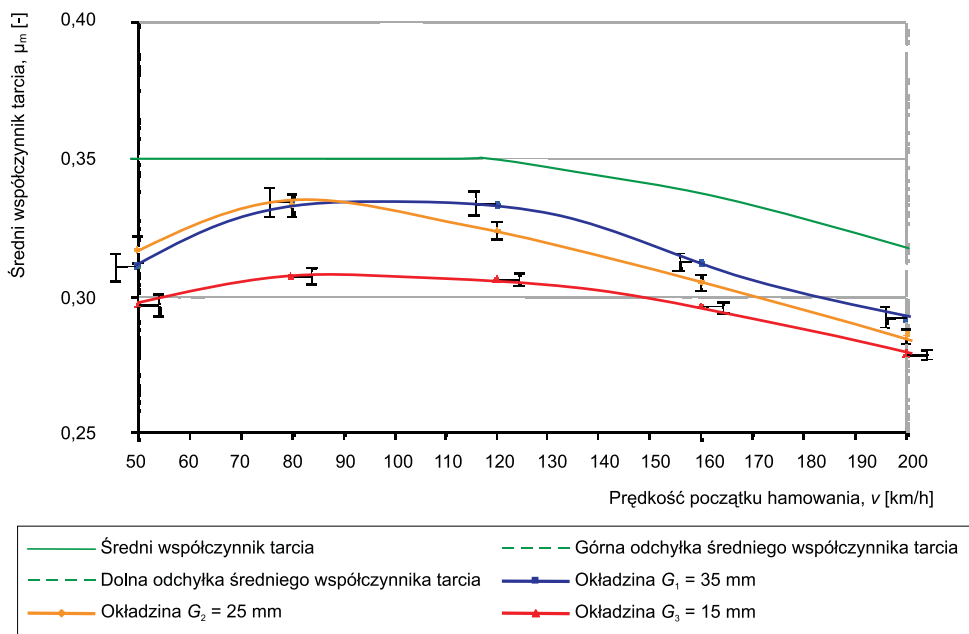


Rys. 5. Zależność średniego współczynnika tarcia od prędkości początku hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 44$ kN i masie hamującej $M = 7,5$ t

Fig. 5. Dependence of the mean friction coefficient on the braking start speed for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 44$ kN and braking mass $M = 7,5$ t

Z zależności średniego współczynnika tarcia μ_m w funkcji prędkości początku hamowania wynika, że przy nowej okładzinie o grubości 35 mm rejestruje się najwyższe wartości współczynnika w stosunku do okładzin o grubości 25 i 15 mm. Zaobserwowano, że do prędkości hamowania wynoszącej 80 km/h przebiegi współczynnika tarcia okładziny o grubości $G_1 = 35$ mm pokrywają się z przebiegami współczynnika tarcia dla okładziny o grubości $G_2 = 25$ mm (rys. 5 i 6). Dalszy wzrost prędkości początku hamowania powoduje wzrost średniego współczynnika tarcia μ okładziny nowej względem pozostałych grubości okładzin, niezależnie od docisku okładziny do tarczy i zastosowanej masy hamującej.

Po dokonaniu analizy statystycznej średnich współczynników tarcia stwierdzono, że przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ istotne różnice średnich współczynników tarcia występują w przypadku okładzin o grubościach G_1 oraz G_3 . W przypadku okładziny G_2 , niezależnie od prędkości początku hamowania, obserwuje się nachodzenie na siebie słupków błędów uzyskanych z okładziny G_1 lub okładziny G_3 . Przy hamowaniu z dociskiem do tarczy $N = 44$ kN i masie hamującej $M = 7,5$ t (rys. 5), istotne różnice średnich współczynników tarcia okładzin G_1 oraz G_3 występują po hamowaniach z prędkości powyżej 120 km/h. W przypadku hamowań z naciskiem na tarczę $N = 28$ kN i masie hamującej $M = 4,4$ t (rys. 6) stwierdzono wyraźną zależność średniego współczynnika tarcia okładziny G_1 względem G_3 w całym zakresie prędkości początku hamowania.



Rys. 6. Zależność średniego współczynnika tarcia od prędkości początku hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 28$ kN i masie hamującej $M = 4,4$ t

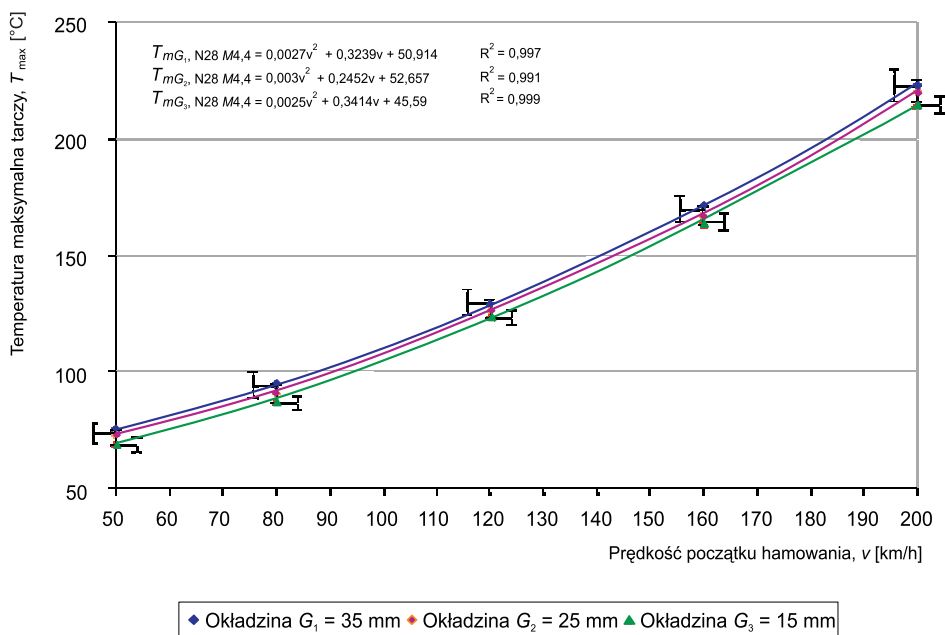
Fig. 6. Dependence of the mean friction coefficient on the braking start speed for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 28$ kN and braking mass $M = 4,4$ t

Podczas badań stanowiskowych zaobserwowano w kilku przypadkach obniżenie wartości średniego współczynnika tarcia dla trzech rozpatrywanych grubości okładzin ciernych poniżej dolnej odchyłki średniego współczynnika tarcia. Przy dużych dociskach okładzin do tarczy i masach hamujących ($N = 44$ kN, $M = 7,5$ t), co przedstawiono na rys. 5. Spadek mierzonego współczynnika poniżej wartości dolnej odchyłki średniego współczynnika tarcia okładzina G_1 uzyskuje przy prędkości początku hamowania powyżej 160 km/h, okładzina G_2 przy 120 km/h, a okładzina G_3 już przy 100 km/h. Podczas hamowania z mniejszym dociskiem do tarczy ($N = 28$ kN i masie hamującej $M = 7,5$ t), obniżenie wartości współczynnika tarcia poniżej dolnej odchyłki zaobserwowano przy okładzinie G_3 już przy hamowania z prędkości 120 km/h. Większe dociski do tarczy $N = 44$ kN i małe masy hamujące $M = 4,4$ t przyczyniają się do obniżenia współczynnika tarcia okładzin G_2 oraz G_3 przy hamowaniu z prędkością 160 km/h. Hamowania z małym naciskiem na tarczę oraz masie hamującej ($N = 28$ kN i $M = 4,4$), powoduje obniżenie wartości współczynnika tarcia poniżej dolnej odchyłki średniego współczynnika tarcia przy małych prędkościach początku hamowania (do 80 km/h) oraz przy prędkościach dużych, powyżej 160 km/h. Powyższe zależności stwierdzono tylko przy okładzinie cierniej o grubości $G_3 = 15$ mm.

Badanie temperatury tarczy hamulcowej przeprowadzono za pomocą sześciu termopar zainstalowanych po 3 na każdą stronę tarczy zgodnie z wytycznymi w [9].

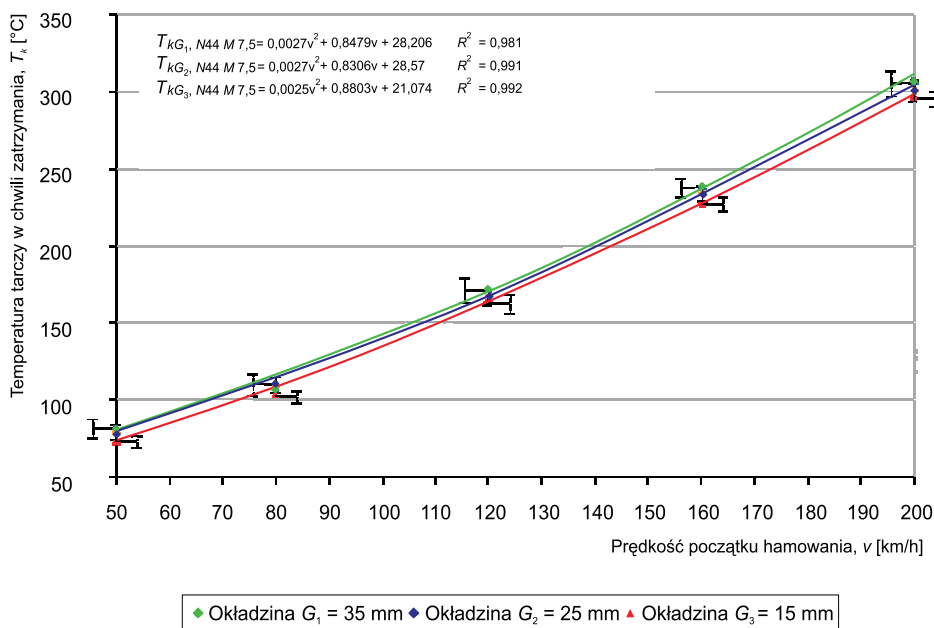
Celem badań było wyznaczenie zależności między zużyciem okładzin ciernych a temperaturą tarczy hamulcowej uzyskaną w czasie hamowań dla danej grubości okładziny przy założonych prędkościach początku hamowania v , docisku do tarczy N oraz realizowanej masie hamującej M .

Wyniki z badań maksymalnej temperatury tarczy dla trzech grubości okładzin (35, 25 i 15 mm) są przedstawione na rys. 7. Zależność temperatury tarczy w chwili zatrzymania tarczy dla tych samych parametrów hamowania oraz przy badaniu temperatury maksymalnej przedstawia rys. 8.



Rys. 7. Zależność temperatury maksymalnej tarczy od prędkości początku hamowania okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 28$ kN i masie hamującej $M = 4,4$ t

Fig. 7. Dependence of the disk maximum temperature on the braking start speed for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 28$ kN and braking mass $M = 4,4$ t



Rys. 8. Zależność temperatury tarczy w chwili zatrzymania od prędkości początku hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 44$ kN i masie hamującej $M = 7,5$ t

Fig. 8. Dependence of the disk temperature in the moment of stoppage on the braking start speed for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 44$ kN and braking mass $M = 7,5$ t

Podczas badań stanowiskowych stwierdzono, że istnieje zależność między temperaturą maksymalną tarczy oraz temperaturą tarczy w chwili zatrzymania a grubością okładziny G , prędkością początku hamowania v , dociskiem do tarczy N oraz masą hamującą M . W każdym przypadku hamowania (kombinacja docisku do tarczy i masy hamującej) odnotowano obniżenie temperatury maksymalnej oraz temperatury w chwili zatrzymania tarczy w zależności od grubości okładzin. Okładzina nowa o grubości $G_1 = 35$ mm, uzyskała wyższe temperatury niż okładziny o grubości $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm. Uzyskane wartości temperatury maksymalnej tarczy oraz temperatury w chwili zatrzymania tarczy hamulcowej aproksymowano wielomianem drugiego stopnia ze względu na najwyższe wartości współczynnika korelacji wynoszącego powyżej 0,91 względem pozostałych funkcji aproksymujących, co przedstawia zależność (1) [5]:

$$y_{G1,2,3} = A_n \cdot v^n + A_{n-1} \cdot v^{n-1} + A, \quad n \in N, A_0, \dots, A_n \in R \text{ i } A_n \neq 0 \quad (1)$$

gdzie:

- $T_{m(k)G1,2,3}$ – temperatura maksymalna lub w chwili zatrzymania tarczy, °C,
- v – prędkość początku hamowania, km/h,
- $A_{n-1,n}$ – współczynniki wielomianu,
- A_0 – wyraz wolny wielomianu,
- n – stopień wielomianu, $n = 2$.

Otrzymane wyniki mieszczą się w przedziałach błędu statystycznego przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Ponadto o małej wrażliwości przyrostu temperatury tarczy na zmianę grubości okładziny dowodzi przebieg współczynnika zmienności dla 25 pomiarów temperatury tarczy, co było wykonane po badaniach rozpoznawczych poprzedzających badania zasadnicze, a nie ujęte w niniejszym artykule. W stosunku do pozostałych wielkości charakteryzujących proces hamowania (średni współczynnik tarcia między okładziną a tarczą, czas i droga hamowania), pomiar temperatury wykazał współczynnik zmienności przekraczający 10%. Jest to związane zależnościami procesów temperaturowych od wielu czynników, np. temperatura otoczenia, chłodzenie tarczy, wartość luzu między okładziną a tarczą, temperaturą okładzin oraz temperatura tarczy przed kolejną próbą hamowania.

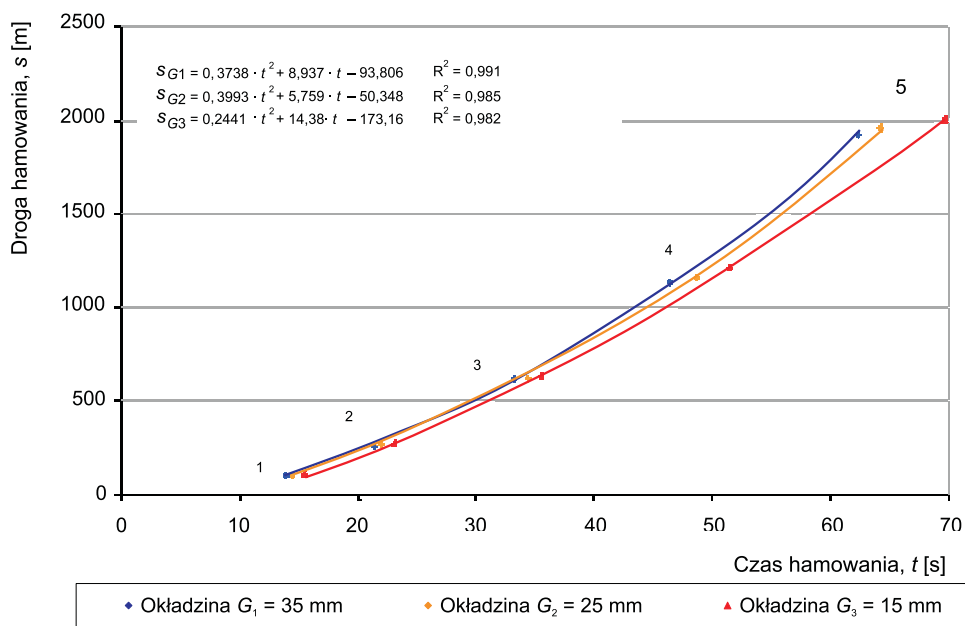
W jednym przypadku hamowania z małym dociskiem okładziny do tarczy $N = 28$ kN i masie hamującej $M = 4,4$ t, przy prędkości początku hamowania powyżej 160 km/h, zaobserwowano widoczną zależność temperatury w chwili zatrzymania tarczy przy hamowaniu z okładziną o grubości $G_1 = 35$ mm oraz w przypadku hamowania z okładziną o grubości $G_3 = 15$ mm.

Przyczyny wyższej temperatury tarczy przy hamowaniu okładziną $G_1 = 35$ mm względem pozostałych okładzin, co stwierdzono podczas badań, można wyjaśnić utrudnionym przepływem ciepła na elementy układu dźwigniowego. Do badań była wykorzystana okładzina z materiału organicznego, która ze względu na swoją grubość – w przypadku nowej okładziny – utrudnia przepływ ciepła do obsady okładziny, a następnie na pozostałe elementy układu dźwigniowego. Okładziny o mniejszej grubości, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, słabiej izolują obsadę okładziny, przez co większa część ciepła hamowania jest odprowadzana do układu dźwigniowego, obniżając temperaturę tarczy.

Badanie drogi i czasu hamowania na stanowisku hamulcowym przeprowadzono jednocześnie. Celem badań było wyznaczenie zależności między drogą i czasem hamowania a zużyciem okładzin ciernych przy założonych prędkościach początku hamowania v , docisku do tarczy N oraz masie hamującej M , przypadającej na jedną tarczę hamulcową. Zużycie okładzin odzwierciedlano zastosowaniem trzech kompletów okładzin o różnych grubościach, tj. 35, 25 i 15 mm. Drogę hamowania wyznaczano przez obliczenie liczby wykonanych obrotów tarczy hamulcowej. Liczba obrotów następnie była przeliczana na obroty zestawu kołowego, na którym zamocowano tarczę hamulcową. W badaniach stanowiskowych założono zestaw kołowy o średnicy w okręgu tocznym 890 mm. Czas hamowania mierzono od chwili rozpoczęcia hamowania z danej prędkości aż do całkowitego zatrzymania tarczy hamulcowej.

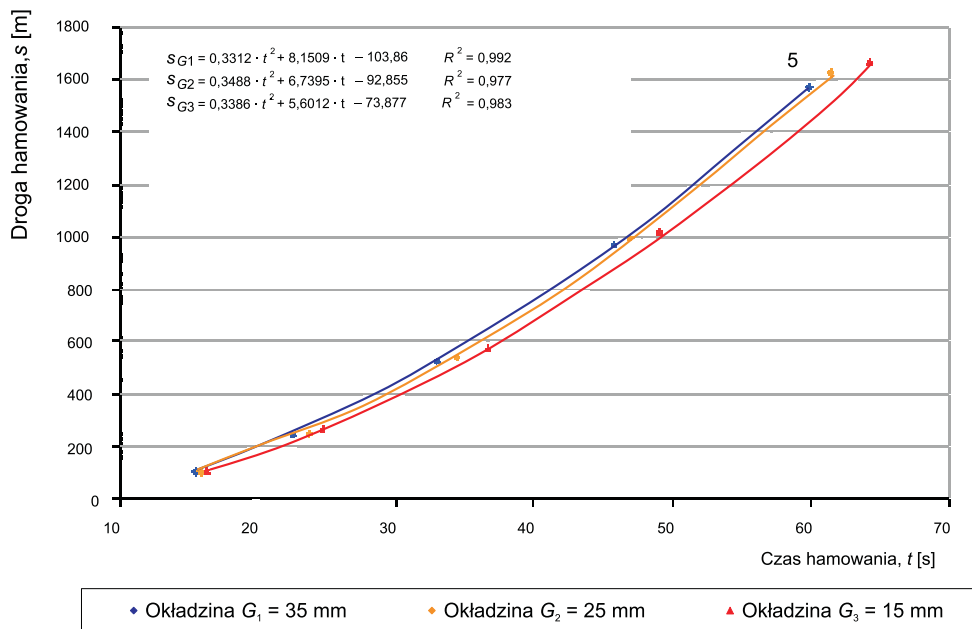
Wyniki z badań drogi hamowania oraz czasu hamowania dla trzech grubości okładzin przedstawiono wspólnie na rys. 9 i 10 dla wszystkich rozpatrywanych prędkości hamowania v .

Na podstawie rys. 9 i 10 stwierdzono, że istnieje zależność drogi hamowania i czasu hamowania od zużycia okładzin ciernych, co ustalono w całym zakresie prędkości początku hamowania od 50 do 200 km/h oraz kombinacji docisku do tarczy i masy hamującej. Przeprowadzone badania dowodzą, że zużycie okładziny cierniej, rozumiane jako zmniejszenie się jej grubości, wpływa znacząco na wydłużenie drogi i czasu hamowania. Zbadane wartości czasów hamowania względem dróg hamowania aproksymowano wielomianem drugiego stopnia ze względu na najwyższe wartości współczynnika korelacji. Błąd aproksymacji wyników uzyskanych z pomiaru czasu hamowania i drogi hamowania względem funkcji wielomianowych drugiego stopnia nie przekroczył 3%.



Rys. 9. Zależność drogi hamowania od czasu hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 44$ kN, masie hamującej $M = 7,5$ t i prędkościach początku hamowania: 1 – $v = 50$ km/h, 2 – $v = 80$ km/h, 3 – $v = 120$ km/h, 4 – $v = 160$ km/h, 5 – $v = 200$ km/h

Fig. 9. Dependence of the braking distance on the braking time for linings thicknesses $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 44$ kN, braking mass $M = 7,5$ t and braking start speeds: 1 – $v = 50$ km/h, 2 – $v = 80$ km/h, 3 – $v = 120$ km/h, 4 – $v = 160$ km/h, 5 – $v = 200$ km/h



Rys. 10. Zależność drogi hamowania od czasu hamowania dla okładzin o grubości $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm i $G_3 = 15$ mm, przy nacisku na tarczę $N = 28$ kN, masie hamującej $M = 4,4$ t i prędkościach początku hamowania: 1 – $v = 50$ km/h, 2 – $v = 80$ km/h, 3 – $v = 120$ km/h, 4 – $v = 160$ km/h, 5 – $v = 200$ km/h

Fig. 10. Dependence of the braking distance on the braking time for linings $G_1 = 35$ mm, $G_2 = 25$ mm and $G_3 = 15$ mm, at the pressure on disk $N = 28$ kN, braking mass $M = 4,4$ t and braking start speeds: 1 – $v = 50$ km/h, 2 – $v = 80$ km/h, 3 – $v = 120$ km/h, 4 – $v = 160$ km/h, 5 – $v = 200$ km/h

4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań stanowiskowych stwierdzono:

1. Istotna zależność średniego współczynnika tarcia od zużycia okładziny występuje tylko dla okładziny o grubości $G_3 = 15$ mm (okładzina o największym badanym zużyciu). Wartości pośrednie zużycia, np. dla grubości okładziny $G_2 = 25$ mm, nie pozwalają wnioskować o występowaniu zależności współczynnika tarcia od zużycia okładziny. Otrzymane wyniki współczynników tarcia okładzin o grubości G_1 i G_2 mieszczą się w przedziałach błędów statystycznego. Wykonane badania dowodzą, że pogarszający się stan pary ciernej, determinowany zużyciem tarczy hamulcowej i okładzin, ma tendencję do obniżania współczynnika tarcia zużywającej się okładziny aż do przekroczenia wartości dolnej jego odchyłki μ_m , co stwierdzono na okładzinach o grubościach G_2 oraz G_3 przy różnych prędkościach początku hamowania.
2. Na obniżenie współczynnika tarcia, szczególnie przy hamowaniach z dużych prędkości (powyżej 160 km/h) mogą mieć wpływ zarówno procesy termiczne oraz zjawisko powstawania warstwy „trzeciej” w styku okładziny z tarczą otrzymanej z produktów zużycia pary ciernej, opisane w pracach [1–3, 10].

3. Zużycie okładziny wpływa na wydłużenie drogi i czasu hamowania, co jest związane z obniżeniem się współczynnika tarcia między okładziną a tarczą i pogorszonymi warunkami współpracy okładziny czarnej z tarczą hamulcową.
3. Zmniejszenie się grubości okładziny czarnej powoduje nieznaczne obniżenie temperatury tarczy hamulcowej, co można tłumaczyć lepszymi warunkami odprowadzenia ciepła hamowania z tarczy przy okładzinie o najmniejszej grubości. Ze względu na największe wartości odchylenia standardowego wyników temperatury, mieszczącego się w przedziale 1,7–10,2 w zależności od prędkości początku hamowania oraz, o czym świadczy współczynnik zmienności przekraczający 10%, otrzymane wyniki mieszczą się w granicach błędu statystycznego.

Literatura

- [1] D ż u ł a S., U r b a ń c z y k P., *Wpływ zużycia elementów pary czarnej klocków hamulcowych – koło zestawu kołowego na siłę hamowania*, XIV Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe 2000, t. 2, Kraków, Arkanów, 9–13 październik 2000, 231-242.
- [2] G ą s o w s k i W., K a ł u b a M., *Trybologiczne badanie okładzin czarnych hamulca tarczowego pojazdów szynowych*, Pojazdy Szynowe, nr 1, 1999, 14-21.
- [3] K a ł u b a M., *Zużycie okładzin czarnych hamulca tarczowego pojazdów szynowych*, Pojazdy Szynowe, nr 4, 1999, 24-29.
- [4] Karta UIC 541-3, *Hamulec: hamulec tarczowy i okładziny hamulcowe, warunki ogólne dla prób na stanowisku badawczym*, Wydanie 6, listopad 2006.
- [5] K r y s i c k i W., W ł o d a r s k i L., *Analiza matematyczna w zadaniach*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2007.
- [6] L e s z e k W., *Badania empiryczne, Studia i rozprawy*, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1977.
- [7] M a ń c z a k K., *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa 1976.
- [8] P i e c P., *Analiza zjawisk kontaktowych typu sick-slip w miejscu styku koła z klockiem hamulcowym*, Monografia, Kraków 1995.
- [9] PN-EN 14535-1 Kolejnictwo – tarcze hamulcowe kolejowych pojazdów szynowych – Część 1: Tarcze hamulcowe włączane lub mocowane skurczowo na osiach zestawów tocznych lub napędnych, wymiary i wymagania dotyczące jakości.
- [10] Ś c i e s z k a S.F., *Hamulce czarne. Zagadnienia materiałowe, konstrukcyjne i trybologiczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice-Radom 1998.