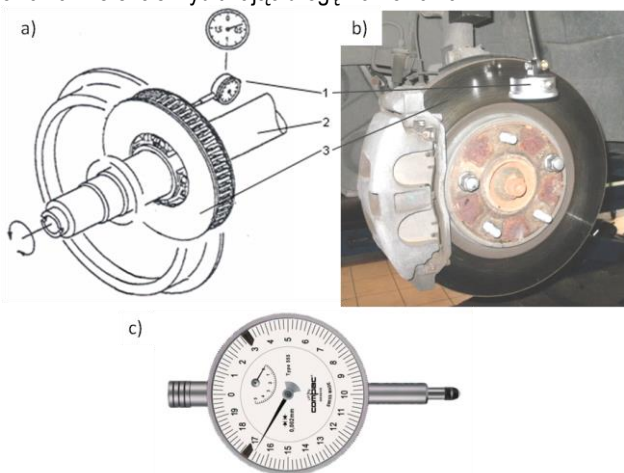


## OCENA BICIA TARCZ HAMULCOWYCH WYBRANYMI ROZKŁADAMI STATYSTYCZNYMI

W artykule omówiono jeden z wybranych aspektów eksploatacyjnych tarczowego układu hamulcowego. W przypadku długotrwałych hamowań na spadku lub częstych przyhamowań z dużych prędkości dochodzi do granicznego obciążenia cieplnego elementów pary ciernej w szczególności tarcz hamulcowych. Zjawisko to w przypadku szybkiego schłodzenia może spowodować odkształcenie tarczy hamulcowej, co skutkuje jej biciem i spadkiem efektywności procesu hamowania. Celem artykułu jest próba opisanie przypadków bicia tarcz hamulcowych określonej populacji pojazdów wybranymi rozkładami statystycznymi.

### WSTĘP

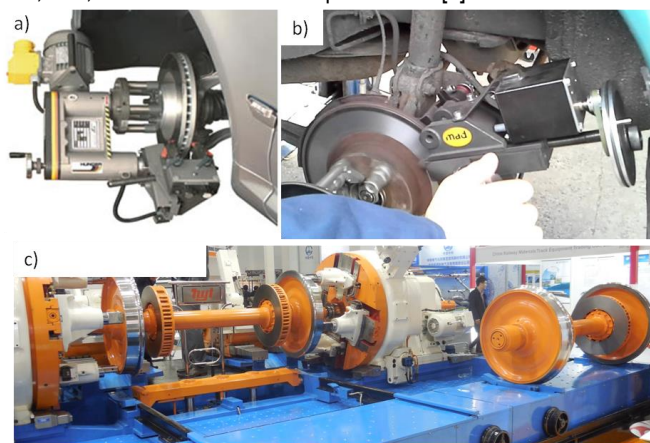
Graniczne obciążenie cieplne hamulców, w przypadku tarczowych układów hamulcowych możliwe jest do osiągnięcia w dwóch przypadkach. Pierwszym z nich jest długotrwałe hamowanie na spadku, również nazywane hamowaniem ze stałą mocą w celu utrzymania stałej prędkości zjazdu pojazdu (samochodu lub pociągu) ze wzniesienia. Drugim przypadkiem są częste przyhamowania z dużych prędkości. Wówczas temperatura tarczy narasta nieliniowo a w przypadku osiągnięcia granicznego obciążenia wynikającego z granicy plastyczności materiału tarczy hamulcowej, dochodzi do jej odkształcenia nazywanego pełzaniem. Konsekwencją tego zjawiska jest bicie osiowe tarczy hamulcowej w czasie hamowania co przekłada się na drgania przenoszone na pojazd. Drgania w czasie hamowania szczególnie odczuwalne są na kierownicy pojazdu pogorszają komfort jazdy oraz obniżają skuteczność procesu hamowania w efekcie wydłużając drogę hamowania.



**Rys. 1.** Pomiar bicia poprzecznego tarczy hamulcowej, a) na kolejowym zestawie kołowym [3], 1-czujnik zegarowy, 2-zestaw kołowy, 3-tarcza hamulcowa, b) pojazdu samochodowego, c) widok czujnika zegarowego

Producenci tarcz hamulcowych określają wartość maksymalnego bicia poprzecznego, które powinno być utrzymane w całym procesie eksploatacji. Przykład pomiaru bicia osiowego tarcz hamulcowych zarówno kolejowych jak i samochodowych przedstawia

rysunek 1. W przypadku pojazdów szynowych wartość maksymalna bicia osiowego nie może przekraczać 0,5 mm [3] natomiast w przypadku pojazdów samochodowych wartość ta mieści się w przedziale 0,01-0,05 mm w zależności od producenta [4].



**Rys. 2.** Tokarka do tarcz hamulcowych, a) pojazdów samochodowych [5], b) widok na proces toczenia [6], c) pojazdów szynowych z dodatkową możliwością toczenia profilu na kołach zestawu kołowego

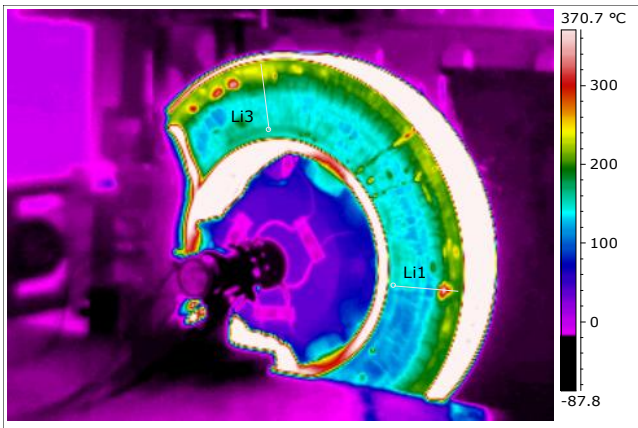
Na rysunku 2 przedstawiono widok tokarek do toczenia tarcz hamulcowych. W przypadku pojazdów samochodowych możliwe jest zastosowanie tokarek przenośnych (rys. 2a)) montowanych do układu zawieszenia pojazdu, wówczas możliwa jest regeneracja profilu tarczy bez jej demontażu. Inną klasyczną metodą regeneracji tarcz jest ich toczenie na tokarkach kłowych pociągowych w przypadku braku posiadania przez serwisy pojazdów samochodowych tokarek przenośnych. Natomiast w przypadku pojazdów szynowych stosuje się tokarki do reprofiliacji profilu kół zestawów kołowych, które również umożliwiają toczenie tarcz hamulcowych zamocowanych na osi między kołami lub na kołach. Jednak w przypadku kolejowych tarcz hamulcowych konieczne jest wywiązanie zestawu kołowego z ramy wózka i transport na stanowisko obróbcze przykładowo przedstawione na rysunku 2c).

Innym sposobem naprawy tarcz hamulcowych jest ich wymiana na nowe podczas naprawy serwisowej pojazdu samochodowego. W przypadku pojazdów szynowych wymiana tarcz jest również praktykowana, jednak dokonywana jest podczas wymiany kół ze względu na przekroczenie granicznego dopuszczalnego zużycia wieńca koła.

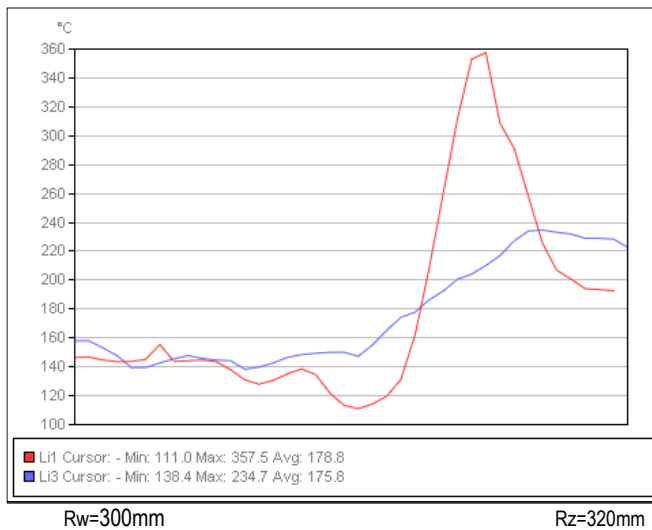
Wówczas z osi ściąga się zarówno koła i tarcze hamulcowego. Ze względu na charakter pracy pojazdu szynowego, jego miesięczny przebieg, całkowite zużycie kół następuje po około 5 latach.

## 1. ZJAWISKO TYPU HOT SPOTS

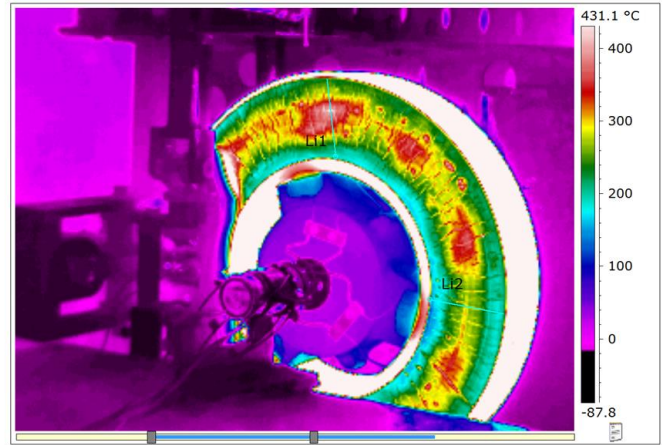
Zjawisko typu hot spots głównie identyfikowane jest z kwestiami temperaturowymi, jednak również pośrednio związane jest z kontaktem okładzin ciernych względem tarcz hamulcowych. Długa eksploatacja tarczowych układów hamulcowych zarówno z okładzinami wykonanymi z materiałów organicznych jak i ze spieków metalicznych powoduje nierównomierne zużycie poszczególnych powierzchni tarcia okładzin. Zjawisko typu hot spots czyli gorące obszary występuje najczęściej przy hamowaniach z dużym naciskiem okładzin do tarczy (realizacja większych mocy hamowania) lub podczas hamowań z dużych prędkości. Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie termowizyjne kolejowej tarczy hamulcowej po hamowaniu z prędkości  $v=120$  km/h, gdzie zaobserwowano kilka gorących obszarów. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono rozkład temperatury na promieniu tarczy w miejscu pojawienia się gorącego obszaru. W celu obserwacji przyrostu temperatury dla hot spot na promieniu tarczy, dodatkowo na wykresie przedstawiono rozkład temperatury w innym miejscu z pominięciem gorącego obszaru. Obserwacja rozkładu temperatury na tarczy hamulcowej z zastosowaniem kamery termowizyjnej wykazała, że gorące obszary występują w ostatniej fazie hamowania, trwają kilka sekund aż do zatrzymania.



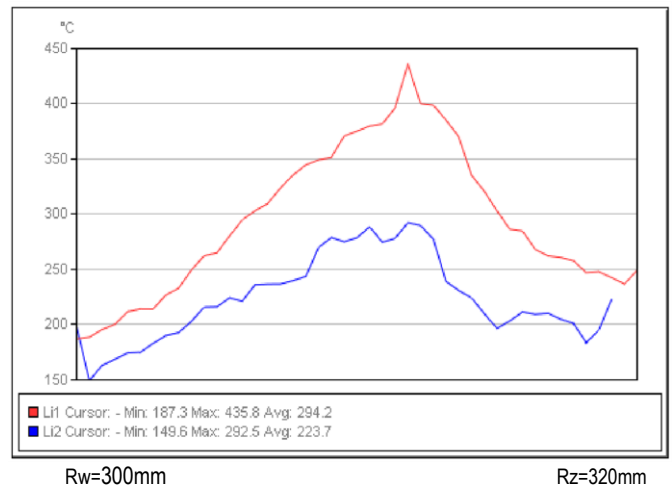
**Rys. 3.** Hamowanie zatrzymujące na tarczy o średnicy 640 mm przy  $v=120$  km/h,  $N=28$  kN i  $M=6,7$  t



**Rys. 4.** Rozkład temperatury na odcinku liniowym Li1 z widocznym Hot Spots oraz na odcinku Li3 bez Hot Spots,  $R_w$  – promień wewnętrzny tarczy hamulcowej,  $R_z$  – promień zewnętrzny tarczy ( $v=120$  km/h)



**Rys. 5.** Hamowanie zatrzymujące na tarczy o średnicy 640 mm przy  $v=200$  km/h,  $N=28$  kN i  $M=6,7$  t



**Rys. 6.** Rozkład temperatury na odcinku liniowym Li1 z widocznym Hot Spots oraz na odcinku Li3 bez Hot Spots,  $R_w$  – promień wewnętrzny tarczy hamulcowej,  $R_z$  – promień zewnętrzny tarczy hamulcowej (hamowanie z  $v=200$  km/h)

W obszarach wysokich temperatur następuje formowanie się wybruszeń w wyniku rozszerzalności cieplnej materiału tarczy. Zjawisko to jest dodatkowo wzmacniane podczas każdego obrotu tarczy, kiedy na każde wybruszenie materiału działają naciski od poszczególnych powierzchni tarcia okładziny. Występujące rowki na okładzinie (przestrzenie między powierzchniami tarcia) okazują się niewystarczające do pochłonięcia ciepła powstałego podczas hamowania. Odbierają one znikomą część energii cieplnej, przez co na tarczy występują obszary o różnych temperaturach, od 100 do nawet 800 i 900 °C na wybruszeniach [7] w przypadku hamowań prędkości  $v=300$  km/h. Analizując rozkład temperatury na zdjęciu IR przedstawionym na rysunku 3 stwierdza się, że temperatura w miejscu hot spots wyniosła  $T_{max}=357,5$  °C a poza nim  $T_{min}=111$  °C, co pozwala na obliczenie przyrostu temperatury na tym odcinku zgodnie z zależnością (1) przy hamowaniu z prędkości  $v=120$  km/h:

$$H_{dlav=120km/h} = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{357,5\text{ }^{\circ}\text{C}}{111,0\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3,22 \quad (1)$$

$$H_{dlav=200km/h} = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{435,8\text{ }^{\circ}\text{C}}{187,3\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2,33 \quad (2)$$

Natomiast zależność (2) przedstawia przyrost temperatury na promieniu tarczy po hamowaniu z prędkości  $v=200$  km/h, co przedstawiono na rysunku 5 (zdjęcie IR) oraz 6 (rozkład temperatury na promieniu tarczy).

W skrajnych przypadkach przyrost temperatury na gorącej płamie zgodnie z [7] może nawet wynieść 8,8 względem obszaru o najniższej temperaturze. Jednak tak duże wartości uzyskuje się przy hamowaniach na okładzinach wykonanych ze spieków metalicznych. W przypadku okładzin z materiałów organicznych przyrosty są blisko dwukrotnie niższe. W praktyce w celu ograniczenia zjawiska typu hot spots dobiera się okładziny do tarczy hamulcowej poprawiające jej rozkład nacisków na pierścieniu ciemnym. Takie zabiegi pozwalają na obniżenie przyrostu temperatury maksymalnej względem minimalnej z 8,8 nawet do 2,2 [7].

## 2. METODYKA I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Badania bicia tarcz hamulcowych w aspekcie statystycznym przeprowadzono w jednym z zakładów naprawczych zajmujących się zarówno sprzedażą jak i naprawą trzech typów samochodów osobowych. Pomiaru bicia tarcz hamulcowych przeprowadzono na 76 samochodach zarówno na tarczy prawej i lewej. Dane wejściowe do obliczeń statystycznych przedstawia tabela 1.

**Tab. 1. Dane do obliczeń statystycznych**

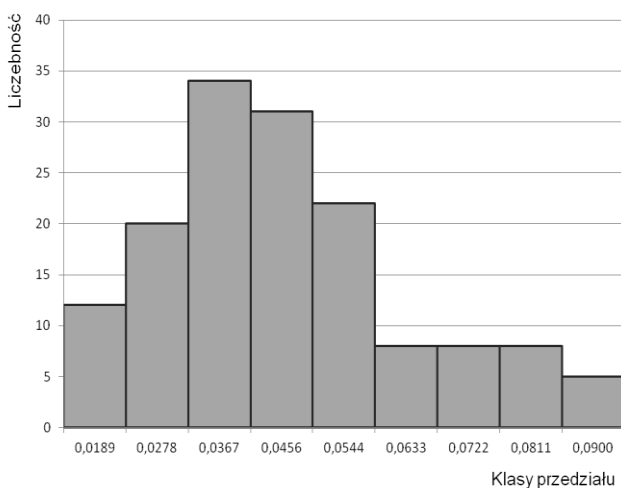
Lp.	Parametr	Wartość/Liczba
1	Liczba samochodów poddanych pomiarom bicia osiowego tarcz hamulcowych	74
2	Maksymalne bicie osiowe tarczy hamulcowej	0,09 mm
3	Minimalne bicie osiowe tarczy hamulcowej	0,01 mm
4	Maksymalny przebieg pojazdu	141722 km
5	Minimalny przebieg pojazdu	8060 km
6	Liczba wymienionych tarcz hamulcowych	142
7	Liczba toczonych tarcz hamulcowych	6

We wszystkich pojazdach kierowcy stwierdzali drgania generowane przez układ hamulcowy, odczuwalne na kierownicy w czasie hamowania. W większości przypadków (poza trzema przypadkami) po pomiarach bicia osiowego, tarcze zostały wymienione na nowe. Tylko w trzech samochodach tarcze (prawą i lewą) przetoczono.

Liczbę przedziałów wyznaczono z zależności (3) [2]:

$$k = \sqrt{n} = \sqrt{76} \approx 9 \quad (3)$$

Na rysunku 7 przedstawiono histogram liczebności dla  $n=9$ .



**Rys. 7. Zestawienie liczebności wartości bicia osiowego tarcz hamulcowych**

Wykorzystując zależności (4-5) obliczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe [2] dla bicia poprzeczne tarcz hamulcowych, które odpowiednio wyniosły dla populacji 148 pomiarów odpowiednio  $\mu=0,041$  i  $S=0,0202$ .

Wartość średnia:

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

gdzie:

$x_i$  – i-ta wartość zmiennej,  $x=1, 2, \dots, n$ ,

$n$  – liczba pomiarów.

Odchylenie standardowe:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

gdzie:

$\bar{x}$  – wartość średnia,

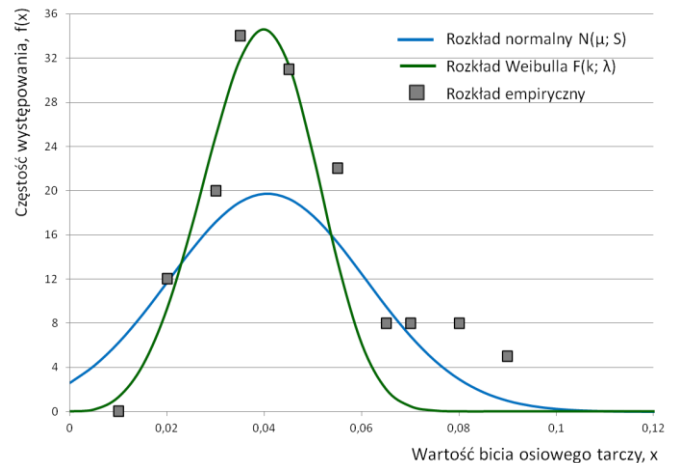
$x_i$  – i-ta wartość zmiennej,  $x=1, 2, \dots, n$ .

Liczebność rozkładu bicia osiowego tarcz hamulcowych zmierzono podczas przeglądu serwisowego została aproksymowana rozkładem normalnym  $N$  ze średnią  $\mu$  i odchyleniem standardowym  $S$  równoważnym wariancji  $\delta^2$  zgodnie z zależnością (6). Natomiast rozkład Weibulla z parametrem skali  $\lambda$  oraz parametrem kształtu  $k$  zgodnie z zależnością na funkcję gęstości prawdopodobieństwa opisaną zależnością (7) [2].

$$f(\mu; S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} \quad (6)$$

$$f(k; \lambda) = \frac{k}{\lambda} x^{(k-1)} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (7)$$

Zestawienie rozkładu empirycznego bicia poprzecznego tarcz hamulcowych względem dwóch rozkładów statystycznych przedstawia rysunek 8.



**Rys. 8. Zestawienie rozkładów bicia osiowego tarcz hamulcowych**

Dla następujących parametrów (skali i kształtu)  $\lambda=0,043$  i  $k=3,9$  dokonano aproksymacji wartości bicia osiowego tarcz hamulcowych z rozkładu empirycznego względem zaproponowanego rozkładu Weibulla metodą najwyższej wartości współczynnik determinacji zgodnie z zależnością (8) [1]:

$$R^2 = \frac{\sum_{p=1}^n \left( \hat{y} - \bar{y} \right)^2}{\sum_{p=1}^n \left( y_i - \bar{y} \right)^2} \quad (8)$$

gdzie:

$\hat{y}$  – przewidywana wartość na podstawie modelu,



$\bar{y}$  – wartość średnia,  
 $y_i$  – wartość rzeczywista.

W wyniku zastosowania zależności (8), wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wyniosła 0,89 aproksymacji rozkładu empirycznego bicia osiowego tarcz hamulcowych do rozkładu Weibulla. Jednak w celu jednoznacznego stwierdzenia, że rozkład bicia poprzecznego tarcz hamulcowych opisany jest rozkładem Weibulla  $F(0,043; 3,9)$  należy przeprowadzić weryfikację hipotezy np. testem zgodności  $\lambda$ -Kolmogorowa. Wówczas możliwe będzie wysunięcie hipotezy, że badana cecha tj. rozkład bicia osiowego tarcz hamulcowych ma w danej populacji generalnej określony rozkład teoretyczny tj. rozkład Weibulla z parametrem skali  $\lambda=0,043$  oraz parametrem kształtu  $k=3,9$ .

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wybrany aspekt z eksploatacji tarczowego układu hamulcowego związany z odkształceniami tarcz hamulcowych, czego efektem jest ich późniejsze bicie osiowe. W szerszym sensie ten typ uszkodzenia przekłada się na obniżenie skuteczności hamulców oraz na pogorszenie komfortu w czasie hamowania odczuwalnego przez kierowcę w szczególności na kierownicy pojazdu. W artykule również opisano jedną z przyczyn ciepłego odkształcenia tarcz hamulcowych jakim jest zjawisko typu hot spots. Do analizy statystycznej wybrano określoną populację pojazdów, w których kierowcy stwierdzali pogorszenie procesu hamowania. We wszystkich tych pojazdach na stacji serwisowej dokonano pomiaru bicia osiowego tarcz hamulcowych. Następnie po wyznaczeniu liczby klas przedziałów, dokonano próby opisanego rozkładu bicia poprzecznego rozkładem normalnym oraz Weibulla. Najlepsze dopasowanie otrzymanego z pomiarów bicia tarcz rozkładu empirycznego, uzyskano stosując rozkład Weibulla dopasowując go do otrzymanego z pomiarów rozkładu dobierając parametry kształtu i skali. Wówczas otrzymano zadowalający współczynnik determinacji  $R^2$  wynoszący 0,89.

*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. Bobowski Z., *Wybrane metody statystyki opisowej i wnioskowania statystycznego*. Wydawnictwo Wałbrzyskiej Wyższej Szkoły Zarządzania i Przedsiębiorczości. Wałbrzych 2008.

2. Gajek L., Kałużka M., *Wnioskowanie statystyczne – modele i metody*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2000.
3. Rail Consult Gesellschaft für Verkehrsberatung GmbH, *Wagon osobowy Z1 02, układ jezdny, Tom 2, Dokumentacja Techniczno-Ruchowa*, Daimler Benz Transportation (Deutschland) GmbH 1997, s. 172.
4. Strona internetowa: <http://ebcbrakes.pl/pl/content/30-montaz-tarcz-czyli-jak-uniknac-problemow-z-hamulcam> (17.03.2016).
5. Strona internetowa: <http://www.profit-hofmann.pl/tokarka-do-tarcz-hamulcowych-hunger-e-326g-ce/>.
6. Strona internetowa: <https://www.youtube.com/watch?v=xsHfD7Hy3zo>.
7. Wirth X., *Improving the Performance of Disc Brakes on High-speed Rail Vehicles with a Novel Types of Brake Pad: Isobar*. RTR 1998.

### Evaluation of runout of the brake disc of the selected statistical distributions

*The article presents selected aspects of the operation of the disk brake. In the case of prolonged braking on the downhill or frequent braking from high speed is lower thermal load of friction pair elements, in particular brake discs. The phenomenon that in the case of rapid cooling may cause deformation of the brake disc, which leads to her beating and the fall of the efficiency of the braking process. The aim of the article is the attempt to describe cases of runout of the brake discs of the selected population of vehicles, the distribution statistically.*

Autorzy:

Dr inż. **Wojciech Sawczuk** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań. Tel. +48 61 665-2023, Fax: +48 61 665 2204, e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl

**Michał Chomiakowski** – student Politechniki Poznańskiej, Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań. Tel. +48 61 665-2356, Fax: +48 61 665 2204, e-mail: mchomiakowski@gmail.com