

## KONCEPCJA NOWEJ TARCZY HAMULCOWEJ DO POJAZDÓW SZYNOWYCH

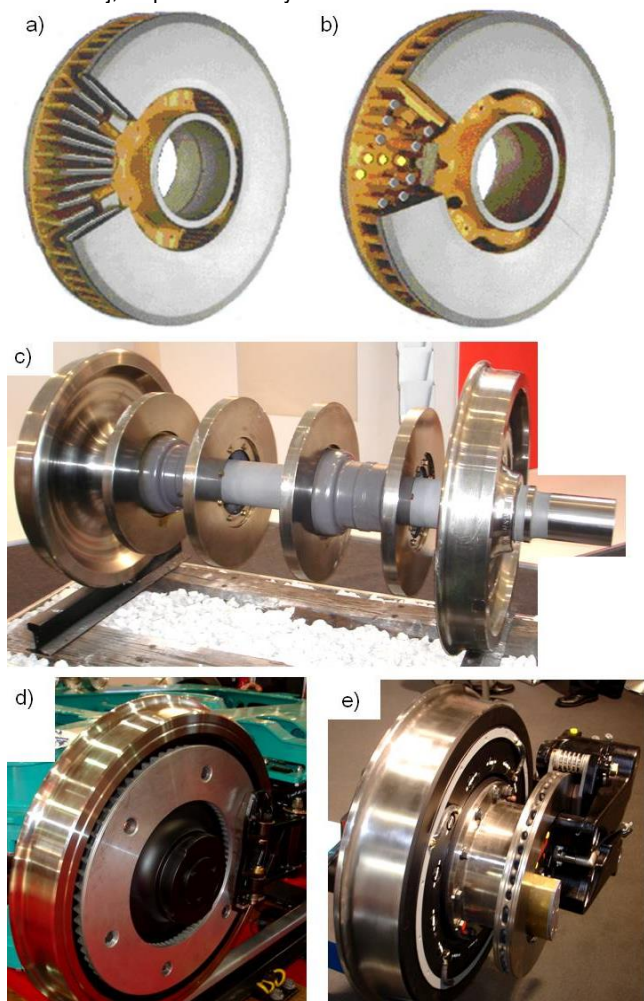
### Streszczenie

W technice kolejowej spotyka się różnorodne konstrukcje tarcz hamulcowych co sprawia, że możliwe jest ich zastosowanie niemal we wszystkich pojazdach szynowych, począwszy od lekkich pojazdów komunikacji miejskiej, a skończywszy na ciężkich pociągach towarowych. Łatwość zabudowy oraz wysoka skuteczność hamowania na hamulcu tarczowym jest powodem ich ciągłego rozwoju. Konstruktorzy nieprzerwanie pracują nad nowymi rozwiązaniami tarcz hamulcowych, które z jednej strony eliminują istniejące problemy dotyczące np. zjawisk cieplnych a z drugiej strony ograniczają koszty produkcji związane z ich odlewaniem i późniejszą obróbką.

Celem artykułu jest przedstawienie nowej koncepcji tarczy hamulcowej z rowkiem na pierścieniu ciernym do usuwania produktów zużycia z pary ciernej hamulca.

### WSTĘP

Wszystkie obecnie eksploatowane tarczowe układy hamulcowe pojazdów szynowych cechują się różnorodną konstrukcją tarczy hamulcowej, co przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Tarcze hamulcowe pojazdów szynowych: a) podwójna z wentylującymi łopatkami [3], b) podwójna z wentylującymi prętami [1], c) pojedyncza pełna, d) jednostronna na kole, e) jednostronna na zewnątrz koła

Z tych względów tarcze hamulcowe dzieli się na jednostronne, bezpośrednio mocowane do tarczy koła oraz dwustronne, w których dwa pierścienie cierne zostały odsunięte od siebie w celu umożliwienia przepływu czynnika chłodzącego. Ponadto ze względu na skuteczność odprowadzenia ciepła hamowania do otoczenia stosuje się tarcze niewentylowane oraz wentylowane. Tarcze wentylowane dzielą się ze względu na kształt łącznika między pierścieniami ciernymi na wentylowane za pomocą łopatek lub wentylowane za pomocą prętów o przekroju kołowym lub eliptycznym. Natomiast ze względu na ilość tarcz, na osi zestawu kołowego możliwy jest montaż jednej lub maksymalnie czterech tarcz.

W technice kolejowej tarcze hamulcowe wytwarza się jako monolityczne (pełne) oraz dzielone. Na rysunku 2 przedstawiono kilka rozwiązań dzielonych tarcz hamulcowych.

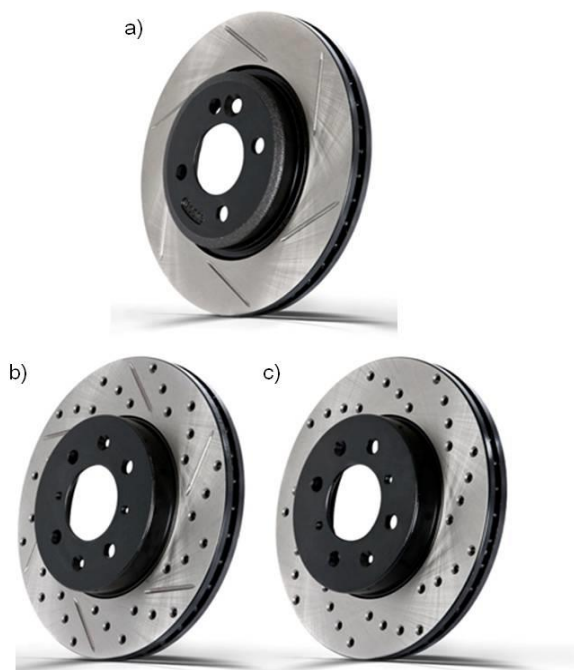


Rys. 2. Tarcze hamulcowe dzielone: a) 141 BK, b) 141 BK na osi zestawu kołowego, c) Poli na kole zestawu kołowego, d) Poli na osi

Pierwszą wersją tarcz dzielonych są tarcze, w których połówki skręcane są wewnątrz za pomocą specjalnych śrub lub łączone są z piastą kółkami sprężystymi. Takie rozwiązanie tarczy wymaga bardzo dokładnego ustalenia dwóch lub większej ilości segmentów tarczy względem siebie, gdyż w przeciwnym razie odstające krawę-

dzie spowodują wrywanie materiału okładziny ciernej, przyspieszając jej zużycie, a w skrajnych przypadkach powodują nawet zniszczenie. Odmianą konstrukcją tarczy dzielonej z wentylującymi łopatkami, w której poszczególne segmenty tarczy nie są łączone za pomocą śrub, lecz przez poprzecznie wciśnięte sworznie, jest włoska tarcza typu Poli oraz polska tarcza 141 BK. Włoska tarcza hamulcowa Poli co przedstawia rysunek 2d) składa się z piasty montowanej na osi zestawu kołowego, z pięciu lub siedmiu segmentów ciernych, tworzących pierścień hamulcowy oraz elementów łączących. Każdy segment jest mocowany promieniowo do kołnicza piasty za pomocą sworznia i jest połączony obwodowo (na powierzchni czołowej) z sąsiednim segmentem za pomocą pary kołków. Segmentowa tarcza 141 BK, co przedstawia rysunek 2a) i 2b) składa się z czterech segmentów z wentylowanymi łopatkami, osadzonymi na piaście oraz z ośmiu poprzecznie montowanych sworzni sprężystych zabezpieczonych pierścieniami osadczymi.

Badania wykazały, że tarcze segmentowe w przeciwieństwie do tarcz pełnych, wykazują większe zużycie okładzin ciernych o około 30%. Wynika z to z faktu istnienia poprzecznych krawędzi (podział na 5 lub 4 segmenty) na pierścieniu ciernym, które powodują wrywanie materiału okładziny [9]. W związku z tym tarcze dzielone charakteryzujące się dodatkowymi krawędziami na powierzchni ciernej zarówno montowane na kole czy na osi zestawu kołowego mimo łatwej wymiany względem tarcz monolitycznych są rzadziej stosowane. W przeciwieństwie do tarcz pojazdów samochodowych co przedstawia rysunek 3, tarcze nacinane lub nawiercane są stosowane, w szczególności w układach hamulcowych pracujących przy większych obciążeniach cieplnych.



**Rys. 3.** Tarcze hamulcowe wentylowane pojazdów samochodowych: a) nacinane, b) nacinane i nawiercane, c) nawiercane

Według opracowań zawartych w [5, 6] tarcze nacinane w pojazdach samochodowych (rys. 3a)) wpływają na skuteczne usuwanie pyłu okładzinowego z pary ciernej hamulca, przez co w kolejnych hamowaniach uzyskuje się odnowioną powierzchnię okładzin (klocków) hamulcowych. Tarcze wiercone najlepiej wpływają na zarówno oczyszczanie okładzin ciernych z produktów zużycia jak również z odgazowania klocków po ich wyżarzeniu na etapie produkcji (zjawisko fadingu) oraz wody (zjawisko akwaplaningu). Jednak otwory po wierceniu przez całą grubość pierścienia ciernego (do przestrzeni wentylacji w środku tarczy) zmniejszają pojemność

cieplną, co przy częstych hamowaniach przy realizacji dużych mocy hamowania może wpływać na ich odkształcenia. Ponadto otwory w dłuższej eksploatacji tarcz hamulcowych przyczyniają się do powstawania pęknięć termicznych (mikropęknięć) oraz istotnie zwiększają zużycie okładzin ciernych. Stąd kompromisem są tarcze nacinane i nawiercane, w których otwory (w przypadku tylko tarcz nawiercanych) są tylko do określonej głębokości.

## 1. KONCEPCJA PROFILU TARCZY HAMULCOWEJ

Na podstawie literatury dotyczącej tarczowych układów hamulcowych oraz własnych rozważań autora opracowano profil pierścienia ciernego z rowkiem w kształcie spirali Archimedesesa o jednym zwoju. Takie założenie jest kompromisem w zakresie ustabilizowania procesu hamowania związanego ze stałym przebiegiem chwilowego współczynnika tarcia w funkcji czasu hamowania a zużyciem okładzin ciernych. Dla kolejowej tarczy hamulcowej o średnicy 590mm wyprowadzono następujące równanie spirali Archimedesesa (1) bazując na [1]:

$$\begin{cases} x = A^t \cdot \cos t \\ y = A^t \cdot \sin t \end{cases} \quad (1)$$

$$t \in R, \quad R \in \langle 52 : 76,2 \rangle$$

gdzie:  $A$  – parametr spirali Archimedesesa,  $A=1,103$ .

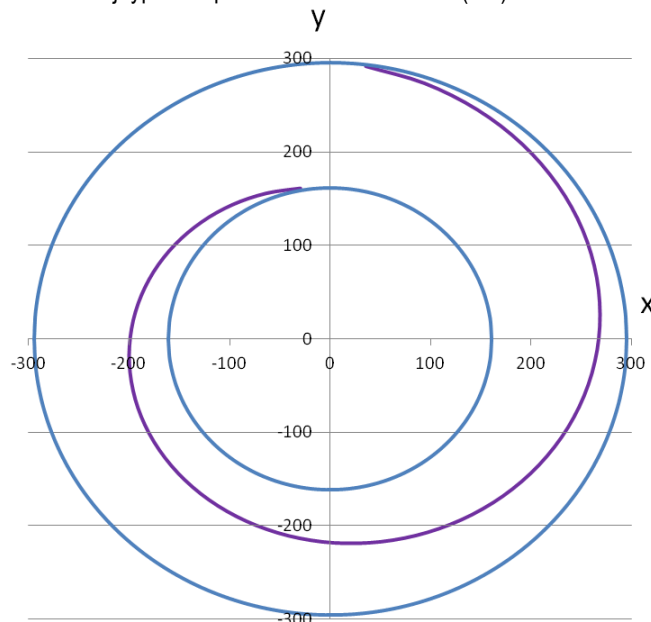
Dodatkowo w celu graficznego przedstawienia kształtu spirali na tarczy hamulcowej, dodatkowo wykorzystano równania okręgu (2) i (3) dla średnicy zewnętrznej i wewnętrznej tarczy [1].

$$x^2 + y^2 = R_z^2 \quad (2)$$

$$x^2 + y^2 = R_w^2 \quad (3)$$

gdzie:  $R_z$  – promień zewnętrzny tarczy,  $R_z=295$  mm,  
 $R_w$  – promień wewnętrzny tarczy,  $R_w=161$  mm.

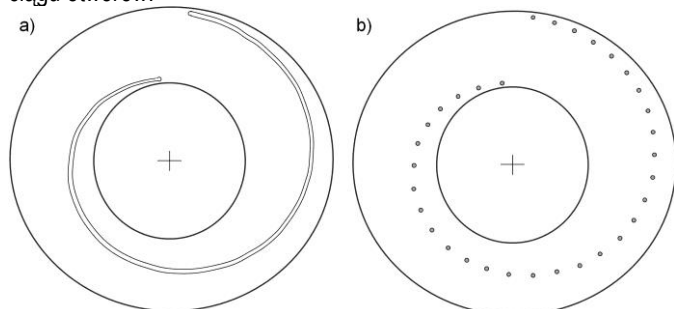
N rysunku 4 przedstawiono zarys spirali Archimedesesa na tarczy hamulcowej typu 590 po zastosowaniu równań (1-3).



**Rys. 4.** Spirala Archimedesesa na powierzchni pierścienia ciernego tarczy hamulcowej

Przedstawione rozwiązanie profilu tarczy hamulcowej z jednym zwojem spirali Archimedesesa zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP w celu uzyskania ochrony patentowej na wynalazek [8].

Na rysunku 5 przedstawiono przykłady wykonania spirali Archimedesesa na pierścieniu ciernym tarczy jako jedno nacięcie lub ciągu otworów.



**Rys. 5.** Schemat tarczy ze spiralą: a) w kształcie jednego nacięcia, b) z nawierceniami

Pierwszą tarczę do badań wykonano według złożenia jak na rysunku 5b), na pierścieniach ciernych (strona prawa i lewa) wykonano nawiercenia na głębokość 4mm (przy całkowitej grubości pierścienia 20mm) wzdłuż linii spiralnej. Na rysunku 6 przedstawiono widok gotowej tarczy hamulcowej z nawierceniami do badań stanowiskowych.



**Rys. 6.** Widok tarczy hamulcowej typu 590x110 z wykonanymi nawierceniami w kształcie spirali Archimedesesa

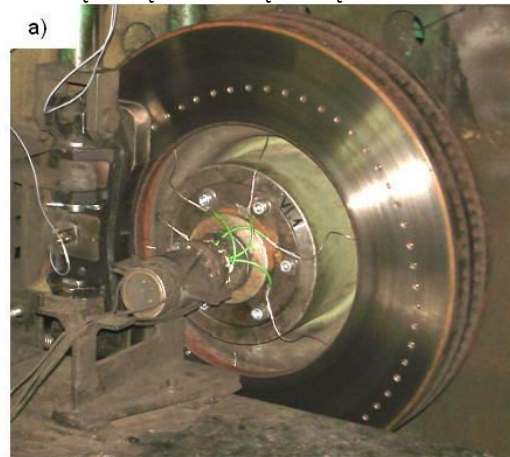
## 2. METODYKA BADAŃ

Badania o charakterze ciernym (gdzie rejestrowano zmianę współczynnika tarcia oraz temperatury tarczy w czasie hamowania) przeprowadzone zostały w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców klockowych i tarczowych pojazdów szynowych. Obiektem badań były dwie tarcze hamulcowe typu 590x110 z wentylującymi łopatkami. Pierwsza tarcza gładka, druga z nawierceniami w kształcie spirali Archimedesesa o jednym zwoju (rys. 6) współpracujące z organicznymi okładzinami typu 175 FR20H.2 firmy Frenoplast.

Do badań wykorzystano program badawczy 2B2 (I) zgodnie z załącznikiem C.2 zawartym w Kodeksie UIC 541-3. Dla wspomnianego programu przeprowadzono hamowanie zatrzymujące z prędkości  $v=50, 80, 120, 160$  i  $200\text{km/h}$ . Nacisk okładziny do tarczy hamulcowej wyniósł  $25\text{kN}$  a symulowana masa do wyhamowania wyniosła  $5,7\text{t}$  zgodnie z [2].

Pomiar temperatury tarczy hamulcowej przeprowadzono przy pomocy 6-ciu termopar zamocowanych do tarczy hamulcowej zgodnie z [5]. Badanie na stanowisku hamulcowym wykonano zgodnie z założeniami eksperymentu czynnego opisanego w [4].

Na rysunku 7 przedstawiono widok stanowiska hamulcowego z zamocowaną tarczą hamulcową z nacięciami wzdłuż linii spiralnej



**Rys. 7.** Obiekt badań na stanowisku hamulcowym kolejowego hamulca tarczowego: a) tarcza hamulcowa typu 590x110 z rowkiem spiralnym, b) widok na część napędową stanowiska hamulcowego z masami wirującymi

Podczas badań na stanowisku bezwładnościowym rejestrowano chwilowy współczynnik tarcia  $\mu_a$ , w każdej chwili hamowania zgodnie z zależnością (4) [2]:

$$\mu_a = \frac{F_t}{F_b} \quad (4)$$

gdzie:  $F_t$  – chwilowa siła styczna odniesiona do promienia hamowania  $r$ ,

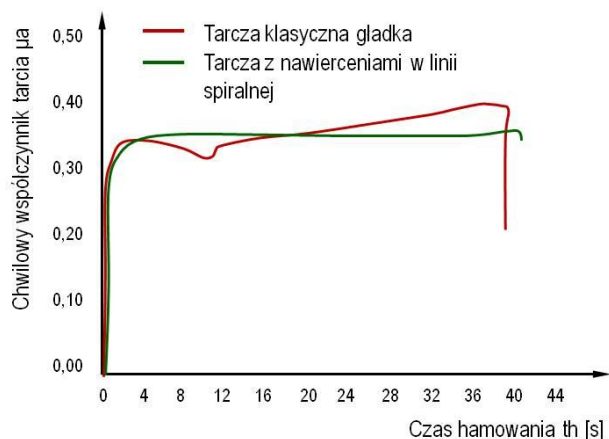
$F_b$  – całkowita chwilowa siła nacisku na tarczę hamulcową.

Ponadto podczas badań stanowiskowych zastosowano kamerę termowizyjną typu FLIR e60 do oceny rozkładu temperatury na okładzinach ciernych.

## 3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie zależności (4) wyznaczono charakterystykę  $\mu_a=f(t)$ . Podczas badań stanowiskowych hamulca kolejowego na dwóch typach tarcz hamulcowych rejestrowano przebieg chwilowego współczynnika tarcia w czasie hamowania od zadanej prędkości hamowania aż do zatrzymania. Na tej podstawie określono chwilę osiągnięcia wartości maksymalnej oraz minimalnej chwilowego współczynnika tarcia.

Wyniki z badań stanowiskowych chwilowego współczynnika tarcia dla dwóch analizowanych typów tarcz hamulcowych przy hamowaniu z naciskiem  $N=25\text{kN}$  i masą do wyhamowania  $M=4,7$  przedstawiono na rysunkach 8-10.



**Rys. 8.** Przebieg chwilowego współczynnika tarcia przy hamowaniu z prędkości  $v=120$  km/h z naciskiem  $N=25$  kN uzyskany na tarcz klasycznej (kolor czerwony) oraz z nawierceniami w linii spiralnej (kolor zielony)

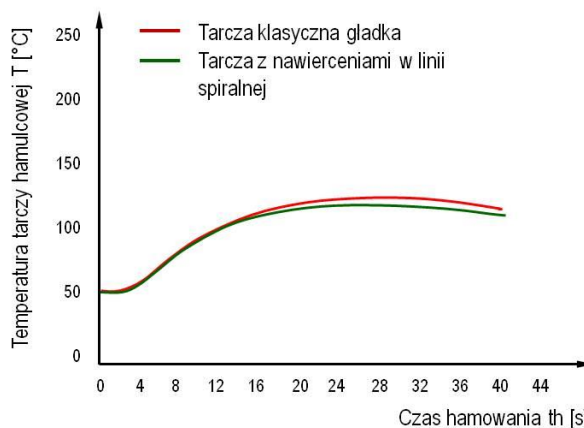


**Rys. 9.** Przebieg chwilowego współczynnika tarcia przy hamowaniu z prędkości  $v=160$  km/h z naciskiem  $N=25$  kN uzyskany na tarcz klasycznej (kolor czerwony) oraz z nawierceniami w linii spiralnej (kolor zielony)

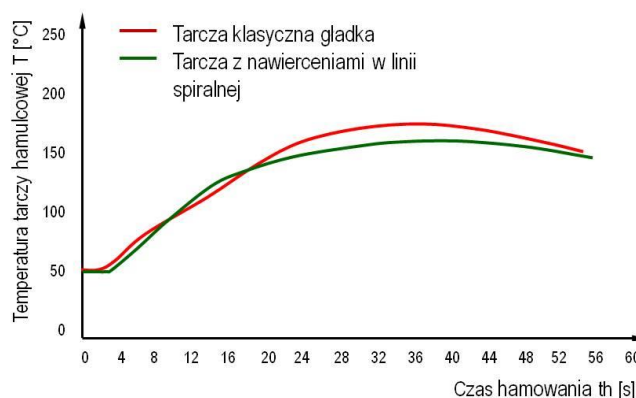


**Rys. 10.** Przebieg chwilowego współczynnika tarcia przy hamowaniu z prędkości  $v=200$  km/h z naciskiem  $N=25$  kN uzyskany na tarcz klasycznej (kolor czerwony) oraz z nawierceniami w linii spiralnej (kolor zielony)

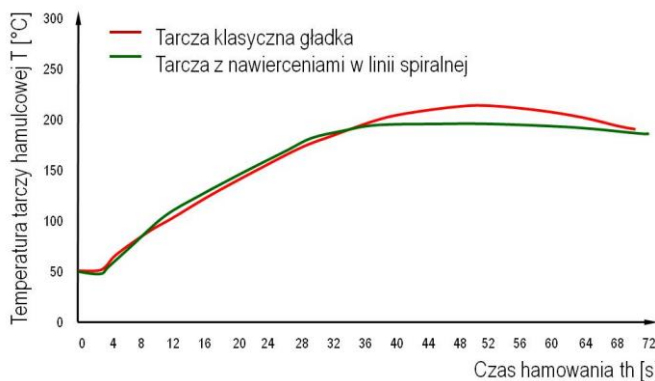
Analizując przebiegi chwilowego współczynnika tarcia określono wartości minimalne oraz maksymalne  $\mu_a$  w celu określenia rozrzutu jego wartości. W tym celu obliczono odchylenie standardowe dla wyników chwilowego współczynnika tarcia uzyskanego w czasie hamowania na klasycznej i zmodyfikowanej tarczy hamulcowej z nawierceniami wykonanymi w linii spiralnej. W przypadku tarczy klasycznej odchylenie standardowe wyniosło 0,26 natomiast dla tarczy ze zmodyfikowaną powierzchnią cierną - 0,18.



**Rys. 11.** Przebieg temperatury tarczy hamulcowej przy hamowaniu z prędkości  $v=120$  km/h z naciskiem  $N=25$  kN uzyskany na tarcz klasycznej (kolor czerwony) oraz z nawierceniami w linii spiralnej (kolor zielony)



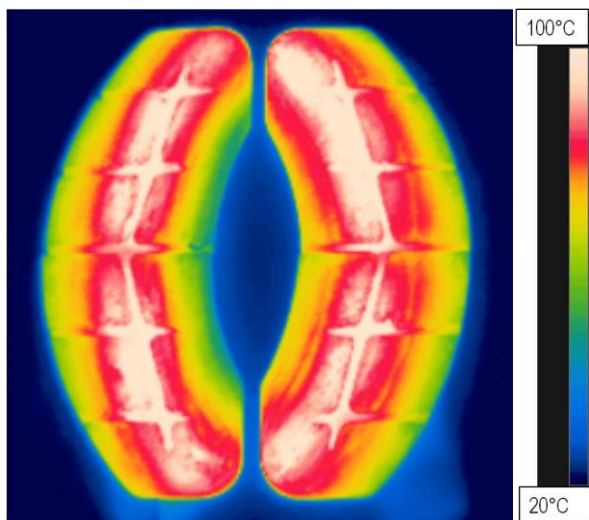
**Rys. 12.** Przebieg temperatury tarczy hamulcowej przy hamowaniu z prędkości  $v=160$  km/h z naciskiem  $N=25$  kN uzyskany na tarcz klasycznej (kolor czerwony) oraz z nawierceniami w linii spiralnej (kolor zielony)



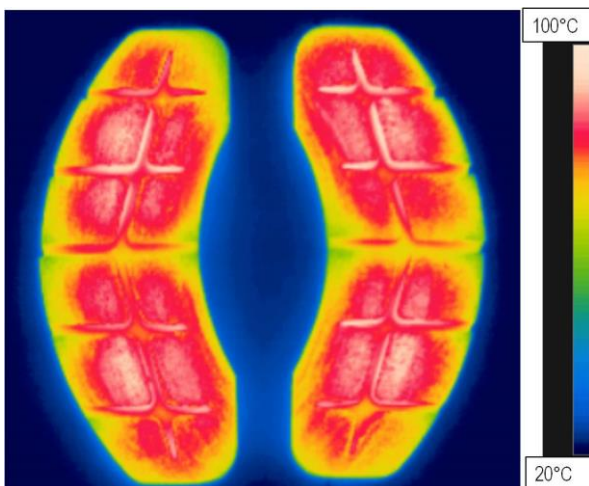
**Rys. 13.** Przebieg temperatury tarczy hamulcowej przy hamowaniu z prędkości  $v=200$  km/h z naciskiem  $N=25$  kN uzyskany na tarcz klasycznej (kolor czerwony) oraz z nawierceniami w linii spiralnej (kolor zielony)

Kolejnym etapem badań była ocena zmian temperatury tarczy hamulcowej przy różnych prędkościach hamowania. Na rysunkach 11-13 przedstawiono zmiany średniej temperatury tarczy jako średnia z 6-ciu termopar zainstalowanych wewnątrz tarczy hamulcowej w chwili zatrzymania. Wyniki zestawiono dla tarczy klasycznej (linia czerwona) oraz dla tarczy z nawierceniami wzdłuż linii spiralnej (linia zielona).

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono rozkłady temperatury na okładzinach ciernych z zastosowaniem kamery termowizyjnej FLIR e60.



**Rys. 14.** Rozkład temperatury na okładzinach ciernych współpracujących z klasycznym pierścieniem ciernym kolejowej tarczy hamulcowej po 15 hamowaniach z różnych prędkości hamowania

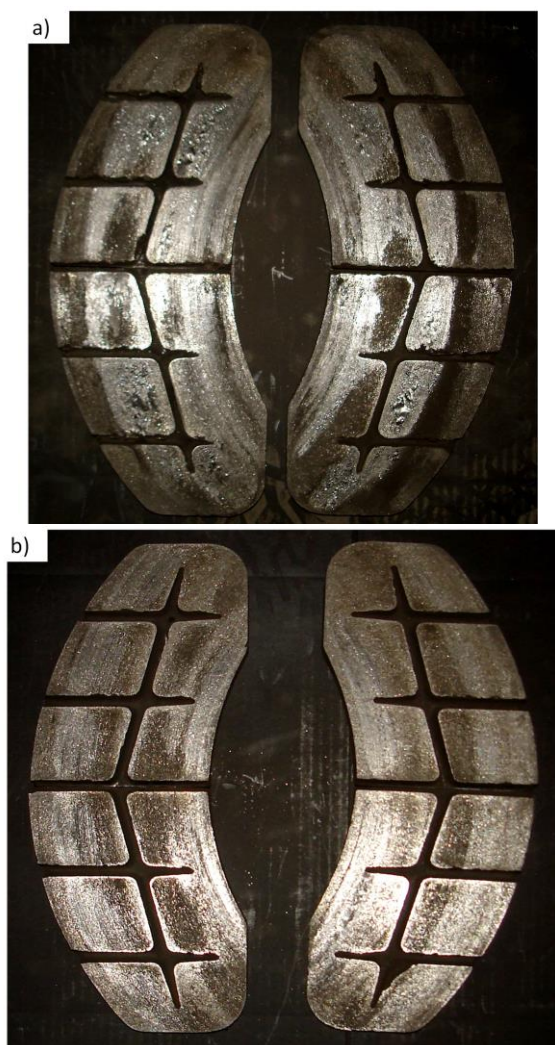


**Rys. 15.** Rozkład temperatury na okładzinach ciernych współpracujących z tarczą hamulcową z nawierceniami wzdłuż linii spiralnej po 15 hamowaniach z różnych prędkości hamowania

Na przykładowych termogramach (rys. 14 i 15) przedstawiono rozpiętość oraz poziom. Rozpiętość (inaczej nazywana span) jest to aktualnie używany zakres temperatury, dla obrazów z rysunku 14 i 15 jest to zakres od 20 do 100°C. Natomiast poziom (level) to środkowy punkt rozpiętości (60°C).

Analizując rozkłady temperatury na okładzinach ciernych, można stwierdzić, że klasyczna tarcza hamulcowa bez rowka lub otworów nawierconych wzdłuż linii spiralnej nie ma możliwości usuwania powstałych w czasie hamowania produktów zużycia. Stąd na okładzinach ciernych powstają nalepy jak warstwa trzecia powstała z produktów zużycia okładzin oraz tarczy hamulcowej (w mniejszej ilości). Nierównomierny rozkład temperatury widoczny na okładzinach przedstawionych na rysunku 14 jest efektem nierównomiernego nacisku okładziny do tarczy hamulcowej ze względu na występowanie cienkiej warstwy nalepy pod okładziną. Natomiast tarcza z nawierceniami wykonanymi wzdłuż linii spiralnej o jednym zwoju powoduje, że co każdy obrót tarczy hamulcowej cała powierzchnia okładziny jest oczyszczana z pozostałości produktów zużycia po

wcześniejszym hamowaniu oraz w trakcie hamowania okładzina jest oczyszczana, co dodatkowo wpływa na poprawę kontaktu okładziny cierniej do tarczy hamulcowej. Na rysunku 16 przedstawiono widok okładzin ciernych po wykonaniu 15 hamowań z różnych prędkości (od 50 do 200km/h).



**Rys. 16.** Widok okładzin ciernych po 15 hamowaniach z różnych prędkości hamowania: a) na tarczy klasycznej (gładkiej), b) na tarczy z nawierceniami wzdłuż linii spiralnej

W przypadku hamowań na tarczy klasycznej (gładkiej), co przedstawia rysunek 15a) okładziny cierne charakteryzują się nalepami oraz nierównomiernie dotartą powierzchnią. W przypadku hamowań na tarczy z nawierceniami (rys. 16b)) obserwuje się równomiernie dotarte okładziny na całej jej powierzchni. Problematyka doboru okładzin ciernych oraz ich współpracy z tarczą hamulcową została już przedstawiona m.in. w pracy [10]. Nierównomierny rozkład nacisków okładzin ciernych do tarczy hamulcowej, co bezpośrednio wpływa na nierównomierny rozkład temperatury, jest w przypadku częstych hamowań z dużych prędkości – efektem występowania zjawiska typu hot spots.

Analizując przedstawione wykresy oraz zdjęcia i termogramy uzyskane po badaniach stanowiskowych na stanowisku hamulcowym stwierdzono, że profil tarczy hamulcowej wpływa na charakterystyki procesu hamowania. Rowek na tarczy hamulcowej oczyszczający ją z produktów zużycia wpływa na ustabilizowanie przebiegu chwilowego współczynnika tarcia oraz na obniżenie temperatury tarczy hamulcowej.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania stanowiskowe pary ciernej kolejowego hamulca tarczowego na dwóch typach tarcz tj. klasycznej (gładkiej) oraz z nawiercenia wzdłuż linii spiralnej pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Tarcza hamulcowa z rowkiem wpływa na stabilny (płaski) przebieg chwilowego współczynnika tarcia w funkcji czasu hamowania. Od początku hamowania chwilowy współczynnik tarcia możliwy jest do opisanego funkcją stałą, dopiero w dalszym czasie hamowania nieznacznie wrasta aż do zatrzymania. W przypadku tarczy klasycznej chwilowy współczynnik tarcia zmienia się od początku hamowania aż do zatrzymania tworząc przebieg zbliżony do odwróconej litery „s”. W szczególności w chwili zatrzymania obserwuje się jego obniżenie.
- 2) Temperatura tarczy hamulcowej z nawierceniami jest nieznacznie niższa względem tarczy klasycznej, może być to spowodowane większą powierzchnią wymiany ciepła przez otwory na tarczy hamulcowej oraz bardziej intensywnym efektem promieniowania cieplnego. Na otworach które nie biorą udziału w tarcu emisyjność jest większa, co ułatwia wymianę ciepła.
- 3) Rozkład temperatury na okładzinach ciernych, o czym dowodzą przeprowadzone badania termowizyjne jest bardziej równomierne po hamowaniu na tarczy z nawierceniami niż na tarczy klasycznej. Okładziny cierne współpracujące z tarczą z nawierceniami wzdłuż linii spiralnej nie wykazują tendencji do powstawania nalepów tj. warstwy trzeciej powstałej z produktów zużycia okładzin i tarczy hamulcowej niż okładziny współpracujące z tarczą klasyczną.

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. Bronsztejn I.N., Siemiendajew K.A., *MATMATYKA poradnik encyklopedyczny, część pierwsza*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
2. Kodeks UIC 541-3. *Hamulec-Hamulec tarczowy i jego zastosowanie. Warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych*. Wydanie 7, czerwiec 2010.
3. KOVIS Zavorni Disc – oferta odlewów tarcz hamulcowych.
4. Leszek W. *Wybrane zagadnienia metodyczne badań empirycznych*. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2006, 142-153.
5. Polska Norma PN-EN 14535-3 *Kolejnictwo – Tarcze hamulcowe kolejowych pojazdów szynowych – Część 3: Tarcze hamulcowe, właściwości tarczy i pary ciernej, klasyfikacja*. Warszawa luty 2016.
6. Strona internetowa: <http://www.rgarage.pl/index.php/modyfikacje/brakes/tarcze-wiercone-czy-nacinane8>.
7. Strona internetowa: <http://mojafirma.infor.pl/moto/eksploatacja-auta/uklad-hamulcowy/271667.Co-daja-nawiercane-tarcze-hamulcowe-czy-mozna-je-montowac-w-kazdym-aucie.html>
8. Sawczuk W., *Tarcza hamulcowa*. Zgłoszenie o udzielenie patentu oznaczonego numerem P.418361 z dnia 16.08.2016.
9. Suwalski R., *Segmentowa tarcza hamulcowa typu 141BK dla pojazdów kolejowych*. Pojazdy szynowe 117/94.
10. Wirth X., *Improving the Performance of Disc Brakes on High-speed Rail Vehicles with a Novel Types of Brake Pad: Isobar*. RTR 1998.

## NEW CONCEPT OF DISC BRAKE FOR RAILWAY VEHICLES

*Abstract*

*The railway technology meets a variety of designs of brake discs which makes it possible to use them in almost all rail vehicles, ranging from light transport vehicles, and ending with heavy freight trains. Ease of installation and high braking on the brake disc is the reason for their continued development. The designers are constantly working on new solutions brake discs, which on the one hand, eliminate the existing problems eg. Thermal phenomena and on the other hand, reduce production costs associated with their casting and subsequent machining.*

*The aim of the article is to present a new concept of the brake disc with a groove on the friction ring to remove the products of wear of the friction brake.*

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. 61 224-4510, Fax. 61 665-2204, e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl.