

# Badania elementów układu hamulcowego do pojazdu Twindexx dla kolei szwajcarskich

Jacek KUKULSKI<sup>1</sup>

## Streszczenie

W artykule opisano badania stanowiskowe doboru par ciernych hamulca kolejowego do pojazdu produkcji firmy Bombardier, przeznaczonego na rynek szwajcarski. Badania obejmowały standardowe programy tribologiczne z Karty UIC 541-3, a także wymagania z normy EN 14535-3. Przedstawiono również zakres badawczy i parametry techniczne stanowiska do badania par ciernych hamulca kolejowego oraz aparaturę pomiarową Instytutu Kolejnictwa, stosowaną w tych badaniach.

**Słowa kluczowe:** transport kolejowy, tarcza hamulcowa, stanowisko dynamometryczne

## 1. Wstęp

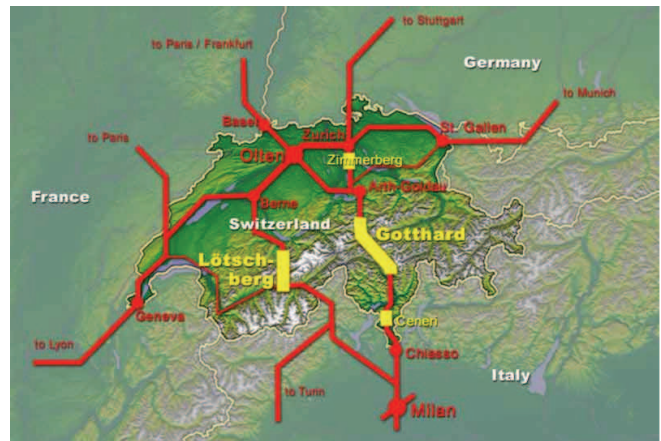
Szwajcarski rynek kolejowy jest jednym z najbardziej wymagających technicznie zarówno w zakresie infrastruktury kolejowej, jak i kolejowych pojazdów szynowych. Wynika to z górzystego ukształtowania terenu, wymagającego pokonania znacznych różnic wysokości. Przeszkodą w podróżowaniu na południe Europy zawsze były Alpy, a transport ładunków i pasażerów przez górskie szlaki zawsze był ryzykowny i stwarzał wiele trudności. Mimo wielu szwajcarskich inwestycji w infrastrukturę (m.in. drogowy tunel Św. Gotarda o długości 16 km lub tunel Lötschberg (rys. 1), władze podjęły decyzję o budowie kolejnego tunelu. Celem jego budowy była troska o środowisko naturalne w Alpach. Władze Szwajcarii uznały, że dużo bardziej korzystne będzie przeprowadzenie ciężkiego tranzytu na południe Europy pod ziemią. Ma to uchronić unikalny alpejski ekosystem przed zniszczeniem oraz odciążyć drogowy tunel Św. Gotarda.

W tablicy 1 zestawiono długości wybranych tuneli kolejowych w Szwajcarii przed otwarciem nowego tunelu bazowego Św. Gotarda (Gotthard Base Tunnel) [11].

Pierwszy projekt tunelu bazowego Św. Gotarda opracowano w 1947 roku. Planowano budowę dwukondygnacyjnego tunelu drogowo-kolejowego z Amstego do Bodio, z podziemną stacją w Serdun. W kolejnych latach analizowano różne warianty przebiegu tunelu. W 1989 roku Rada Federalna zdecydowała o powstaniu transalpejskiego tunelu pod masywami Lötschberg (rys. 2) oraz św. Gotarda z odnogą do Szwajcarii Wschodniej przez tunel Hirzel.

Pierwsze prace dotyczące tunelu bazowego Św. Gotarda rozpoczęto w 1993 roku i obejmowały one wiercenia testowe.

Prace nad budową nowej magistrali podziemnej trwały do 2016 roku, w którym oficjalnie otwarto ten obiekt. Tunel składa się z dwóch oddzielnych rur o długości 57 kilometrów każda, łączonych ze sobą, co 325 metrów, tunelami technicznymi. Każdy z korytarzy ma 9,14 m średnicy [13]. Dodatkowo, tunel podzielono na trzy sekcje, które dzielą stacje techniczne w Faido i Sedrun. Oba obiekty wyposażono w komory rozjazdowe, systemy wentylacyjne i wyjścia ewakuacyjne. Łącznie powstało 151 kilometrów podziemnych tuneli, wliczając w to obie nitki tunelu, łączniki, tunele ewakuacyjne oraz wentylacyjne i techniczne. Wydobyto niemal 25 milionów ton skał, z czego część zatopiono w Jeziorze Czterech Kantonów, a resztę wykorzystano do budowy betonowych tubingów, czyli obudowy tuneli. Najwyższy punkt tunelu znajduje się na wysokości 549 metrów a najniższy na poziomie 312 metrów [13].



Rys. 1. Istniejące tunele kolejowe w Szwajcarii [1]

<sup>1</sup> Dr. inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: jkukulski@ikolej.pl.

Tablica 1

## Zestawienie długości wybranych tuneli kolejowych w Szwajcarii

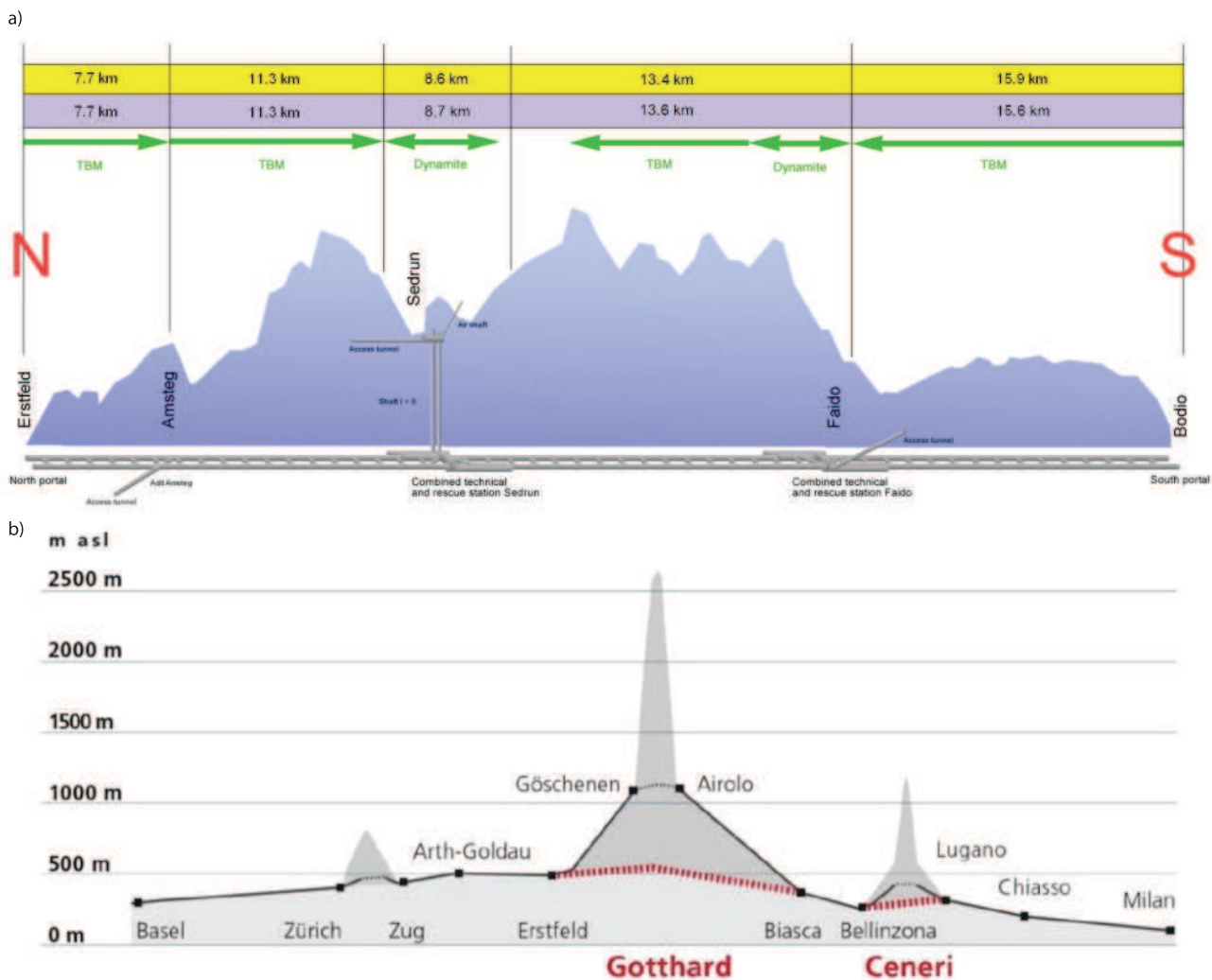
Nazwa tunelu	Długość [km]
Lötschberg Basistunnel	34,570
Simplon	19,824
Furka	15,407
Gotthard	15,003
Lötschberg	14,612
Ricken	8,603
Grenchenberg	8,578
Jungfraubachn	7,122
Grauholz	6,295
Heitersberg	4,929
Zürichberg	4,968
Murgenthal	4,742
Stollenbahn Guttannen – Handeck	4,2
Zentralbanhn Engelberg – Grafenort	4,2
Kerenzerberg	3,955

Źródło: Wikipedia



Rys. 2. Wjazd do tunelu Lötschberg [12]

Za drążenie 80% tunelu odpowiadały cztery tarcze TBM o imionach Sissi, Heidi, Gabi 1 oraz Gabi 2. Każda z nich miała 10 metrów średnicy i ważyła ponad 2700 ton. Dzięki zastosowaniu najnowszej technologii, każda z nich dziennie mogła wydrążyć 20–25 metrów tunelu w litej skale. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg tunelu bazowego Św. Gotarda.



Rys. 3. Przebieg tunelu Św. Gotarda: (a) usytuowanie odległościowe, (b) usytuowanie wysokościowe [13]



Ze względu na trudne warunki geologiczne w okolicach stacji Sedrun, wykorzystano materiały wybuchowe i konwencjonalne maszyny górnicze. Przebicie odcinka gnejsu o długości 1100 m zajęło budowniczym aż trzy lata. Najwyższy punkt tunelu znajduje się na wysokości przekraczającej nieznacznie 500 m n.p.m., a więc o niemal 600 metrów niżej niż na dotychczasowych liniach kolejowych biegnących przez Alpy. Spłaszczenie trasy ułatwi prowadzenie ciężkich pociągów i ograniczy konieczność wykorzystywania lokomotyw w trakcji wielokrotnej.

Oddanie do eksploatacji najdłuższego tunelu na świecie usprawni ruch, zwiększy bezpieczeństwo, a także skróci z 4 h do 2,5 h czas przejazdu pociągów pasażerskich między Zurychem i Mediolanem. Codziennie przez tunel może przejechać 50–80 pociągów pasażerskich z maksymalną prędkością 250 km/h oraz 220–260 towarowych z prędkością do 160 km/h.

## 2. Projekt pociągów Twindexx

Z informacjami przedstawionymi w pierwszym rozdziale pośrednio związane są badania wykonywane w Instytucie Kolejnictwa w programie badawczym symulującym zjazd z tunelu pod przełęczą Św. Gotharta. Wykonano m.in. dynamometryczne badania homologacyjne wstawek hamulcowych podczas hamowania ciągłego ze stałą mocą z następującymi parametrami:  $V = 70 \text{ km/h}$ ,  $P = 45 \text{ kW}$ ,  $t = 34 \text{ min}$ .

Jest to hamowanie mające symulować utrzymanie stałej prędkości przy zjeździe z tunelu pod przełęczą Św. Gotarda. Jednocześnie należy dodać, że jest to bardzo duże obciążenie termiczne dla wstawek i koła. Temperatura w wieńcu koła czasami osiąga 550–600°C, a na powierzchni tocznej koła pojawia się świecący pierścień (rys. 4).



Rys. 4. Widoczny pierścień świetlny na powierzchni tocznej koła [fot. J. Kukulski]

Warunki tych badań są jednak odmienne od rzeczywistości, ponieważ koło w kabine badawczej stanowiska nie ma kontaktu z szyną.

Z kolejami szwajcarskimi były również związane badania par ciernych hamulca kolejowego do projektu Bombardier Twindexx.

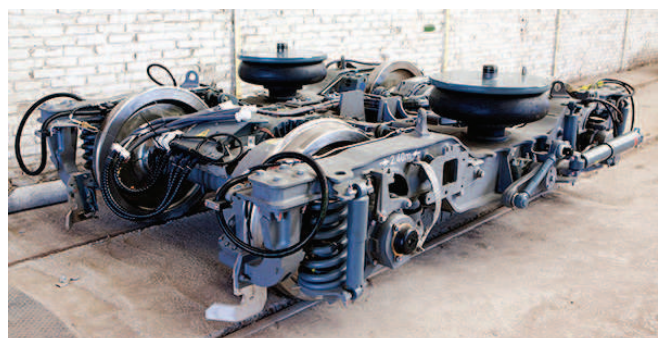
Koleje szwajcarskie podpisały umowę z firmą Bombardier na dostawę 59 pociągów piętrowych o nazwie Twindexx (rys. 5). Całkowita wartość kontraktu wynosi około 1,8 miliarda franków szwajcarskich (1,3 miliarda euro), czyli projekt Twindexx jest największym zamówieniem na pociągi w historii kolei SBB. Kontrakt uwzględnia również opcję na ponad 100 dodatkowych pociągów Twindexx.



Rys. 5. Widok pociągu Twindexx w barwach kolei szwajcarskich [14]

Pociągi są wyposażone w elektroniczny system informacji dla pasażerów, systemy komunikacji awaryjnej oraz monitoring wnętrza. System kompensacji przechyłu pudła Bombardier FLEXX Tronic WAKO zaprojektowano w zakładzie Winterthur, wózki zaś będą wyprodukowane w Siegen w Niemczech. Zastosowana technologia FLEXX Tronic WAKO kompensuje kołysanie pudła wagonu, dzięki czemu poprawia się komfort jazdy i zwiększa się prędkość jazdy po łukach.

Zastosowanie technologii ECO4 umożliwiło zmniejszenie zużycia energii o 10%. Silnik synchroniczny prądu przemiennego z magnesami stałymi Bombardier MITRAC połączono z innymi technologiami z grupy ECO4, takimi jak system klimatyzacji o zwiększonej wydajności cieplnej (*ThermoEfficient Climatization System*) i system kontroli zarządzania energią (*Energy Management Control System*) [13].



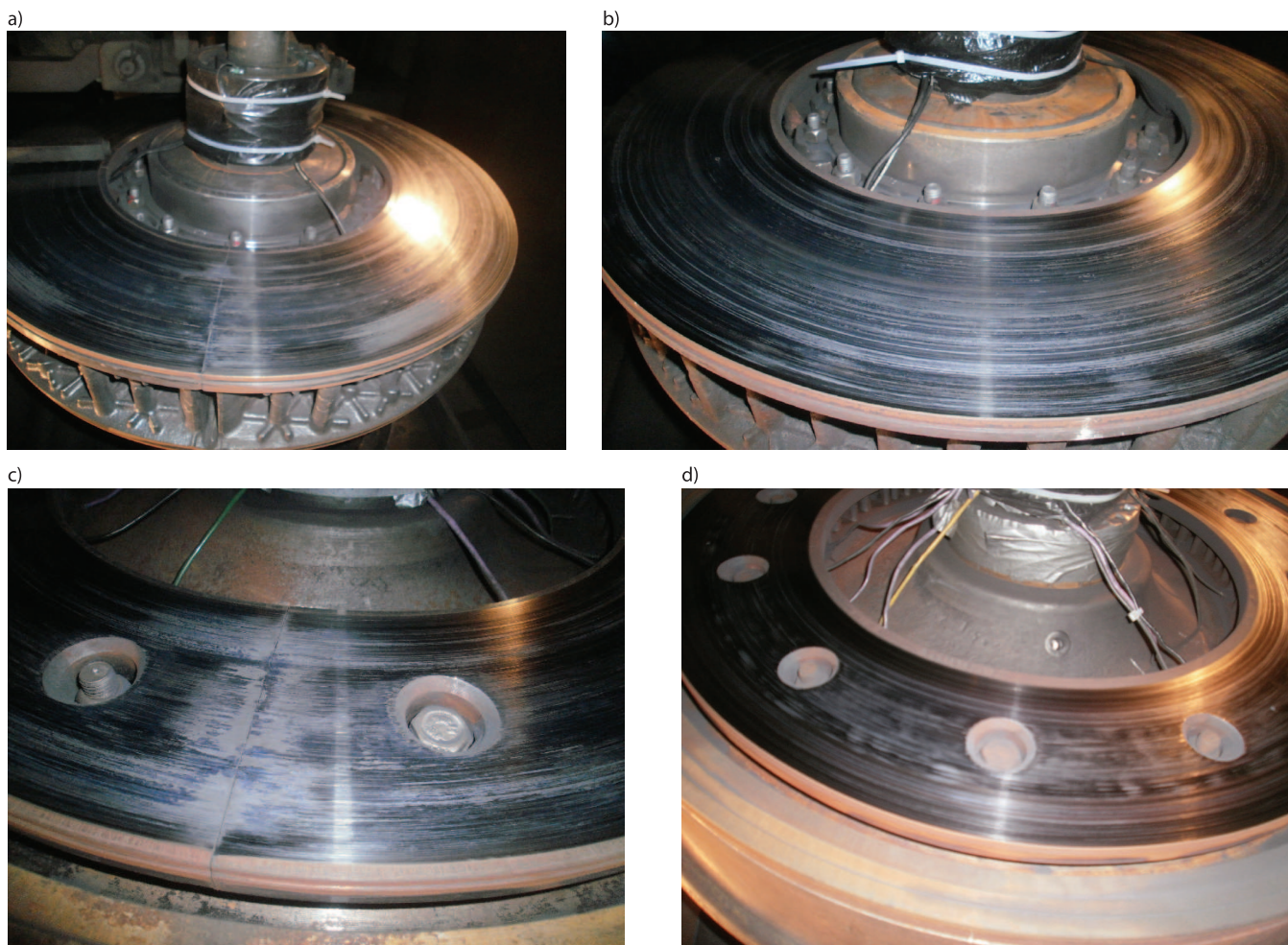
Rys. 6. Wózek toczny zastosowany w pojeździe [14]

Wariant pozyskany przez koleje szwajcarskie, jest przeznaczony do prędkości  $V_{\max} = 200$  km/h. Jest dostępny w konfiguracjach z czterema, ośmioma i szesnastoma wagonami. Maksymalna moc napędowa dla ośmiowagonowego pociągu wynosi 7,5 MW, a napięcie zasilania 15 kV/16,7 Hz.

### 3. Obiekty badań

W projekcie doboru par ciernych do pojazdu Twindexx, badaniom w Instytucie Kolejnictwa poddano 4 typy tarcz

hamulcowych stalowych, do tego pojazdu. W celu właściwego doboru pary cierniej, badania wykonano na dwóch tarczach (dzielonej i pełnej) montowanych na osi oraz dwóch tarczach (dzielonej i pełnej) montowanych na kole (rys. 7). Tarcze montowane na kole wykorzystywane są w części napędowej pociągu, gdyż ze względu na umiejscowienie silników trakcyjnych na osi nie ma możliwości zamocowania klasycznych tarcz hamulcowych. Badania stanowiskowe były realizowane w 2016 roku według procedury badawczej opracowanej na podstawie specyfikacji Kavis Słowenia.



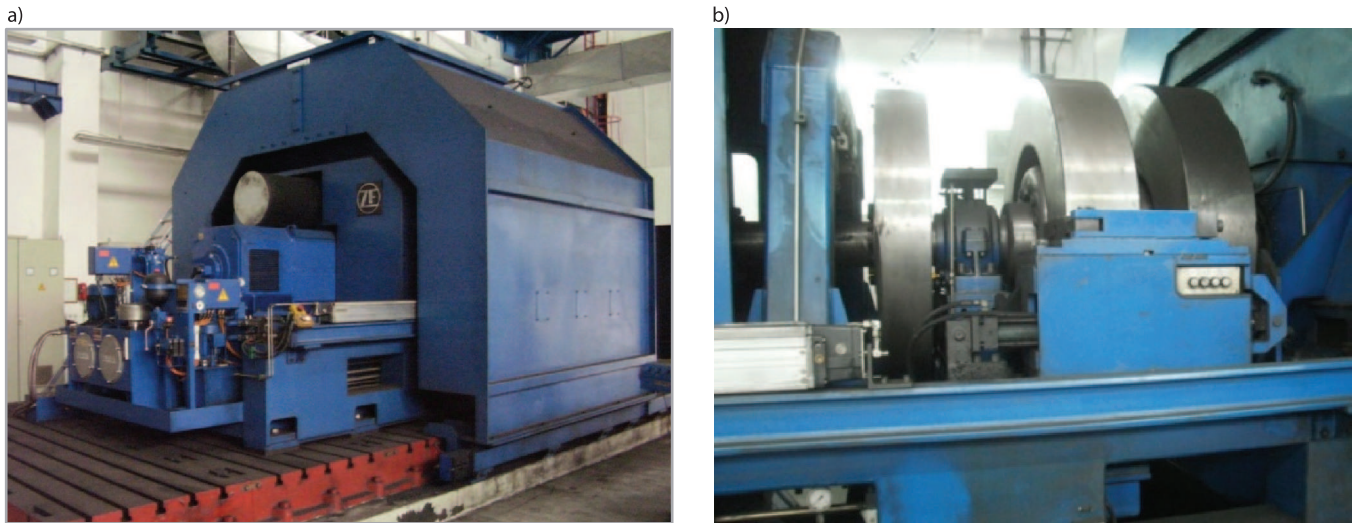
Rys. 7. Widok obiektów badań: (a) tarcza montowana na osi dzielona, (b) tarcza montowana na osi niedzielona, (c) tarcza montowana na kole dzielona, (d) tarcza montowana na kole niedzielona [fot. J. Kukulski]

### 4. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

Badania w Instytucie Kolejnictwa wykonano na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym do badania par ciernych hamulców pojazdów szynowych. Stanowisko ma homologację UIC (Międzynarodowego Związku Kolei) dla uniwersalnych stanowisk hamulcowych do prędkości maksymalnej 420 km/h [5]. Wykorzystywane jest ono do testów

homologacyjnych materiałów ciernych według kart UIC [8, 9] i norm europejskich dotyczących badań kół kolejowych [3, 4, 7] i tarcz hamulcowych [2]. Konstrukcja stanowiska umożliwia badanie par ciernych hamulców pneumatycznych kolejowych do pociągów zespolonych dużych prędkości, zespołów trakcyjnych, lokomotyw i autobusów szynowych w naturalnej wielkości odpowiadającej warunkom rzeczywistym. Na rysunku 8 pokazano stacjonarne stanowisko badawcze oraz widok mechanicznych mas zamachowych.





Rys. 8. Stacjonarne stanowisko badawcze: (a) widok ogólny, (b) masy zamachowe [fot. J. Kukulski]

Podstawowe parametry techniczne bezwładnościowego stanowiska badawczego przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Podstawowe parametry techniczne bezwładnościowego stanowiska badawczego

Parametr	Wartość
Zakres prędkości pojazdu (dla koła $\varnothing$ 890 mm) [km/h]	3,5÷420
Maksymalna prędkość obrotowa [obr./min]	2500
Moc silnika napędowego przy 1150 obr./min [kW]	536
Moment obrotowy w zakresie do 1150 obr./min. [Nm]	4450
Maksymalny moment hamowania: <ul style="list-style-type: none"> <li>• hamowanie do zatrzymania [Nm]</li> <li>• hamowanie ciągłe [Nm]</li> </ul>	3000 4450
Zakres momentów bezwładności mas z elektryczną symulacją [kgm <sup>2</sup> ]	150÷3000
Maksymalna symulowana masa przypadająca na parę cierną [t]	15
Zakres regulacji sumarycznej siły docisku szczęk hamulcowych w hamulcu tarczowym [kN]	0,60
Zakres pomiarowy temperatury tarczy hamulcowej (koła jezdnego) [°C]	0÷1000

[Opracowanie własne]

Oprócz standardowego wyposażenia pomiarowego stanowiska, w badaniach wykorzystano dodatkową aparaturę do pomiaru chropowatości oraz system dodatkowej rejestracji temperatur w badanych obiektach. W tablicy 3 przedstawiono wykaz aparatury używanej do pomiaru chropowatości i temperatury.

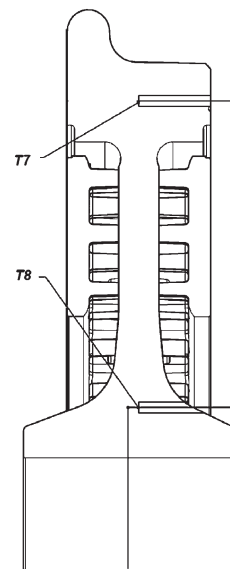
Oprócz podstawowych sześciu termopar montowanych pod powierzchnią cierną tarczy hamulcowej, dodatkowo zamontowano dwa czujniki do pomiaru temperatury (rys. 9). Pomiary te miały na celu określenie wielkości propagacji ciepła do tarczy i wieńca koła w trakcie hamowania.

Tablica 3

Wykaz dodatkowej aparatury pomiarowej

Aparatura pomiarowa	Producent	Typ
Chropowatościomierz	Hommel	Etamic W5
Rejestrator temperatur	Apar	AR 593

[Opracowanie własne]



Rys. 9. Lokalizacja dodatkowych czujników pomiarowych; opracowanie własne na podstawie [6]

## 5. Zakres prowadzonych badań

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym opisanym w rozdziale 4. W badaniach użyto 2 tarcze montowane na osi i 2 tarcze hamulcowe montowane na kole.

Programy badawcze opracowano według karty UIC [8], TSI RST HS [1] i normy [2]. Zakresy badań poszczególnych programów były następujące:

### 5.1. Program badawczy – 6A

Jest to podstawowy program badawczy wykorzystywany przy badaniach certyfikacyjnych materiałów ciernych. Obejmował on 84 hamowania badawcze do  $V_{\max} = 200$  km/h w warunkach na sucho i mokro. Umożliwia on sprawdzenie podstawowych właściwości tribologicznych obejmujących m.in.: średni i chwilowy współczynnik tarcia, zużycia masowego okładzin hamulcowych.

### 5.2. Program badawczy – 6B

Program jest wymagany przy badaniach certyfikacyjnych materiałów ciernych. Różnica polega na tym, że symulowane są tutaj warunki mokre (opady deszczu, śniegu) z wydatkiem 25 l/h przez natrysk (na tarczę hamulcową) wody ze specjalnych dysz usytuowanych po obu stronach tarczy. Głównym celem, oprócz sprawdzenia właściwości tribologicznych w warunkach mokrych, jest sprawdzenie czy nie występuje zjawisko poślizgu wodnego (*aquaplaningu*).

### 5.3. Hamowania awaryjne

Badania polegają na rozpędzeniu obiektu badań do  $V_{\max} = 200$  km/h i wykonanie dwóch hamowań następujących po sobie bez sekwencji studzenia. Realizowano różne warianty obciążeń (masy hamujące, siły docisku okładzin do tarczy hamulcowej) w warunkach suchych i mokrych.

### 5.4. Sprawdzenie statycznego współczynnika tarcia

Badanie miało na celu sprawdzenie statycznego współczynnika tarcia w przypadku zastosowania hamulca postojowego na pochyleniu. Test wykonywano dla dwóch przypadków, jeden cykl obejmował badania w podwyższonej temperaturze tarczy powyżej 300°C, drugi zaś cykl w temperaturze poniżej 50°C.

### 5.5. Sprawdzenie odporności na obciążenia termiczne

Program badawczy składał się z kilkunastu cykli badawczych obejmujących między innymi hamowania awaryjne z  $V_{\max} = 200$  km/h. Badania miały na celu sprawdzenie skuteczności rozpraszania ciepła tarczy hamulcowej w trakcie hamowań spowalniających i do zatrzymania obejmujących symulujące przejazd na linii:

- Romanshorn – Brig zawierającej również odcinek nowej linii Olten – Bern,
- Brig – Geneve,
- Einsiedeln-Pfaffikon.

Realizowano również hamowania ciągłe na spadkach linii kolejowej o następujących parametrach:

- $V = 180$  km/h; pochylenie 35‰ na dystansie 6 km, po zakończeniu hamowania ciągłego następowało hamowanie awaryjne do zatrzymania,
- $V = 200$  km/h; pochylenie 35‰ na dystansie 6 km, po zakończeniu hamowania ciągłego następowało hamowanie awaryjne do zatrzymania,
- $V = 80$  km/h; pochylenie 21‰ na dystansie 46 km.

### 5.6. Sprawdzenie wentylacji tarczy hamulcowej

Badanie polegało na sprawdzeniu mocy wentylacji tarczy hamulcowej. Na klasę techniczną wentylacji wpływa konstrukcja i położenie żeber wentylacyjnych umożliwiających właściwy przepływ powietrza wewnątrz tarczy. Odpowiednia moc wentylacji wpływa na właściwe studzenie pary cierniej po hamowaniu. W trakcie badań rejestrowano następujące parametry wymagane w specyfikacji badawczej:

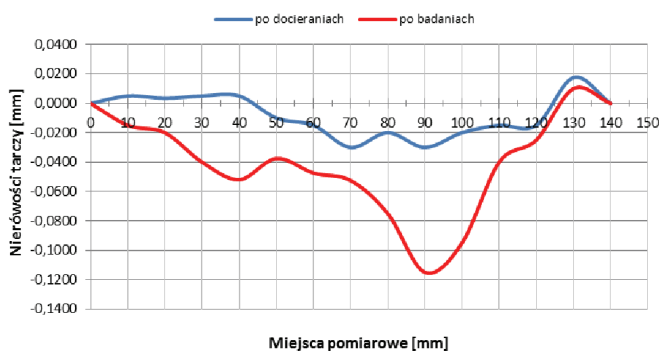
- moment uzyskania 95% nominalnej łącznej siły nacisku okładzin,
- prędkość kątową i obrotową koła,
- prędkość liniową dla zadanej średnicy koła,
- drogę hamowania,
- czas hamowania,
- ciśnienie w cylindrze hamulcowym,
- łączną siłę nacisku okładzin hamulcowych,
- moment hamujący,
- symulowaną masę hamowania,
- temperatury w sześciu punktach powierzchni cierniej tarczy i ich chwilową wartość średnią,
- chwilowy współczynnik tarcia,
- prędkość przepływu powietrza wentylującego parę ciernią,
- wybrane parametry rejestrowane w formie ciągłej z częstotliwością 1 Hz obejmującą zarówno hamowanie, jak i czas między hamowaniami.

Na podstawie wymienionych parametrów i zadanych parametrów w programie badawczym, obliczono wielkości wykorzystane do analizy wyników badań. Dodatkowo, w trakcie badań wykonywano pomiary zużycia masowego okładzin hamulcowych i pomiaru profilu zużycia tarczy.

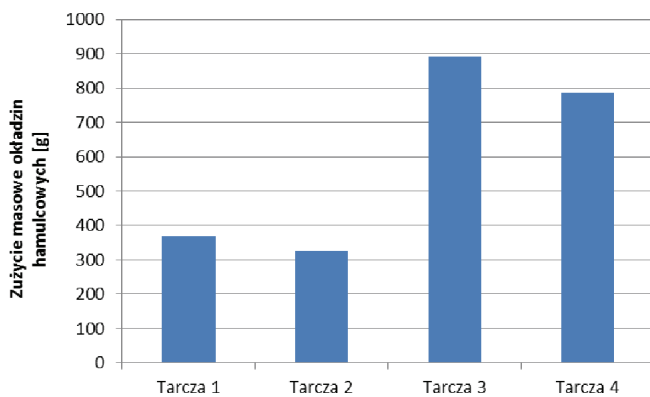
## 6. Wyniki badań

Głównym kryterium oceny badanych par ciernych, w tym okładzin, był średni i chwilowy współczynnik tarcia, temperatury, zużycia tarcz oraz zużycia masowego okładzin. Dotyczy to głównie programów badawczych z karty UIC 541-3 [8]. Pozostałe programy badawcze miały na celu sprawdzenie zachowania się pary cierniej przy ekstremalnych warunkach, które mogą wystąpić w eksploatacji. Ze względu na brak kryteriów oceny w specyfikacji badawczej otrzymanej od zleceniodawcy, nie oceniano pozostałych

wyników badań. W raporcie końcowym zamieszczono jedynie wyniki badań i pomiarów badanej pary cierniej oraz ich porównanie dla różnych konfiguracji. Prezentowane przykładowe wyniki badań przygotowano z zachowaniem poufności wyników badań, pokazując jednocześnie formę opracowywania uzyskanych pomiarów. Na rysunku 10 przedstawiono przykładowy pomiar profilu tarczy po docieraniach kondycjonujących i po zakończeniu badań, a na rysunku 11 pomiar zużycia masowego okładzin hamulcowych dla różnych typów tarcz.



Rys. 10. Profil tarczy po badaniach stanowiskowych; opracowano na podstawie [6]



Rys. 11. Zużycie masowe okładzin hamulcowych; opracowano na podstawie [6]

## 7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań czterech tarcz hamulcowych do elektrycznych zespołów trakcyjnych do  $V_{\max} = 200$  km/h zrealizowanych na stanowisku badawczym Instytutu Kolejnictwa. Docelowo, badane obiekty mają być przeznaczone do pojazdów Twindexx, kierowanych na rynek szwajcarski. Opisane programy badawcze oraz testy tribologiczne, którym poddano badane obiekty, pokazują olbrzymi zakres i dużą liczbę badań, jakim musi przejść para cierna w czasie doboru do danego typu pojazdu. Przypadki indywidualnego doboru par ciernych do konkretnego

pojazdu kolejowego, przeznaczonego do jazdy na wybranych liniach kolejowych stają się coraz częstsze. Na przykładzie badań tarcz hamulcowych opisano również możliwości techniczne stanowiska dynamometrycznego, eksploatacyjnego w Instytucie Kolejnictwa.

## Bibliografia

1. Decyzja 2008/232/WE: Decyzja Komisji z dnia 21 lutego 2008 r. dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu „Tabor” transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości (notyfikowana jako dokument nr C(2008) 648).
2. EN 14535-3: Railway application – Brake discs for railway rolling stock – Part 3: Brake discs, performance of the disc and the friction couple, classification, 2012.
3. PN-EN 13979-1+A2:2011: Kolejnictwo – Zestawy kołowe i wózki – Koła monoblokowe – Procedura dopuszczenia – Część 1: Koła kute i walcowane.
4. prEN 16452: Railway applications – Braking – Brake blocks, 2012.
5. Report B 126/RP 18: Dynamometers for international approval of friction materials. Requirements.
6. Report No. LW/42.01/15: Dynamometer tests of 4 brake discs of type OZ640, OD640, KZ750 and KD750 according to the program test specification No. SBB FV-DOSTO ST 004-2015. Warszawa 2015.
7. UIC 510-5: Technical approval of monobloc wheels – Application document for standard EN 13979-1.
8. UIC 541-3: Brakes – Disc brakes and their application – General conditions for the oval of brake pads. 7th edition, January 2010.
9. UIC 541-4: Brakes – Brakes with composite brake blocks – General conditions for certification of composite brake blocks – 4th edition, January 2010.

## Źródła internetowe

10. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/NEAT\\_im\\_europ\\_Eisenbahnnet](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/NEAT_im_europ_Eisenbahnnet) [dostęp z dnia 25.05.2017].
11. <http://szwajcaria.net/bahntunnel.html> [dostęp z dnia 25.05.2017].
12. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/Alptransit\\_LBT\\_Frutigen\\_north\\_portal.jpg/1200px-Alptransit\\_LBT\\_Frutigen\\_north\\_portal.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/Alptransit_LBT_Frutigen_north_portal.jpg/1200px-Alptransit_LBT_Frutigen_north_portal.jpg) [dostęp z dnia 25.05.2017].
13. <http://www.rynek-kolejowy-demo.bm5.pl/wiadomosci/szwajcaria-otwarcie-tunelu-gotarda-76807.html> [dostęp z dnia 25.05.2017].
14. <http://www.railway-technology.com/projects/bombardier-twindexx-double-deck-trains/bombardier-twindexx-double-deck-trains3.html> [dostęp z dnia 25.05.2017].