

Badania stanowiskowe par ciernych hamulca kolejowego na obciążenia termiczne

Jacek KUKULSKI¹

Streszczenie

W artykule opisano przykładowe wyniki badań, wykonanych przez autora na stanowisku dynamometrycznym Instytutu Kolejnictwa. Zakres badań zawężono do badania par ciernych poddawanych obciążeniom termicznym. Tematyka jest bardzo interesująca i nadal aktualna ze względu na występujące zjawiska. Scharakteryzowano podstawowe parametry techniczne stanowiska badawczego oraz opisano przebieg badań i uzyskane wyniki pomiarów temperatury za pomocą termopar i kamery termowizyjnej. Dodatkowo przedstawiono pomiar zużycia materiałów ciernych w trakcie trwania badania oraz metodę i przykładowe wyniki badań naprężeń własnych z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej.

Słowa kluczowe: badania dynamometryczne, pary cierne, obciążenia termiczne

1. Wstęp

Narażenie na skrajne obciążenia termiczne par ciernych hamulca kolejowego w normalnej eksploatacji zdarzają się obecnie rzadko, jednak nie można wykluczyć takich sytuacji. Wystąpienie takiego przypadku w pierwszej kolejności może doprowadzić do zniszczenia lub uszkodzenia materiału ciernego (wstawki hamulcowej, okładziny cierniej hamulca tarczowego), a w skrajnym przypadku do uszkodzenia powierzchni tocznej koła, co może spowodować zagrożenie bezpieczeństwa. Skutki awarii mogą być tragiczne, czego przykładem jest uszkodzenie obręczy koła w pociągu ICE w Eschede w 1988 roku (rys. 1).



Rys. 1. Skutki wypadku w Eschede w wyniku pęknięcia obręczy koła kolejowego [20]

Proces dopuszczenia (certyfikacji) par ciernych hamulca klockowego lub tarczowego w pierwszej fazie obejmuje badania stanowiskowe. Mogą one być wykonywane według programów badawczych zawartych w kartach UIC [17, 18, 19], w normach [6, 10, 12, 13] lub w Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności [14, 15]. Zdefiniowano w nich liczne programy badawcze, m.in. obejmujące badania na obciążenia termiczne pary cierniej. Tego typu badania są mocno energetycznymi badaniami, często prowadzącymi do granicznego zużycia materiału ciernego, a także do całkowitej destrukcji lub zmniejszenia wytrzymałości badanego koła kolejowego.

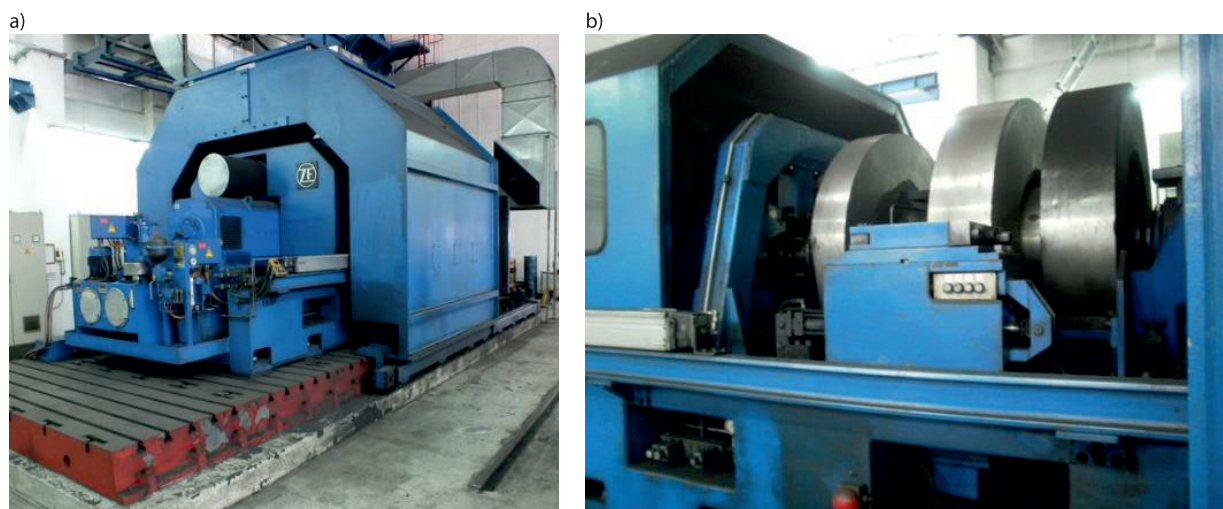
2. Stanowisko dynamometryczne Instytutu Kolejnictwa

2.1. Podstawowe parametry techniczne

Stanowisko dynamometryczne Instytutu Kolejnictwa jest wykorzystywane do badań homologacyjnych według kart UIC [17, 18, 19], norm europejskich dotyczących badań kół kolejowych [6], wstawek hamulcowych [3] i tarcz hamulcowych [4]. Innymi dokumentami normatywnymi dotyczącymi badania par ciernych hamulca klockowego są Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności [14, 15] oraz dokument Europejskiej Agencji Kolejowej [6], które są powiązane z wymienionymi kartami i normami europejskimi.

Konstrukcja stanowiska w naturalnej wielkości, odpowiadającej warunkom rzeczywistym, umożliwia badanie par

¹ Dr hab. inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mil: jkukulski@ikolej.pl.



Rys. 2. Dynamometryczne stanowisko badawcze: (a) widok ogólny, (b) masy zamachowe [fot. J. Kukulski]

ciernych hamulców pneumatycznych kolejowych do pociągów zespolonych dużych prędkości, zespołów trakcyjnych, lokomotyw i autobusów szynowych. Na rysunku 2 przedstawiono stacjonarne stanowisko badawcze oraz widok na mechaniczne masy zamachowe.

Podstawowe parametry techniczne dynamometrycznego stanowiska badawczego przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

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 do 1150 obr./min [Nm]	4450
Maksymalny moment hamowania: • hamowanie do zatrzymania [Nm] • hamowanie ciągłe [Nm]	3000 4450
Zakres momentów bezwładności mas z elektryczną symulacją [kgm ²]	150÷3000
Maksymalna symulowana masa przypadająca na parę cierną [t]	15
Zakres regulacji sumarycznej siły docisku szczęk hamulcowych w: • hamulcu tarczowym [kN] • hamulcu klockowym [kN]	0÷60 0÷100
Zakres pomiarowy temperatury tarczy hamulcowej (koła jezdnego) [°C]	0÷1000

[Opracowanie własne].

W celu rozszerzenia oferty badawczej oraz unowocześnienia aparatury pomiarowej stanowiska dynamometrycznego, uzyskano dofinansowanie na kompleksową modernizację stanowiska. Prace będą realizowane w latach 2021–2022. Zakres prac modernizacyjnych będzie przedmiotem odrębnego artykułu.

2.2. Programy badawcze symulujące obciążenia termiczne

Programy badawcze, które symulują obciążenie termiczne powinny obejmować najbardziej skrajne warunki eksploatacji, jak: awarię układu hamulcowego i uszkodzenia układu biegowego. Programy przeważnie dotyczą hamowania ciągłego, o określonej mocy hamowania, zazwyczaj powyżej 45 kW. Takie programy są wykorzystywane m.in. w procesie dopuszczenia / certyfikacji wstawek, okładzin hamulcowych oraz tarcz i kół kolejowych. Przykładowe parametry hamowań ciągłych, stosowane w badaniach par ciernych przedstawiono w tabelicy 2.

Tabela 2

Wybrane parametry hamowań ciągłych symulujących obciążenia termiczne

Typ obiektu badanego	Siła docisku / moc hamowania	Prędkość hamowania [km/h]	Zakładany czas trwania hamowania [min]
Wstawki hamulcowe typu K / LL	45 kW	70	34
Wstawki hamulcowe typu K / LL	9/24 kN	100	60 lub zużycie wstawek 32 mm
Okładziny hamulcowe	45 kW	70	34
Okładziny hamulcowe	72 kW	70	12
Okładziny hamulcowe	58 kW	80	20
Koła kolejowe monoblokowe	50 kW	60	45
Tarcze hamulcowe	60 kW	80	30

[Opracowanie własne].

3. Przykładowe wyniki badań obciążeń termicznych

W dalszej części artykułu przedstawiono przykładowe wyniki badań tribologicznych oraz wyniki badań dodatkowych, uzyskane podczas hamowań ciągłych. Uzyskane wyniki umożliwiają dodatkową ocenę stanu badanych obiektów oraz ich właściwości.

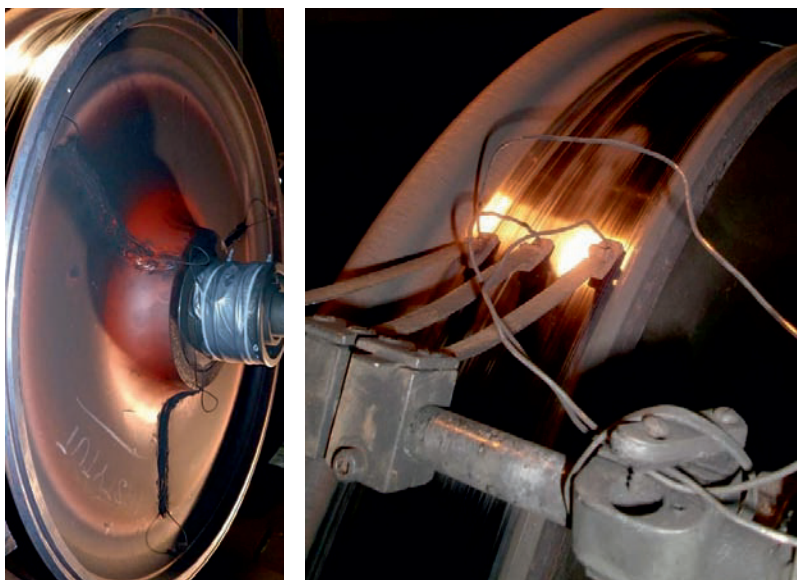
3.1. Pomiary temperatur i zużycia materiału ciernego

W niektórych badaniach tribologicznych jako kryterium oceny jest przyjmowana maksymalna temperatura koła w trakcie badań, ewentualnie dopuszczalne zużycie wstawek hamulcowych. Zgodnie z wymaganiami, temperatury są mierzone termoparami wbudowanymi na głębokości 5 mm pod powierzchnią toczną koła, rozmieszczonymi

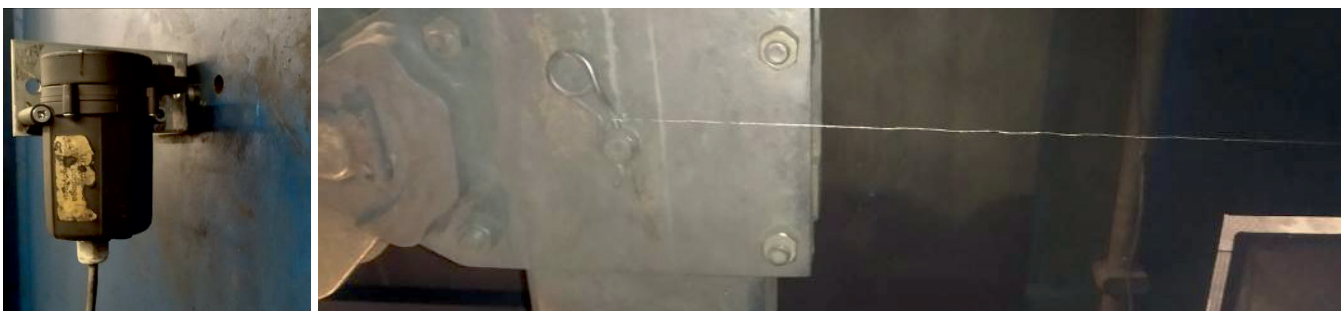
co 120°, a (i/lub) za pomocą odpowiednio rozstawionych termopar ślizgowych (rys. 3). W przypadku zużycia wstawek hamulcowych są stosowane specjalne czujniki linkowe przemieszczeń (rys. 4), umożliwiające bardzo dokładny pomiar zużycia materiału ciernego (grubości wstawki).

Przykładowe wyniki pomiarów temperatury i zużycia wstawek w funkcji czasu trwania hamowania ciągłego przedstawiono na rysunku 5.

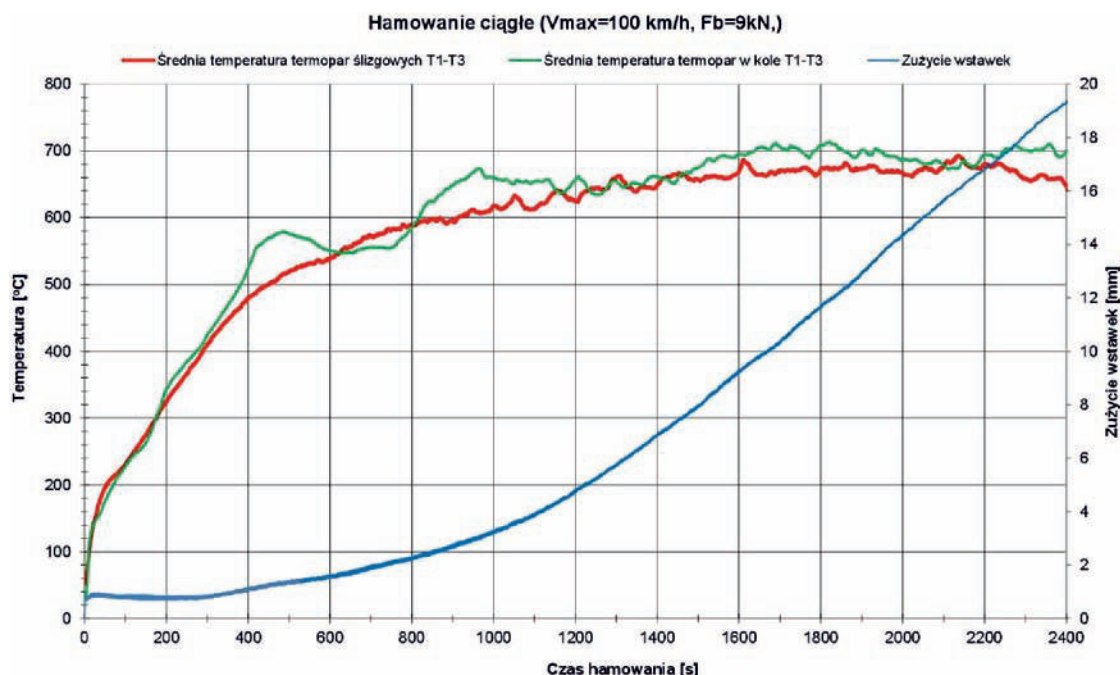
Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że znaczny przyrost zużycia wstawek rozpoczyna się po około 300 sekundach hamowania. Temperatura koła w tym czasie przekracza 400°C. Tak wysokie temperatury powodują zarówno zmiany w strukturze materiału ciernego i jego przyspieszone zużycie, jak również mogą powodować destrukcję powierzchni tocznej koła (rys. 6). Głównym kryterium akceptacji tego typu badania, polegającym na spełnieniu wymaganych warunków, jest temperatura (tabl. 3).



Rys. 3. Rozmieszczenie termopar w wieńcu koła i termopar ślizgowych [fot. J. Kukulski]



Rys. 4. Czujnik linkowy do pomiaru zużycia wstawek w trakcie hamowania badawczego [fot. J. Kukulski]



Rys. 5. Wyniki pomiaru temperatury i średniego zużycia wstawk hamulcowych [opracowanie własne]

Tablica 3

Kryteria akceptacji wyników według [10]

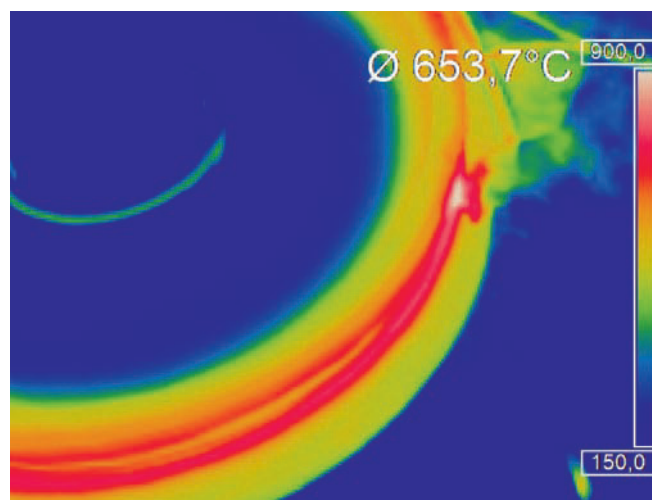
Temperatura koła		
< 600°C	> 600°C	> 700°C i ≤ 850°C
Spełnia	Nie spełnia, gdy skumulowany czas przekroczenia podanej wartości jest dłuższy niż 25 minut	Nie spełnia, gdy skumulowany czas w podanym przedziale wartości jest dłuższy niż 5 minut



Rys. 6. Destrukcja powierzchni tocznej koła po jednym z badań na obciążenie termiczne [fot. J. Kukulski]

Dodatkowym narzędziem, wykorzystywanym przy tak mocno energetycznych hamowaniach, może być kamera termowizyjna, za pomocą której w trakcie badań można zarejestrować rozkład temperatur w wieńcu koła (rys. 7).

Wyniki te są cennym uzupełnieniem pomiarów termoparami, rejestrującymi temperaturę jedynie w trzech punktach. Dodatkowe pomiary z kamery termowizyjnej umożliwiają uzyskanie znacznej ilości danych o rozkładzie temperatury w badanym obiekcie, a nie tylko w tych trzech punktach podstawowych.



Rys. 7. Przykładowy obraz termowizyjny wieńca koła dla hamowania ciągłego [opracowanie własne]

3.2. Pomiary naprężeń własnych w kołach monoblokowych

Uszkodzenia kół wynikające z efektów cieplnych podczas hamowania, zaczynają się od pęknięć cieplnych w wieńcu, co stanowiło i stanowi poważny problem w eksploatacji ta-

boru. Przegrzanie koła powoduje zmianę barwy powierzchni. Im przegrzanie jest bardziej intensywne, tym większy jest zasięg strefy zmiany barwy. Pękanie wskutek uderzeń cieplnych jest wynikiem niekorzystnych zmian naprężeń własnych w wieńcu koła (rys. 8). Naprężenia własne w nowych kołach monoblokowych zazwyczaj mają charakter naprężeń ściskających. W trakcie nagrzewania i stygnięcia kół, w wyniku stosowania hamulców klockowych, dochodzi do zmiany naprężeń ściskających na rozciągające. Prace prowadzone przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT) i Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa (CNTK) nad wykorzystaniem różnych technik pomiarowych naprężeń własnych, umożliwiły opracowanie przez IPPT nowatorskiej, nieniszczącej ultradźwiękowej metody pomiaru naprężeń własnych z wykorzystaniem miernika DEBRO [1–5, 8, 9, 16, 20]. Metoda używana w pomiarach jest jedną z metod wykorzystywanych w pracach certyfikacyjnych i dopuszczeniowych nowych kół kolejowych zgodnie z wymaganiami

norm [6, 17]. Pomiary naprężeń własnych według norm wykonuje się w określonych przekrojach i miejscach pomiarowych przedstawionych na rysunku 9.

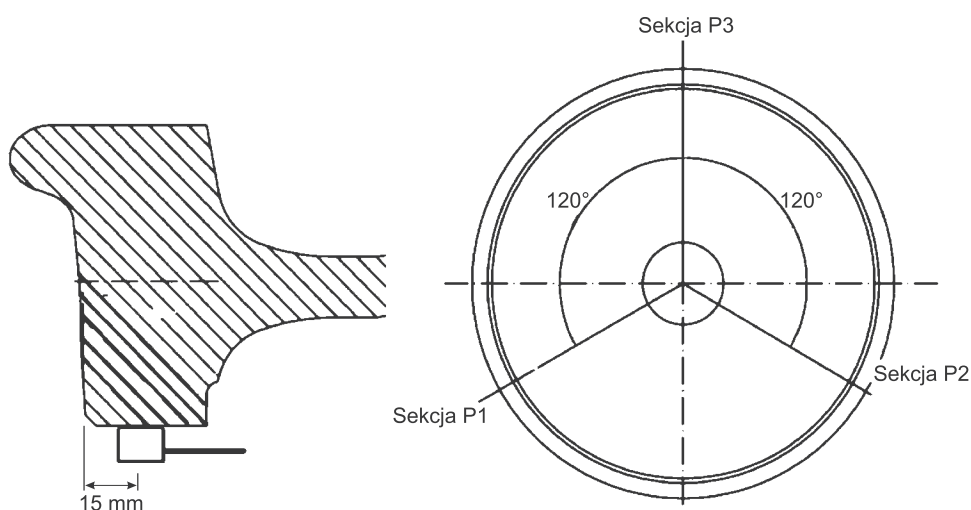
Przykładowe wyniki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń własnych w wieńcu koła monoblokowego dla różnych parametrów hamowania, w tym hamowania ciągłego, przedstawiono na rysunku 10. Należy jednak dodać, że badania przeprowadzone na stanowisku dynamometrycznym charakteryzują się tym, że badane koło nie ma kontaktu z szyną kolejową. Ma to istotny wpływ na charakter naprężeń głównie rozciągających, bowiem w przypadku kontaktu koła z szyną zachodzi zjawisko walcowania koła po szynie, a tym samym wprowadzanie naprężeń ściskających.

3.3. HotSpoty – gorące punkty i obszary

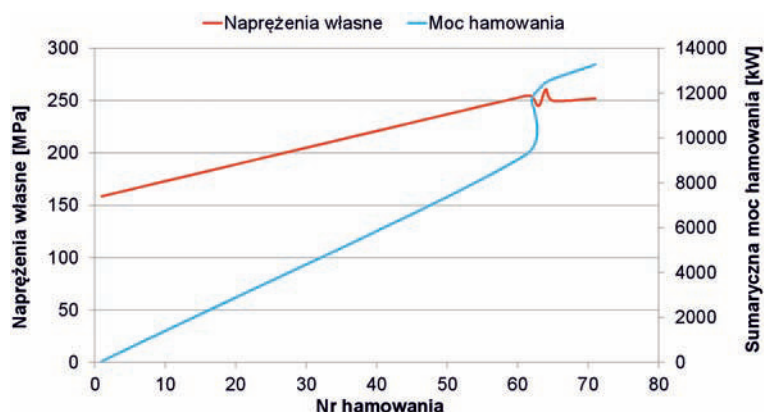
Podczas hamowania z dużych prędkości, hamowań ciągłych oraz przy dużych wartościach nacisków w układzie



Rys. 8. Przykładowe pęknięcia spowodowane naprężeniami własnymi (termicznymi), z widoczną strefą zmiany struktury materiału wieńca koła [fot. J. Kukulski]



Rys. 9. Miejsca i sektory pomiarowe naprężeń własnych [opracowanie własne]

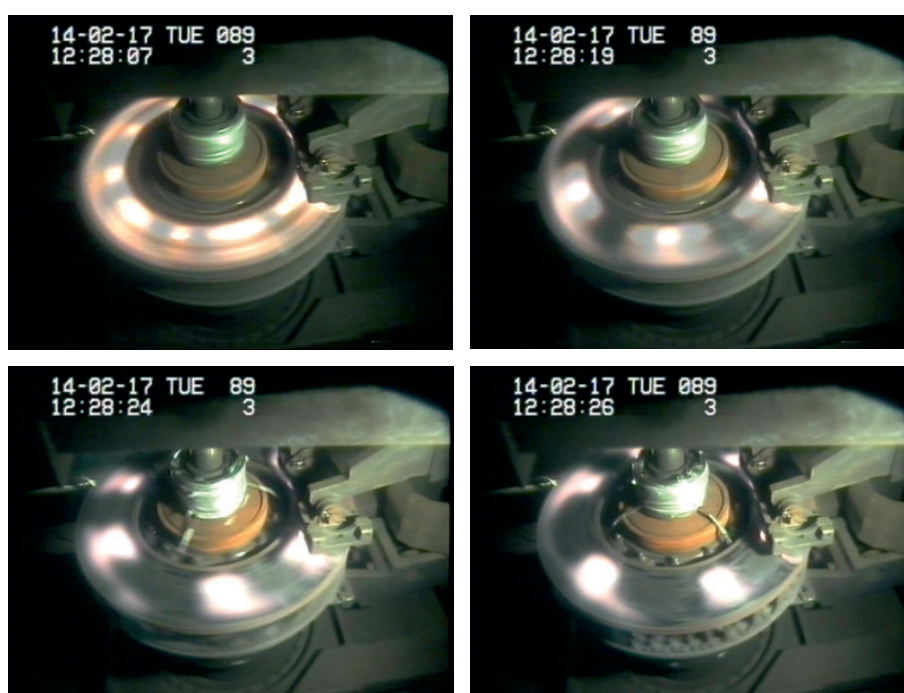


Rys. 10. Zmiany uśrednionych wartości naprężeń własnych, w wieńcu nowego koła w wyniku hamowań badawczych, zmierzone metodą ultradźwiękową [opracowanie własne]

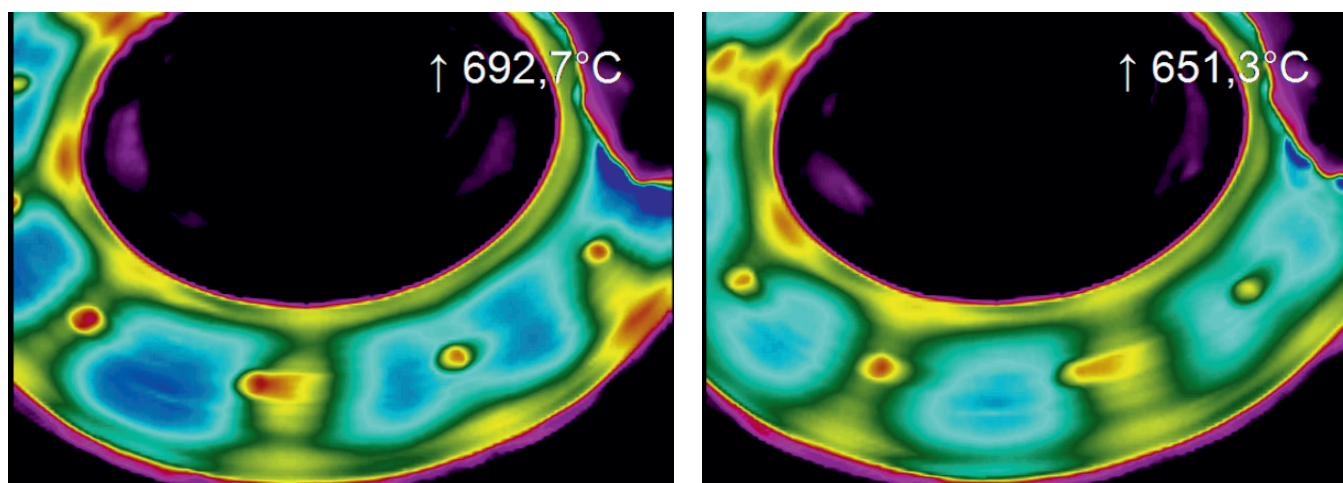
hamulcowym, w jego elementach ciernych generuje się ciepło, które negatywnie wpływa na zmiękczenie oraz nadtapianie materiałów na powierzchniach styku elementów ciernych. Generuje to wzrost odkształceń termicznych oraz nacisków jednostkowych. W obszarze kontaktu między wstawką i tarczą hamulcową powstają sploty powierzchniowych ścieżek, w których odłamki materiału przemieszczają się, zmniejszając rozmiary i w konsekwencji utworzą gorące obszary i punkty. Jednym z negatywnych zjawisk towarzyszących powstawaniu gorących punktów i obszarów, są przegrzania termiczne materiałów elementów ciernych w miejscach ich występowania. Generowanie takich obszarów jest uważane za jeden z głównych mechanizmów degradacji tarcz hamulcowych oraz destabilizujących proces hamowania. Gorące obszary na powierzchni ciernej tarczy ha-

mulcowej są znacznym problemem rozpoznany w transporcie samochodowym, jednak równie często takie zjawiska uwidaczniają się podczas badań kolejowych. Na rysunkach 11 i 12 pokazano obrazy wizyjne i zdjęcia z kamery termowizyjnej, przedstawiające pojawianie się gorących obszarów na powierzchni ciernej tarcz hamulcowych.

Podobne zjawiska można coraz częściej zauważyć również na powierzchni tocznej kół kolejowych (rys. 13). Są one mniej rozpoznane niż ma to miejsce w przypadku tarcz hamulcowych pojazdów samochodowych lub kolejowych. Zjawiska te mogą wynikać m.in. z coraz szerszego zastosowania wstawek organicznych typu K lub LL w nowych wagonach towarowych. Pojawienie się gorących obszarów może być przyczyną intensywnego obciążenia termicznego koła, np.: przy awarii hamulca lub hamowaniu ciągłym.



Rys. 11. Widok w końcowym etapie hamowania z dużych prędkości 385 km/h różnych klas gorących obszarów na tarczy hamulcowej montowanej na osi [fot. J. Kukulski]



Rys. 12. Rozkład temperatury w końcowym etapie hamowania z prędkości 385 km/h na tarczy hamulcowej montowanej na kole [opracowanie własne]



Rys. 13. Widok gorących obszarów na powierzchni tocznej koła monoblokowego [fot. J. Kukulski]

4. Podsumowanie

Przedstawione w artykule zagadnienia, dotyczące badania par ciernych hamulca są interesujące z punktu widzenia bezpieczeństwa i zjawisk pojawiających się podczas tych badań. Wykorzystanie stanowiska dynamometrycznego, będącego na wyposażeniu Instytutu Kolejnictwa, jest dodatkowym atutem do uzyskania zamieszczonych w artykule wyników badań. Rozszerzenia badań o nowe narzędzia i techniki pomiarowe umożliwi poznanie przyczyn uszkodzeń par ciernych hamulca kolejowego. Celowe jest kontynuowanie badań doświadczalnych, rozszerzonych również o metody symulacyjne, umożliwiające obserwację zachowania się obiektów przy innych obciążeniach, co jednocześnie umożliwi sprawdzenie np. założeń teoretycznych, które później można zweryfikować doświadczalnie.

Bibliografia

1. Badanie zmian naprężeń własnych w wieńcu kół monoblokowych. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa, Warszawa, 1987.
2. Badanie zmian wielkości i rozkładu naprężeń własnych (reszkowych) w szynach kolejowych wskutek symulowanych obciążeń tocznych. Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, temat 1113/11, Warszawa, 1992.
3. Badanie zmian wielkości i rozkładu naprężeń własnych szyn kolejowych wskutek symulowanych obciążeń tocznych. Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, temat 8036/26, Warszawa, 1996.
4. Deputat J.: *Naprężenia własne i pękanie kół monoblokowych*. Problemy Kolejnictwa, 1992, z. 110, s. 5–40.
5. Deputat J.: *Nieniszczące badania własności materiałów*. Wydawnictwo Biuro Gamma. Warszawa, 1997, s. 1–121.
6. ERA/TD/2013-02/INT ver. 3.0 – Friction elements for wheel tread brakes For freight wagons. 27-11-2015.
7. <https://www.nakolei.pl/22-rocznica-najwiekszej-katastrofy-kolejowej-w-powojennych-niemczech/>.
8. Kukulski J., Garlikowski P., Chlebek D.: *Dynamometer tests of wheel according to the program test specification A6Z00039812483*. Instytut Kolejnictwa, Report No. LW/57.07/16, Warszawa, 2016.
9. Opracowanie metodyki i wykonanie pomiarów tensometrycznych dla ustalenia naprężeń własnych w wieńcach kół monoblokowych produkcji francuskiej. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa, temat 3753/11, Warszawa, 1987.
10. PN-EN 13979-1+A2:2011: Kolejnictwo – Zestawy kołowe i wózki – Koła monoblokowe – Procedura dopuszczenia – Część 1: Koła kute i walcowane.
11. PN-EN 14535-3:2016-02: Railway application – Brake discs for railway rolling stock – Part 3: Brake discs, performance of the disc and the friction couple, classification.

12. PN-EN 15328: Railway applications – Braking – Brake pads, July 2020.
13. PN-EN 16452:2015-08: Railway applications – Braking – Brake blocks.
14. Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/924 z dnia 8 czerwca 2015 r. zmieniające rozporządzenie (UE) nr 321/2013 dotyczące technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – wagony towarowe” systemu kolei w Unii Europejskiej. Dz.Urz. UE L150/10 z 1.6.2015.
15. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej. Dz.Urz. UE L356/ 228 z 12.12.2014.
16. Sprawdzenie przydatności metody ultradźwiękowej do pomiaru naprężeń własnych w wieńcach kół monoblo-
kowych. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa, temat 3724/11, Warszawa, 1987.
17. UIC 510-5 – Technical approval of monoblock wheels – Application document for standard. May 2007.
18. UIC 541-3 – Brakes – Disc brakes and their application – General conditions for the certification of brake pads. 8th edition, April 2017.
19. UIC 541-4 – Brakes – Brakes with composite brake blocks – General conditions for certification of composite brake blocks – 5th edition, January 2017.
20. Zbadanie możliwości pomiarów przyrządem DEBRO 20, naprężeń własnych w wieńcach kół monoblokowych ze stali o podwyższonej zawartości węgla. Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, temat 1095/31, Warszawa, 1993.