

Analizy numeryczne oraz badania nowej segmentowej tarczy hamulcowej mocowanej do koła zestawu kołowego

Wojciech SAWCZUK¹, Mateusz JÜNGST²

Streszczenie

W elektrycznych zespołach trakcyjnych, ze względu na występowanie napędnych zestawów kołowych, tarcze hamulcowe są montowane do kół zestawów kołowych. Mimo, że hamowanie pojazdu jest wykonywane głównie za pomocą hamulca elektrodynamicznego, to w zależności od zastosowanego typu hamowania, w niektórych fazach hamowania dodatkowo jest używany hamulec cierny. W eksploatacji napędnych zestawów kołowych zużycie powierzchni ciernej tarczy do granicznego wymiaru następuje szybciej niż zużycie wieńca koła. Wskutek tego, podczas wymiany tarcz pełnych konieczne jest wyciskanie kół z osi zestawu kołowego, montaż tarcz i ponowne wciskanie kół na oś. Ze względu na zarysowanie powierzchni osi, czynności wyciśnięcia i ponownego wciśnięcia koła nie mogą być wykonywane wielokrotnie. Z tego powodu producenci tarcz hamulcowych proponują tarcze dzielone, które umożliwiają ich montaż bez wyciskania koła z osi zestawu kołowego. Tym samym nie ma potrzeby wywiązywania zestawu kołowego z ramy wózka.

W artykule zaprezentowano konstrukcję nowej segmentowej tarczy hamulcowej, po badaniach przeprowadzonych według polskich norm na bezwładnościowym stanowisku hamulcowym do badań kolejowych hamulców tarczowych i klocekowych. Zaproponowano również nową technologię jej wykonania. Większość tarcz hamulcowych jest wytwarzana przez odlewanie i wykańczającą obróbkę skrawania. Prototyp opisanej w artykule tarczy hamulcowej wykonano przez spawanie elementów wentylujących z płytą cierną tarczy. Zaproponowana tarcza hamulcowa powstała w wyniku realizacji projektu LIDER V, finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w Warszawie.

Słowa kluczowe: hamulec tarczowy, tarcza dzielona, elektryczny zespół trakcyjny

1. Wprowadzenie

We wszystkich pojazdach szynowych, z wyjątkiem wagonów towarowych, hamulec tarczowy jest podstawowym (zasadniczym) hamulcem ciernym (rys. 1). Jedynie w pojazdach trakcyjnych (lokomotywach), w elektrycznych zespołach trakcyjnych lub w tramwajach hamulec tarczowy współpracuje z hamulcem elektrodynamicznym (ED). Wówczas silniki trakcyjne, znajdujące się przy napędnych zestawach kołowych pracują jak prądnice i wytwarzają dodatkowy opór, oddając część energii elektrycznej do sieci trakcyjnej [5]. Ze względu na niską skuteczność hamulca ED w ostatniej fazie hamowania, przy prędkości około 10 km/h, uruchamiane są pneumatycznie (PN) lub elektropneumatycznie (EP) hamulce cierne tarczowe. W zależności od zastosowanego sposobu hamowania, np. w czasie hamowania nagłego,

w przypadku niewystarczającej siły hamującej hamulca elektrodynamicznego, może być również włączony hamulec cierny. Jednoczesne użycie dwóch hamulców w celu podniesienia skuteczności procesu hamowania nazywane jest „blendingiem” [5]. Taki rodzaj pracy hamulca ciernego powoduje powstanie innych problemów w eksploatacji hamulca tarczowego. Ze względu na krótki czas jego działania (kilka sekund), para cierna tarcza – okładzina pracuje w znacznie niższych temperaturach, co wydłuża czas docierania okładzin względem tarczy, a w konsekwencji wpływa na obniżenie skuteczności hamowania. Pod okładziną tworzą się osady (nalepy), powstałe z produktów zużycia oraz zanieczyszczeń występujących na elementach pary ciernej. Podczas hamowań zatrzymujących z udziałem tylko hamulca tarczowego, okładzina cierna zostaje oczyszczona z zanieczyszczeń i w konsekwencji jest dociskana większą powierzchnią do

¹ Dr inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu; e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl.

² Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, mateusz.m.jungst@doctorate.put.poznan.pl.

tarczy hamulcowej. Z tego względu, na etapie dopuszczenia pary ciernej do eksploatacji w konkretnym pojeździe, wskazane są dodatkowe próby na stanowisku hamulcowym z prędkościami, przy których hamulec tarczowy będzie uruchamiany.

Osobnym zagadnieniem związanym z tarczami hamulcowymi dla lokomotyw lub elektrycznych zespołów trakcyjnych, jest ich szybsze zużycie względem wieńca (profilu obręczy) kół, do których z dwóch stron są zamocowane tarcze. W konsekwencji wymusza to demontaż zestawu kołowego z ramy wózka oraz wyciskanie kół z osi. Ze względu na typ połączenia koła wciskanego na zimno na oś, czynność ta nie może być wykonywana wielokrotnie. Już podczas wciskania koła dochodzi do zarysowania powierzchni osi oraz podpięcia koła. Z praktyki zakładów naprawczych zajmujących się naprawami zestawów kołowych wynika, że możliwe jest tylko dwukrotne wyciskanie koła z osi zestawu kołowego w celu wymiany pełnych (monoblokowych) tarcz hamulcowych. Przy kolejnej (trzeciej) wymianie tarcz hamulcowych konieczny jest zakup nowych kół. Do granicznego zużycia grubości powierzchni ciernej (wynoszącego około 5 mm), zarówno tarcze, jak i wieńce kół monoblokowych są przetwarzane na tokarkach podtorowych, co nie wymusza demontażu zestawu kołowego z ramy wózka.

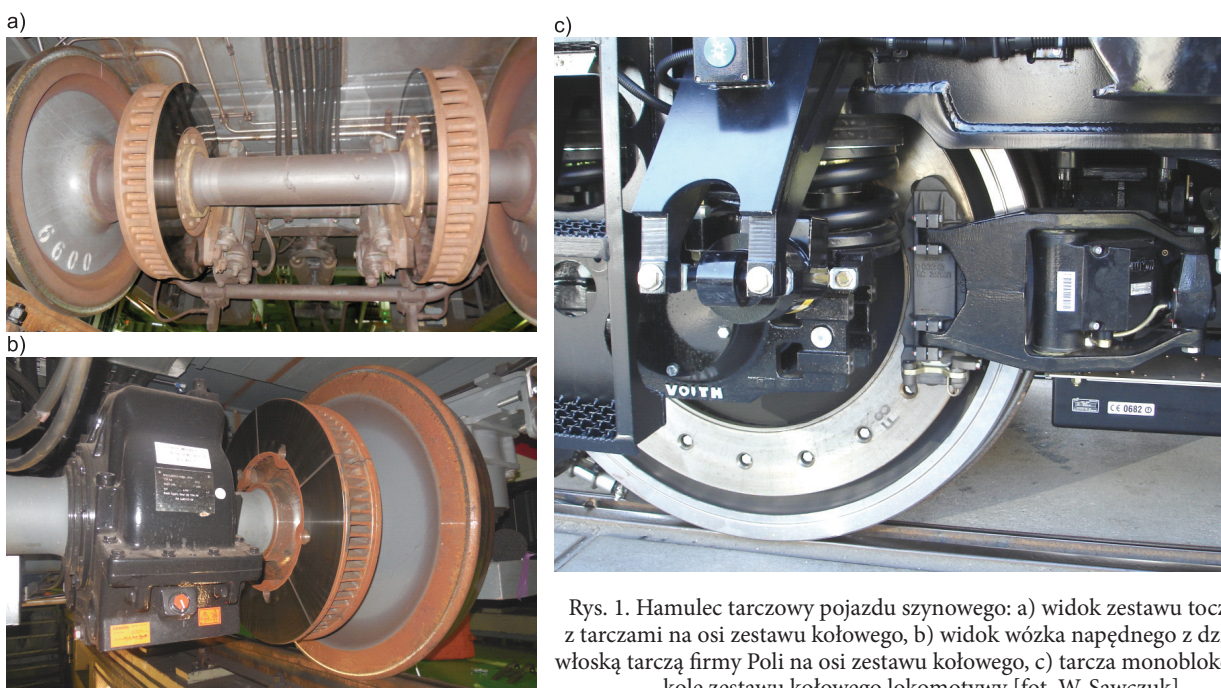
Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji segmentowej tarczy hamulcowej mocowanej do kół zestawów kołowych, po pierwszych badaniach na stanowisku bezwładnościowym według programu zawartego w normie PN-EN 14535-3. W przeciwieństwie do

tarcz odlewanych, badana tarcza hamulcowa została wykonana w technologii spawania płyty ciernej z elementami wentylującymi.

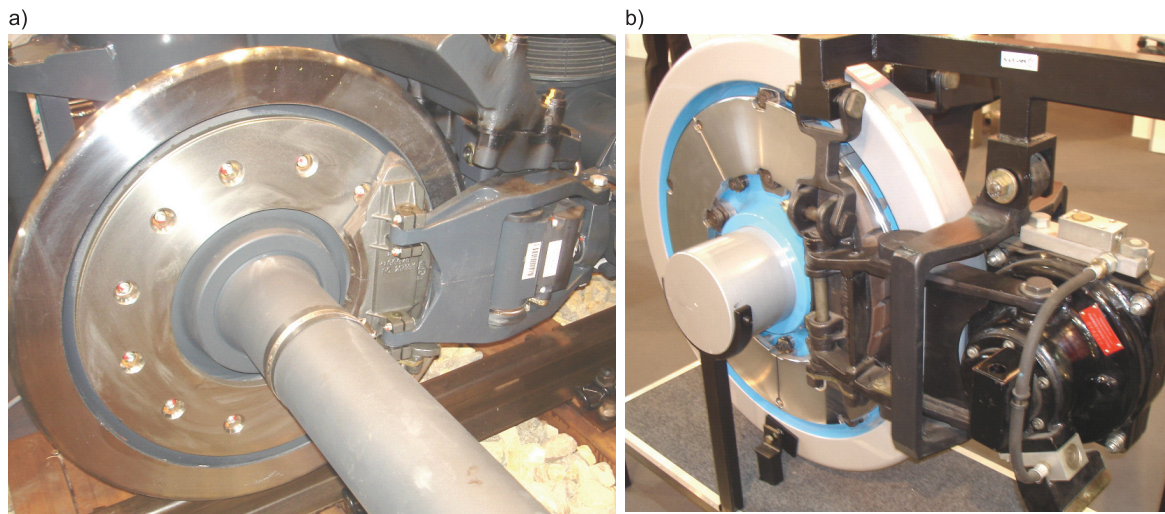
2. Tarcze hamulcowe na koła zestawu kołowego

Do pojazdów szynowych z napędzonymi zestawami kołowymi, ze względu na zabudowę przekładnią napędową przestrzeni między kołami, nie zawsze jest możliwe zamocowanie tarcz hamulcowych na osi. Dodatkowo, umieszczenie silników trakcyjnych przed lub za zestawem kołowym, w wielu konstrukcjach pojazdów szynowych uniemożliwia zastosowanie standardowych tarcz, przeznaczonych do wciśnięcia na oś zestawu kołowego. Wówczas konieczne jest zamocowanie tarcz hamulcowych bezpośrednio na kołach, co w szczególności obserwuje się w przypadku elektrycznych i spalinowych zespołów trakcyjnych oraz w lokomotywach. Stosowane w pojazdach szynowych tarcze do kół mogą być pełne (monolityczne) oraz dzielone (segmentowe), umożliwiające zarówno ich montaż, jak i demontaż w przypadku szybszego zużycia względem koła. Na rysunku 2 przedstawiono niektóre konstrukcje tarcz hamulcowych do kół zestawów kołowych.

Większość konstrukcji tarcz hamulcowych montowanych do koła, to odlewy żeliwne lub stalowe z dodatkową przestrzenią wentylacyjną. Ze względu na sposób wentylacji, rozróżnia się tarcze z wentylujący-



Rys. 1. Hamulec tarczowy pojazdu szynowego: a) widok zestawu tocznego z tarczami na osi zestawu kołowego, b) widok wózka napędzonego z dzieloną włoską tarczą firmy Poli na osi zestawu kołowego, c) tarcza monoblokowa na kole zestawu kołowego lokomotywy [fot. W. Sawczuk]



Rys. 2. Tarcze hamulcowe do kół: a) pełna (monolityczna) do tocznego zestawu kołowego, b) dzielona (segmentowa) włoskiej firmy Poli [fot. W. Sawczuk]

mi łopatkami lub prętami, co przedstawia rysunek 3. W niektórych konstrukcjach tarcz, jak przedstawionej na rysunku 3c), również mogą wystąpić zarówno wentylujące łopatki, jak i pręty.

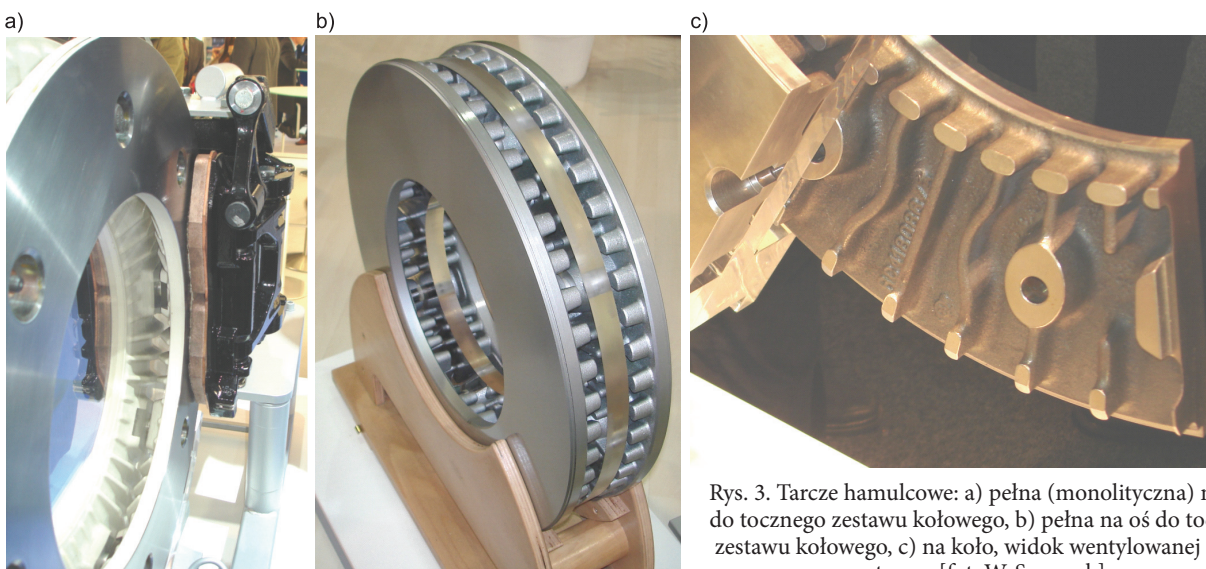
O wyborze sposobu wentylacji decyduje przeznaczenie tarczy hamulcowej. W przypadku pojazdów charakteryzujących się częstymi zatrzymaniami, jak np. pociągi pasażerskie stosuje się tarcze z wentylującymi łopatkami, które są technologicznie łatwiejsze w wykonaniu w porównaniu do tarcz z wentylującymi prętami. W pojazdach kursujących z większymi prędkościami, powyżej 160 km/h, stosuje się wentylację prętową ze względu na mniejsze straty spowodowane wentylacją w porównaniu z tarczami łopatkowymi. W pojazdach dużych prędkości, elementy wentylacyjne o przekroju eliptycznym są ustawione obwodowo,

co w dużym stopniu ogranicza przepływ powietrza opływającego tarczę, a tym samym zmniejsza straty z powodu wymuszonej wentylacji.

3. Koncepcja nowej tarczy hamulcowej

Na podstawie literatury dotyczącej tarczowych układów hamulcowych, sposobu ich wytwarzania oraz informacji zebranych z eksploatacji tarcz hamulcowych montowanych do koła zestawu kołowego, opracowano koncepcję nowej tarczy segmentowej. Koncepcję tę oparto na trzech kryteriach: technologicznym, konstrukcyjnym i eksploatacyjnym.

W większości przypadków, wentylowane tarcze hamulcowe są odlewami stalowymi lub żeliwnymi,



Rys. 3. Tarcze hamulcowe: a) pełna (monolityczna) na koło do tocznego zestawu kołowego, b) pełna na oś do tocznego zestawu kołowego, c) na koło, widok wentylowanej strony tarczy [fot. W. Sawczuk]

poddany dalszej obróbce wykończającej na gotowy wymiar. Jest to związane z produkcją seryjną tarcz hamulcowych, a liczba odlewów tarcz najczęściej wynika z pojemności pieca do odlewania. Ze względu na duży koszt tarczy hamulcowej, producent wymaga zamówienia większej liczby tarcz i zastrzega długi czas oczekiwania na wyrób. Zamówienie pojedynczych sztuk jest utrudnione, gdyż producent nie tworzy zasobów magazynowych przy zamówieniu mniejszej liczby tarcz hamulcowych. Na rysunku 4 przedstawiono wybrane etapy procesu produkcji odlewanych tarcz hamulcowych.

Z przedstawionych powodów, w nowej koncepcji tarczy hamulcowej zaproponowano jej wytworzenie przez spawanie pierścienia ciernego, wykonanego z płyty z elementami wentylującymi o przekroju okrągłym.

Drugie kryterium, dotyczące konstrukcji tarczy, zakłada wykonanie jej jako dzielonej – podzielonej na trzy segmenty. Umożliwi to demontaż tarczy, uszkodzonej przez pęknięcia powierzchniowe lub przekroczenie dopuszczalnego granicznego zużycia liniowego tarczy, bez wywiązywania zestawu kołowego z ramy wózka.

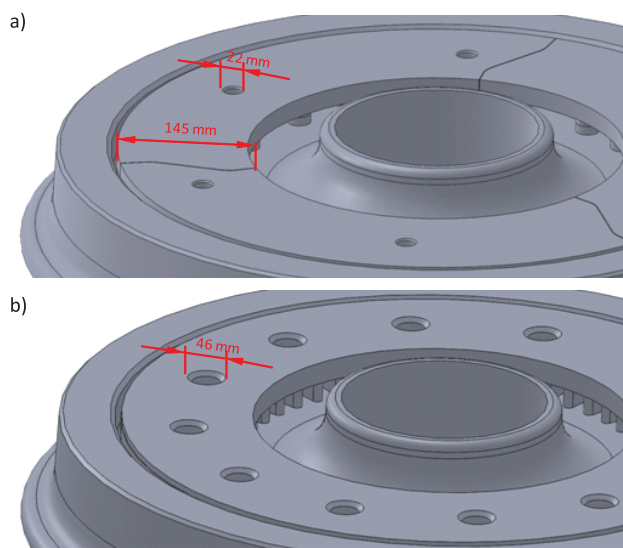
Trzecie kryterium, dotyczące eksploatacji, zakłada wykonanie tarczy z segmentami niezależnymi. Wówczas zarówno montaż, jak i demontaż tarczy z koła, będzie mógł wykonać jeden pracownik zaplecza technicznego. Tarcze segmentowe, w których poszczególne części są najpierw łączone ze sobą w pierścień cierny, a następnie mocowane jako złożenie do tarczy koła, ze względu na swoją masę (około 75 kg) wymagają pracy dwóch osób. W tarczach z segmen-



Rys. 4. Wybrane etapy z produkcji segmentowej tarczy hamulcowej BK 141 mocowanej na osi zestawu kołowego: a), b) odlewy segmentów tarczy dzielonej przed obróbką skrawaniem, c) segmenty tarczy zamocowane na tokarce karuzelowej, d) segmenty na stole tokarki karuzelowej ze wstępnie obrobioną powierzchnią cierną, e) piasta hamulcowa z obrobionymi powierzchniami przed wierceniem otworów montażowych, f) montaż segmentów do piasty hamulcowej za pomocą sworzni, g) zmontowane dwie tarcze hamulcowe [fot. W. Sawczuk]

tami niezależnymi, pracownik montuje poszczególne części bezpośrednio na kole. Podział na trzy segmenty o masie około 20–25 kg umożliwi montaż przez jedną osobę i nie wpłynie istotnie na przyrost zużycia materiału ciernego przy każdym obrocie koła w czasie hamowania [1]. Na rysunku 5 przedstawiono widok modeli dwóch tarcz: segmentowej z podziałem na trzy segmenty oraz tarczy pełnej.

Tarcza pełna (produkcji firmy Kovis) ma 12 otworów o średnicy 32 mm wraz z fazowaniem 7 mm pod śruby M12. Całkowita długość krawędzi tnącej wynosi 555 mm dla wszystkich otworów mocujących (rys. 5b). W tarczy segmentowej (rys. 5a), zaproponowano podział na trzy segmenty oraz rezygnację z 6 otworów pod śruby M12. W miejscach, w których zrezygnowano z otworów na tarczy, śruby są wkręcane w gwintowane pręty wewnętrznej strony tarczy z drugiej strony koła. W proponowanym rozwiązaniu zrezygnowano z otworów przelotowych dla śrub zabezpieczonych na końcach nakrętkami. Śruby M12 są wkręcane w otwory gwintowane segmentów z drugiej strony koła. Przy rezygnacji z 6 otworów pod śruby M12 (średnica 22 mm z fazowaniem 2 mm) oraz przy 3 segmentach (3 krawędzie tnące o szerokości 145 mm), całkowita długość krawędzi tnącej wynosi 567 mm i jest tylko o 12 mm większa w stosunku do tarczy pełnej. Na tej podstawie można stwierdzić, że trzysegmentowa tarcza z nieprzelotowymi śrubami na drugą stronę koła będzie cechować się podobnym zużyciem materiału ciernego, jak tarcza pełna.



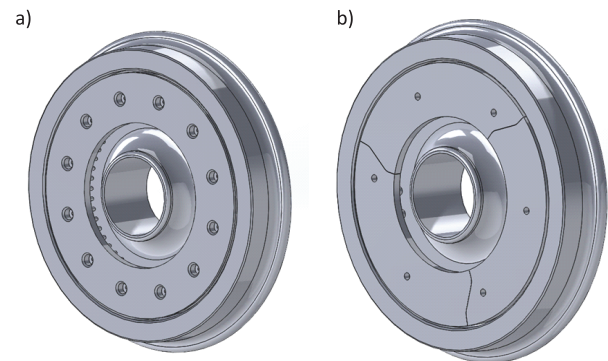
Rys. 5. Widok pierścieni wraz z szerokością krawędzi tnących wpływających na zużycie okładzin ciernych na przykładzie tarczy: a) segmentowej (dzielonej), b) monolitycznej (pełnej) [opracowanie własne]

W tarczach hamulcowych dzielonych innych producentów, spotyka się podział pierścienia ciernego na 2, 4, 5 i więcej segmentów w zależności od średnicy tarczy. Na-

leży jednak podkreślić, że podział tarczy na więcej niż 3 segmenty będzie wpływał na istotny przyrost zużycia materiału ciernego, co jest niekorzystne dla późniejszej eksploatacji pary cierniej hamulca tarczowego.

4. Analizy numeryczne tarcz hamulcowych

Przed wykonaniem prototypu, proponowana segmentowa tarcza hamulcowa została zamodelowana w środowisku SolidWorks 2016. Przeprowadzono analizy numeryczne w zakresie wyznaczenia rozkładów temperatury, naprężeń oraz odkształceń tarczy. Model zamocowanych segmentów na kole w odniesieniu do monolitycznej (pełnej) tarczy przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Model tarczy na koło, wykonany w środowisku SolidWorks2016: a) tarcza monolityczna (pełna), b) segmentowa (dzielona) bez śrub mocujących [opracowanie własne]

Analizy numeryczne przeprowadzono dla przypadku hamowania elektrycznego zespołu trakcyjnego PESA Elf 22WE (EN76) z prędkości 160 km/h do zatrzymania. Wartość strumienia ciepła, działającego na tarczy podczas procedury hamowania zostały obliczone na podstawie danych zawartych w tabelicy 1.

Tablica 1

Dane do obliczenia strumienia ciepła działającego na powierzchni tarczy hamulcowej [1]

Parametr	Wartość
Masa pojazdu szynowego (EN76 22WE) – M [kg]	135000
Prędkość początkowa pojazdu – v_0 [m/s]	44,4
Promień tarczy hamulcowej – r_d [m]	0,355
Promień koła pojazdu szynowego – r_w [m]	0,445
Czas hamowania – t_s [s]	37*
Opóźnienie hamowania – a [m/s ²]	1,2
Stosunek rozdziału siły hamowania – P	0,1
Średnica zewnętrzna tarczy hamulcowej – D_z [m]	0,72
Średnica wewnętrzna tarczy hamulcowej – D_w [m]	0,42

* Czas hamowania wyznaczony z pomiaru na stanowisku hamulcowym

Siłę hamowania działającą na tarczę hamulcową pojazdu szynowego wyznaczono z zależności (1) [6]:

$$F_{DISC} = \frac{\frac{1}{2} \cdot P \cdot M \cdot v_0^2}{2 \cdot \frac{r_d}{r_w} \cdot \left(v_0 \cdot t_z - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_z^2 \right)} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 135000 \cdot 44,4^2}{2 \cdot \frac{0,355}{0,455} \cdot \left(44,4 \cdot 37 - \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 37^2 \right)} = 10383,4 \text{ N} \quad (1)$$

Powierzchnię cierną tarczy hamulcowej obliczono na podstawie zależności (2):

$$A = \frac{\pi \cdot D_z^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_w^2}{4} = 0,407 - 0,0139 = 0,269 \text{ m}^2 \quad (2)$$

Strumień ciepła działający na jedną stronę tarczy zgodnie z [6] określa zależność (3).

$$Q(t) = F_{disc} \cdot v_{disc}(t) = F_{disc} \cdot \frac{r_{disc}}{r_{wheel}} \cdot (v_0 - a \cdot t) = 359640 - 9720(t) \text{ W} \quad (3)$$

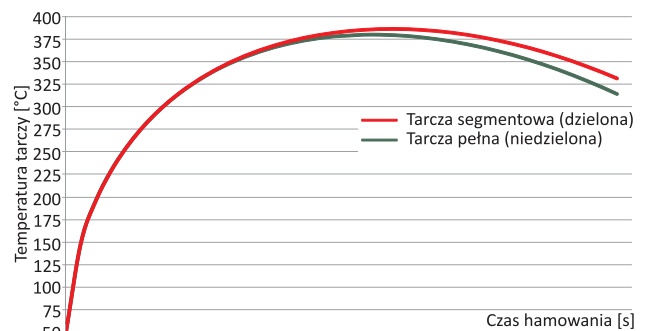
Gęstość strumienia ciepła przedstawia zależność (4) [6]:

$$q = \frac{Q(t)}{A} = \frac{359640}{0,269} = 1338911,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ dla } t=0 \text{ s} \quad (4)$$

Wykorzystując zależności (1)–(4) przeprowadzono symulacje numeryczne rozkładu temperatury na

tarczach hamulcowych w czasie hamowania. Na rysunku 7 przedstawiono obrazy rozkładu temperatury tarcz hamulcowych po symulacji hamowania zatrzymującego dla wybranych chwil czasowych.

Dla każdej chwili czasowej hamowania po symulacji określano wartość maksymalnej temperatury tarczy. Na tej podstawie sporządzono charakterystykę przyrostu temperatury tarcz (pełnej oraz segmentowej) w czasie symulowanego hamowania trwającego 37 sekund (rys. 8).

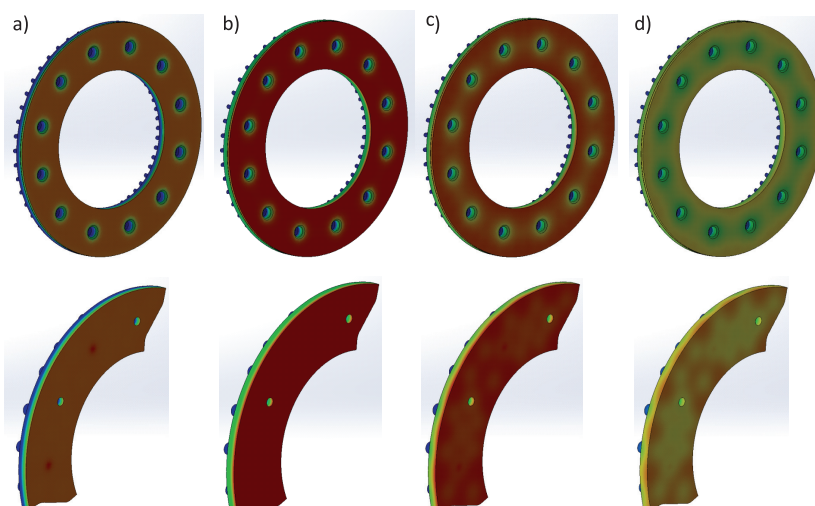


Rys. 8. Rozkład średniej temperatury tarcz hamulcowych po symulowanym hamowaniu awaryjnym z prędkości $v = 160 \text{ km/h}$ [opracowanie własne]

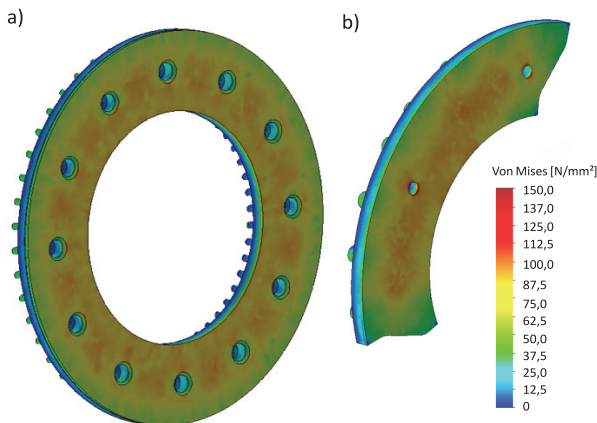
Do wyznaczenia momentu hamującego M_h działającego na tarczę podczas procesu hamowania przyjęto wartość średnią współczynnika tarcia, wynoszącą 0,35 zgodnie z wymaganiami karty UIC 541-3. Wartość momentu hamującego obliczono, wykorzystując zależność (5) [8]:

$$M_h = 2 \cdot \mu \cdot F_{disc} \cdot r_h = 2 \cdot 0,35 \cdot 10383,4 \cdot 0,285 = 2071,5 \text{ Nm} \quad (5)$$

Na rysunku 9 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych Misesa w tarczach hamulcowych.

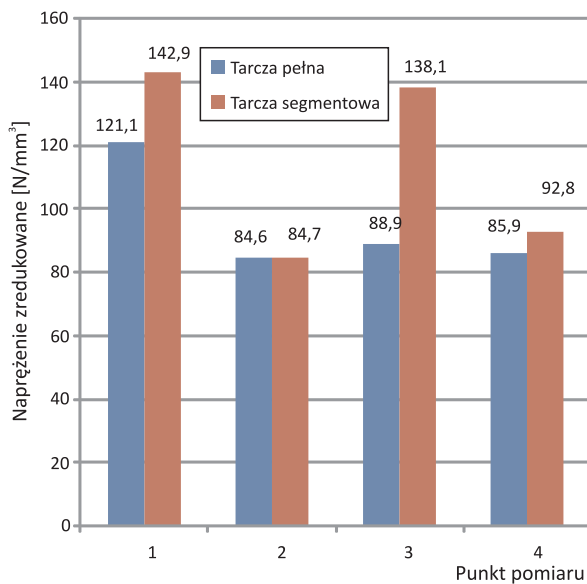


Rys. 7. Rozkład temperatury na tarczy pełnej (niebieskiej) oraz tarczy segmentowej (czerwonej) po symulowanym hamowaniu trwającym 37 sekund w chwili czasowej: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s, d) 37 s [opracowanie własne]



Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych Misesa w tarczach hamulcowych: a) standardowej (pełnej), b) segmentowej (dzielonej) [opracowanie własne]

W symulacji dokonano pomiaru wartości naprężeń w czterech miejscach na powierzchni tarczy ciernej, tj. na promieniu zewnętrznym, w części środkowej bez otworu mocującego, w części środkowej na krawędzi otworu mocującego oraz na promieniu wewnętrznym. Wyniki naprężeń zredukowanych zestawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 10.

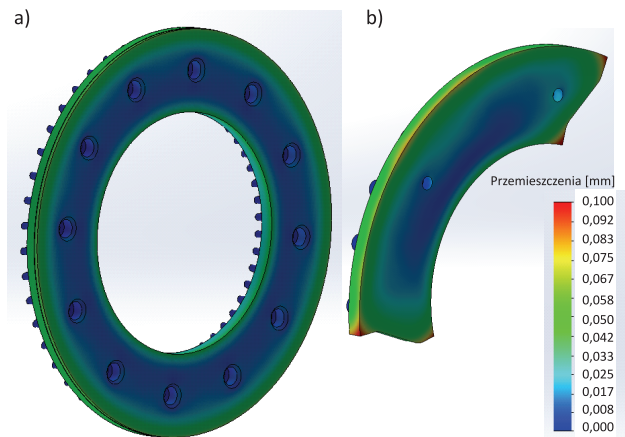


Rys. 10. Naprężenia zredukowane Misesa w punktach pomiarowych 1–4: 1) promień zewnętrzny tarczy, 2) część środkowa tarczy, 3) część środkowa tarczy na krawędzi otworu mocującego, 4) promień wewnętrzny tarczy [opracowanie własne]

Analiza rysunku 10 prowadzi do wniosku, że największe różnice naprężeń występują w części środkowej tarczy segmentowej przy krawędzi otworu mocującego względem tarczy pełnej. Jest to związane z małym wymiarem (2 mm) sfazowania krawędzi otworu. W tarczach pełnych występują sfazowania na

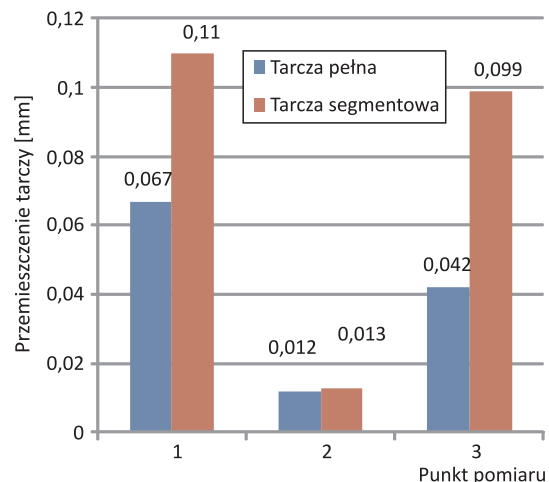
głębokości 5–7 mm, w zależności od producenta. Sfazowania na otworach z jednej strony redukują naprężenia na krawędzi, jednak z drugiej strony zwiększają średnicę otworu przy powierzchni ciernej, co wydłuża krawędź tnącą i wpływa na większe zużycie materiału ciernego.

Następnym etapem analiz numerycznych było sprawdzenie przemieszczeń (odkształceń) tarcz hamulcowych w wyniku działania strumienia ciepła oraz momentu hamującego. Wyniki przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Przemieszczenia tarczy hamulcowej: a) pełnej, b) segmentowej [opracowanie własne]

Zestawienie maksymalnych przemieszczeń (odkształceń) tarcz hamulcowych na promieniu zewnętrznym i wewnętrznym przedstawiono na rysunku 12. Należy podkreślić, że mimo większej wartości w przypadku tarczy segmentowej, nie są przekroczone odchyłki określone w normie PN-EN 14535-2 [3].

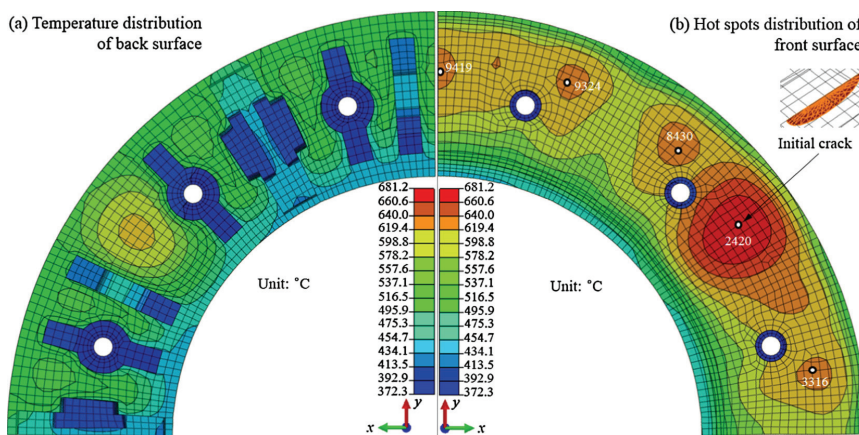


Rys. 12. Maksymalne wartości przemieszczenia tarcz hamulcowych w punktach 1–3: 1) na promieniu zewnętrznym, 2) w części środkowej, 3) na promieniu wewnętrznym [opracowanie własne]

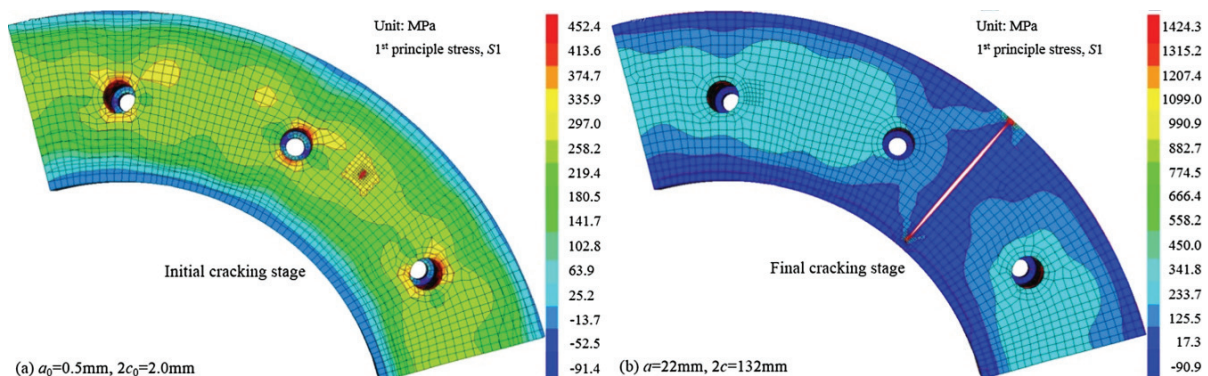
W obu rodzajach tarcz, największe odkształcenia występują na promieniu zewnętrznym i wynoszą odpowiednio 0,067 mm w tarczy pełnej oraz 0,11 mm w tarczy segmentowej. Należy podkreślić, że analizy numeryczne są niezbędne w procesie projektowania elementów układu hamulcowego przed badaniami stanowiskowymi lub eksploatacyjnymi (badaniami prototypu). W niektórych przypadkach, symulacje numeryczne są dodatkowo rozszerzone o analizy przepływu powietrza na zewnątrz i wewnątrz tarczy lub o analizy zmęczeniowe. Autorzy opracowania [10] podjęli ponadto próbę symulacji prognozy żywotności tarczy hamulcowej. Przeprowadzono analizę propagacji pojedynczego pęknięcia, powstałego w makroskopowym hotspocie na tarczy mocowanej do koła, które następnie wskutek kolejnych hamowań awaryjnych zwiększało długość oraz głębokość, dobrze korespondując z wynikami innych opracowań, wskazujących na eliptyczny kształt nieciągłości w pierścieniu ciernym. Na rysunku 13 przedstawiono rozkład temperatur szczytowych osiągniętych w trakcie hamowania awaryjnego z prędkości 400 km/h.

Stwierdza się, że wraz z propagacją pęknięcia, zmniejszają się naprężenia w pozostałej części pierścienia ciernego (rys. 14). Badania wykazały, że tempo propagacji pęknięcia wzrasta z upływem czasu: im dłuższe jest pęknięcie, tym większy jest jego przyrost przy kolejnych hamowaniach.

Z punktu widzenia zastosowań kolejowych, bardzo ważną publikacją jest opracowanie [9], ukierunkowane na zagadnienia dotyczące przepływu powietrza w kanałach wentylacyjnych tarczy i związanej z nim konwekcyjną wymianą ciepła. Autor podjął się opracowania nowej tarczy stanowiącej syntezę rozwiązań konstrukcyjnych innych tarcz dla kolejnictwa: zastosował rząd łopatek stycznych oraz następnie krótsze łopatki promieniowe bliżej środka tarczy. Kilka lat po zaprojektowaniu i testach eksperymentalnych, trójwymiarowy model tarczy poddano analizom CFD. Symulacja założyła obrót tarczy w ośrodku w stanie ustalonym (bez ruchu powietrza) przy prędkości 1500 obr/min. Na rysunku 15 przedstawiono rozkład lokalnego konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła na łopatkach i łącznikach dla tarczy rozgrzanej

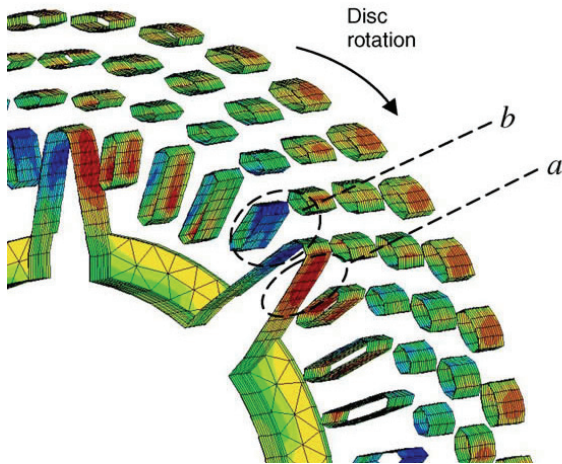


Rys. 13. Temperatury szczytowe stalowej tarczy hamulcowej mocowanej do koła: a) strona tylna pierścienia ciernego, b) strona przednia pierścienia ciernego [10]



Rys. 14. Rozkład naprężeń w pierścieniu ciernym tarczy hamulcowej: a) dla pęknięcia początkowego długości 2 mm, b) dla pęknięcia maksymalnego długości 132 mm [10]

do 200°C przy prędkości 1500 obr/min w ustalonym powietrzu o temperaturze 20°C.



Rys. 15. Rozkład konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła w kanałach tarczy [9]

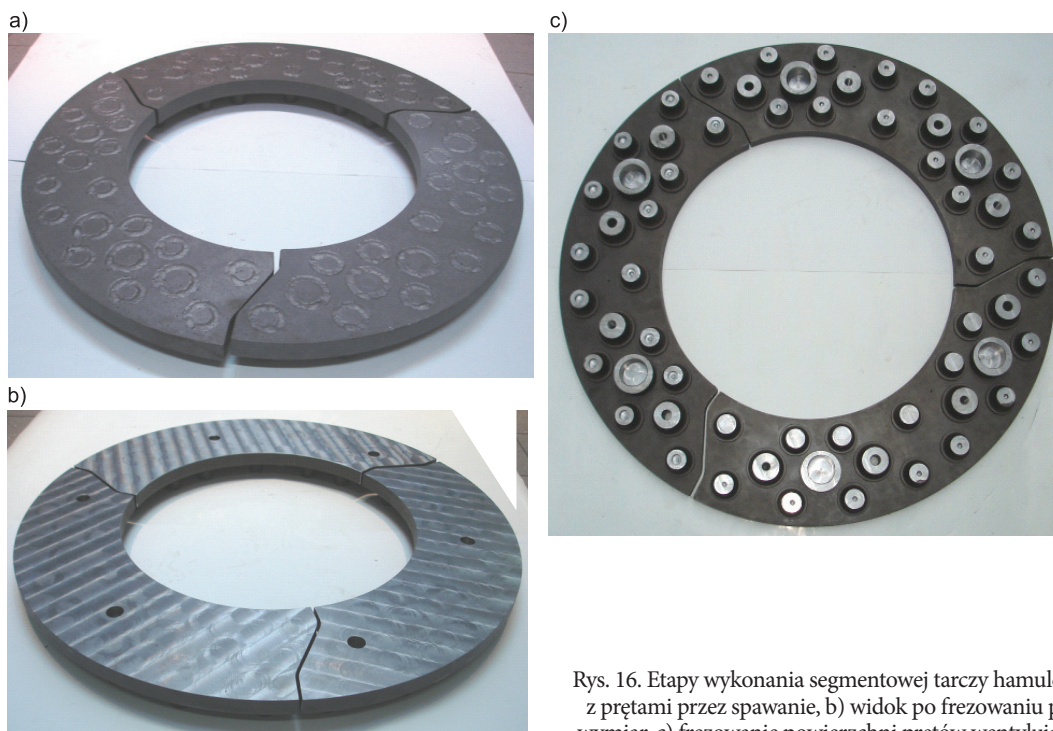
Wyniki jednoznacznie wskazały duże zmienności lokalne współczynnika. Najniższe wartości około 7 W/m² K (odpowiadające konwekcji naturalnej) odnotowano w miejscach zawirowań (obszar b). Najwyższe wartości rzędu 118 W/m² K odnotowano w obszarach o maksymalnej prędkości przepływu (obszar a). Należy podkreślić znaczenie całkowitego średniego współczynnika przenikania ciepła, ponieważ ta wartość pomnożona przez całkowity opływa-

ny obszar tarczy określa całkowitą konwekcyjną moc wyjściową (szybkość rozpraszania ciepła), przyjmowaną w obliczeniach projektowych [9].

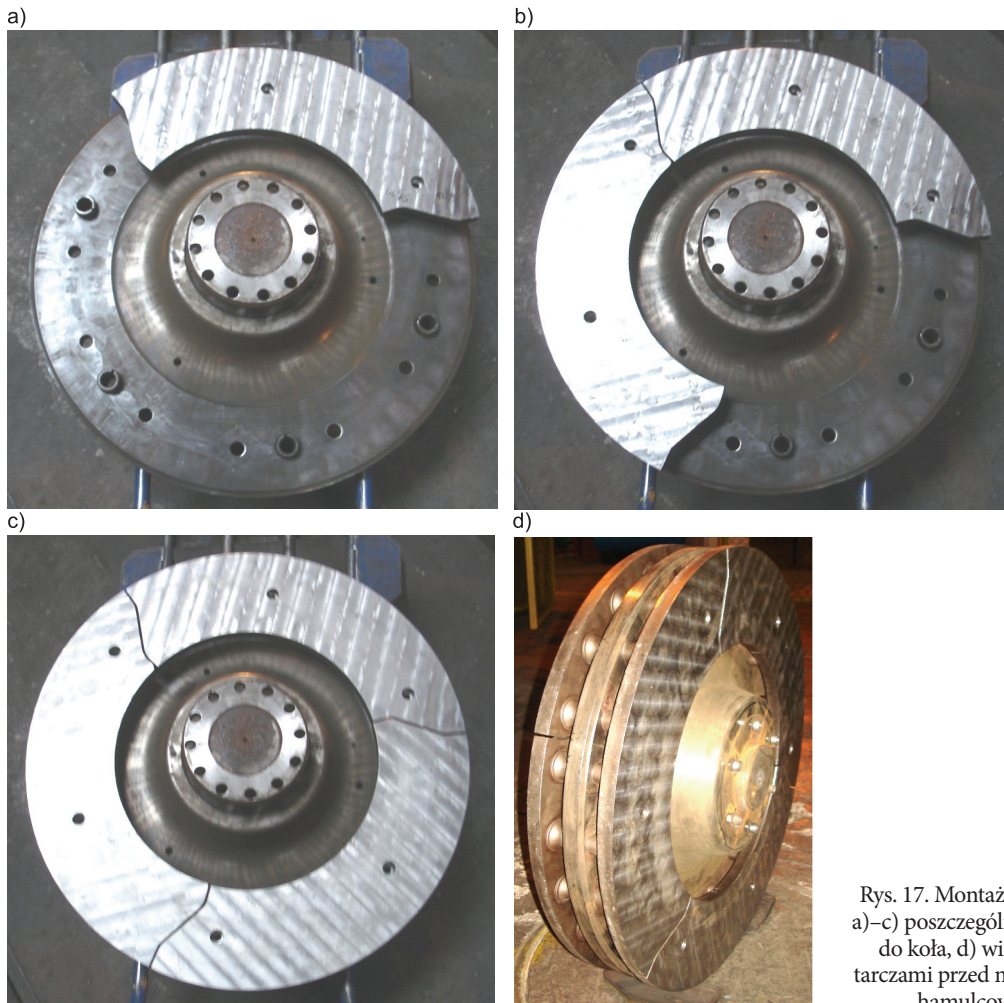
5. Wykonanie prototypu tarczy hamulcowej do badań stanowiskowych

Poszczególne segmenty tarczy hamulcowej do badań (6 sztuk) wykonano z płyty o grubości 25 mm ciętej laserowo na wymiar z naddatkiem na obróbkę wykańczającą do średnicy zewnętrznej i wewnętrznej tarczy po złożeniu wraz z otworami pod pręty wentylacyjne, montażowe oraz ustalające. Po połączeniu prętów z płytą, kolejną operacją było spawanie obwodowe płyt w fazowaniach prętów od strony powierzchni ciernej. W celu usunięcia naprężeń spawalniczych, segmenty poddano wyżarzaniu odprężającemu. Następnie końcową obróbką wykańczającą wykonano frezowanie powierzchni ciernej segmentów, powierzchni wewnętrznej styku segmentów z tarczą koła oraz otworów pod sworznie ustalające i pod śruby montażowe. Na rysunku 16 przedstawiono wybrane etapy budowy prototypu tarczy do badań cierno-mechanicznych na stanowisku hamulcowym.

Ostatnim etapem przed stanowiskowymi badaniami cierno-mechanicznymi był montaż sześciu termopar zgodnie z [3], po trzy na każdą stronę tarczy oraz złożenie segmentów tarczy na kole, co w kilku etapach przedstawia rysunek 17.



Rys. 16. Etapy wykonania segmentowej tarczy hamulcowej: a) łączenie tarczy z prętami przez spawanie, b) widok po frezowaniu powierzchni ciernej na wymiar, c) frezowanie powierzchni prętów wentylujących [fot. W. Sawczuk]



Rys. 17. Montaż tarczy segmentowej do koła: a)–c) poszczególne etapy montażu segmentów do koła, d) widok koła z zamocowanymi tarczami przed montażem na wale stanowiska hamulcowego [fot. W. Sawczuk]

6. Metodyka badań

Badania o charakterze cierno-mechanicznym (gdzie rejestrowano zmianę współczynnika tarcia oraz temperatury tarczy w czasie hamowania) przeprowadzono w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców klockowych i tarczowych pojazdów szynowych. Obiektem badań była tarcza segmentowa o średnicy zewnętrznej 720 mm z wentylującymi prętami, zamocowana na kole. Tarcza tworzyła parę tarczą z organicznymi okładzinami typu 200 FR20H.2 firmy Frenoplast.

Tarcza była przebadana zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN EN 14535-3 dla klasy badania typu B1, będącego odwzorowaniem hamowania występującego w elektrycznym zespole trakcyjnym pojazdu EN 76 22Wea (Pesa Elf). Jest to czterocłonowy pojazd o długości 72,25 m i masie służbowej 135 t, kursujący z maksymalną prędkością 160 km/h [1]. Parametry testu kwalifikacji badań tarczy hamulcowej wybranego pojazdu kolejowego przedstawiono

w tabeli 2. Na podstawie: prędkości maksymalnej pojazdu, dla którego tarcza jest badana, masie do wyhamowania przypadającej na jedną tarczę, stosując zapisy zawarte w tabeli 2, możliwe jest określenie klasy badania stanowiskowego.

Z normy [4] określa się procedurę badań hamowań dla zmniejszenia prędkości pojazdu. Pierwsze 10 przyhamowań dla klasy B1 wykonuje się z prędkości 160 do 140 km/h natomiast kolejne 10 przyhamowań z prędkości 110 do 95 km/h. Cały program badań składa się z 10 powtórzeń danego cyklu programu, zgodnie z tabelą 6 zawartą w [4]. Na test wytrzymałości tarczy składa się 1000 hamowań, w celu przyspieszenia wystąpienia zjawiska generowania pęknięć powierzchniowych na tarczy hamulcowej podczas hamowań awaryjnych z prędkości 160 km/h do 0, hamowań służbowych z prędkości 2/3 prędkości maksymalnej do 0 i przyhamowań z różnych prędkości. Założeniem testu opisanego w normie [4] jest sprawdzenie maksymalnej skuteczności badanej tarczy hamulcowej w przypadkach hamowań, zawartych w danej klasie hamowania.

Tablica 2

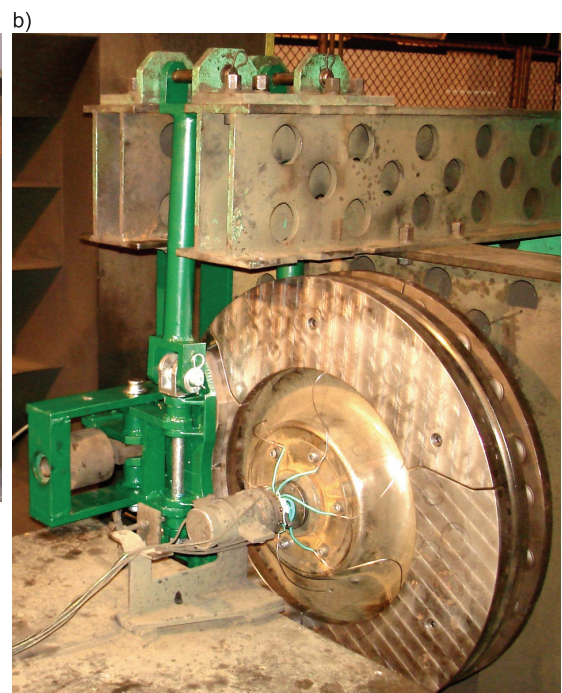
Parametry testu klasyfikacyjnego

Klasa	Maksymalna energia dla danej klasy W_b [MJ]	Maksymalna moc dla danej klasy P_m [kW]	Prędkość klasy v_m [km/h]	Masa do hamowania m [t]	Początkowa temperatura tarczy hamulcowej Θ_0 [°C]	Opóźnienie hamowania a_m [m/s ²]
A1	4,6	400	120	10	50–60	1,2
B1	7,9	427	160	8	50–60	1,2
B2	9,9	533	160	10	50–60	1,2
C1	12,3	533	200	8	50–60	1,2
C2	15,4	667	200	10	50–60	1,2
D1	20,5	472	250	8,5	50–60	0,8
E1	27,8	533	300	8	50–60	0,8
F1	23,6	389	350	5	50–60	0,8
F2	28,4	467	350	6	50–60	0,8
F3	33,1	544	350	7	50–60	0,8
G1	37	533	400	6	50–60	0,8

[Opracowanie własne].

Test wytrzymałości tarczy hamulcowej jest pierwszym badaniem wykonywanym zgodnie z normą PN EN 14535-3. Kolejnymi badaniami jest test rozpraszania ciepła, realizowany jako hamowanie ze stałą mocą (symulacja zjazdu pociągu ze wzniesienia w czasie 30 minut), test siły odśrodkowej, test strat energetycznych z tytułu wentylacji tarczy hamulco-

wej w czasie jej obrotu oraz test hałasu, generowanego przez parę cierną hamulca tarczowego. Dane zawarte w tablicach 1–3 są niezbędne do wpisania procedury badawczej stanowiska dynamometrycznego do badania hamulca tarczowego. Na rysunku 18 przedstawiono widok stanowiska od strony badanej tarczy hamulcowej z zamocowanym mechanizmem dźwigniowym.



Rys. 18a), b) Widok tarczy hamulcowej na stanowisku hamulcowym z mechanizmem dźwigniowym [fot. W. Sawczuk]

7. Wyniki badań

Podczas badań na stanowisku bezwładnościowym rejestrowano chwilową siłę nacisku na tarczę hamulcową oraz siłę styczną odniesioną do promienia hamowania w celu wyznaczenia chwilowego współczynnika tarcia zgodnie z zależnością (6) [2]:

$$\mu_a = \frac{F_t}{F_b} \quad (6)$$

gdzie:

- F_t – chwilowa siła styczna odniesiona do promienia hamowania r ,
- F_b – całkowita chwilowa siła nacisku na tarczę hamulcową.

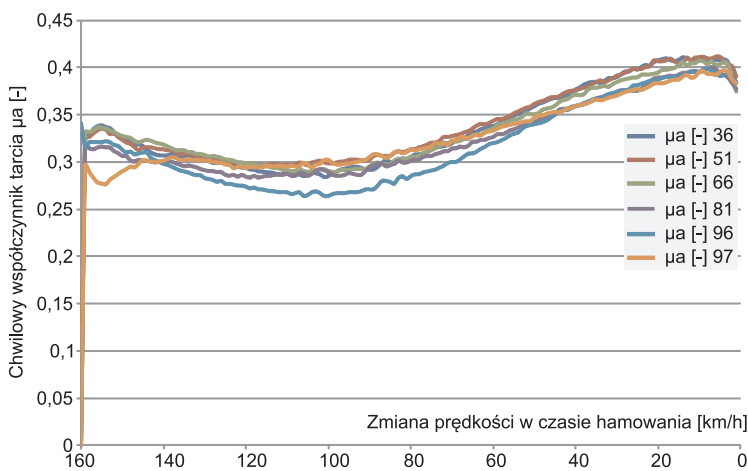
Na podstawie wyznaczonego chwilowego współczynnika tarcia sporządza się charakterystykę zmian momentu hamującego w czasie i wyznacza się średni

współczynnik tarcia, zgodnie z zależnością (7), jako całkę z chwilowego współczynnika tarcia po drodze hamowania [2]:

$$\mu_m = \frac{1}{s_2} \int_0^{s_2} \mu_a ds \quad (7)$$

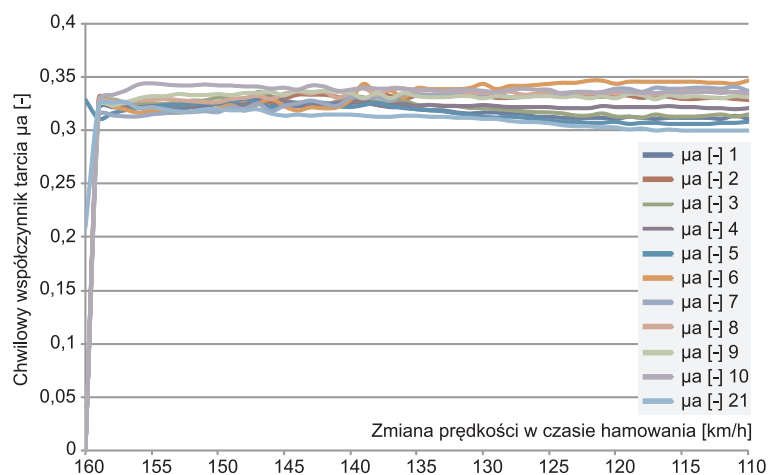
gdzie: s_2 – droga hamowania w metrach.

Na podstawie zależności (6) oraz (7) wyznaczane są charakterystyki $\mu_a = f(v)$ oraz $\mu_m = f(v)$. Na tej podstawie określa się chwilę osiągnięcia wartości maksymalnej oraz minimalnej chwilowego współczynnika tarcia. Przebiegi otrzymane z zależności (7) stanowią końcowe zestawienia sprawdzające zachowanie się współczynnika tarcia w całym zakresie prędkości hamowania danego pojazdu. Zależność chwilowego współczynnika tarcia od prędkości dla hamowań awaryjnych i przyhamowań oraz hamowań służbowych przedstawiają rysunki 19–22.

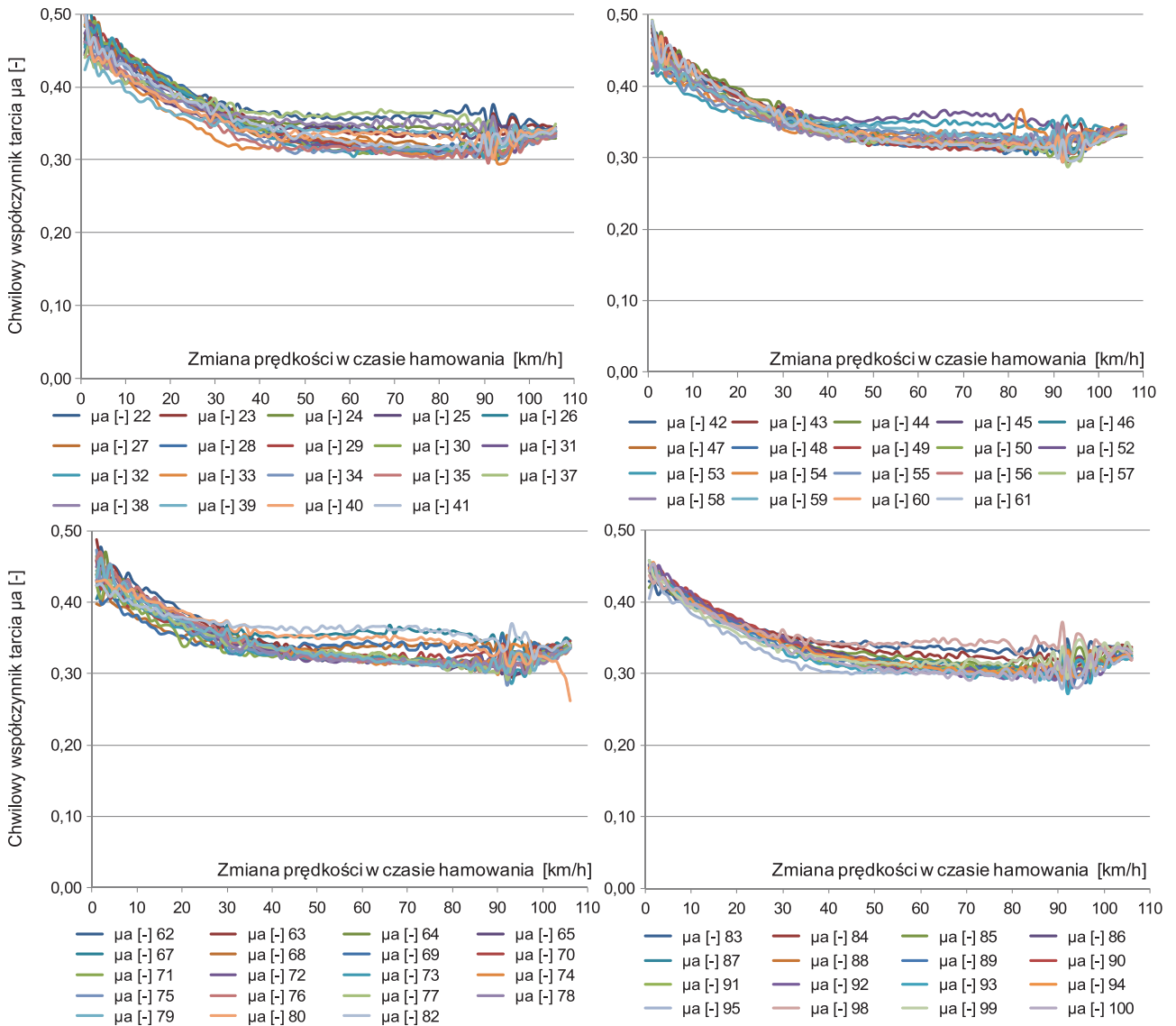
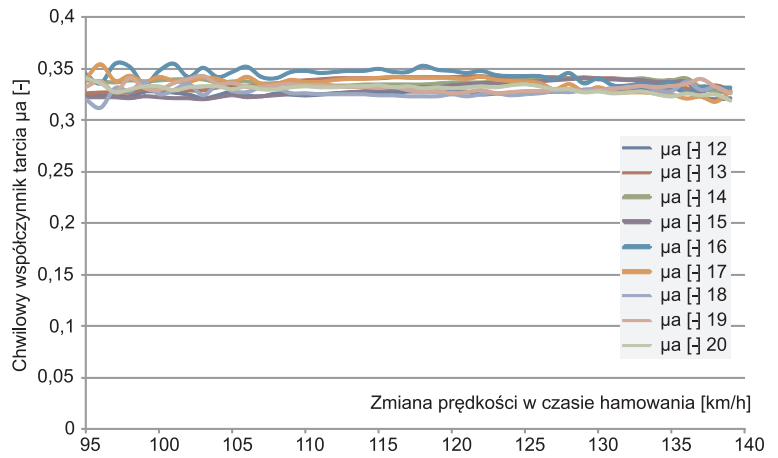


Rys. 19. Przebieg zależności chwilowego współczynnika tarcia od prędkości w czasie hamowania awaryjnego (nagłego) z prędkości 160 km/h do 0 [opracowanie własne]

Rys. 20. Przebieg zależności chwilowego współczynnika tarcia od prędkości w czasie przyhamowania z prędkości 160 do 110 km/h [opracowanie własne]



Rys. 21. Przebieg zależności chwilowego współczynnika tarcia od prędkości w czasie przyhamowania z prędkości 140 do 95 km/h [opracowanie własne]



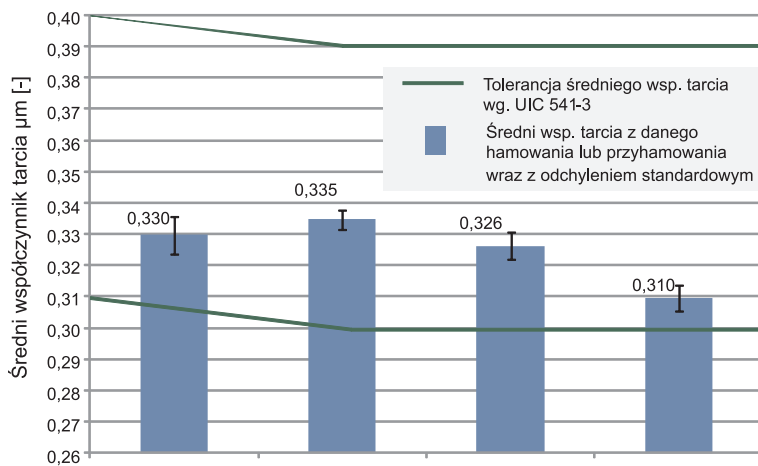
Rys. 22. Przebieg zależności chwilowego współczynnika tarcia od prędkości w czasie hamowania służbowego z prędkości 110 km/h do 0 [opracowanie własne]

Wyniki chwilowego współczynnika tarcia przedstawione na rysunkach 19–22 odnoszą się do pierwszych 100 hamowań. Na rysunku 23 zestawiono wartości średniego współczynnika tarcia dla hamowań i przyhamowań z różnych prędkości. Dla pierwszych 100 cykli hamowań wartość μ_m wraz z odchyleniem standardowym wyznaczono na podstawie zależności (7) dla hamowań z prędkości 110 km/h (73 powtórzenia), 160 km/h (6 powtórzeń) oraz przyhamowań z prędkości 140 do 95 km/h (10 powtó-

rzeń) i z prędkości 160 do 110 km/h (11 powtórzeń). Dodatkowo, na podstawie karty UIC 541-3, na rysunku 23 zaznaczono tolerancję średniego współczynnika tarcia.

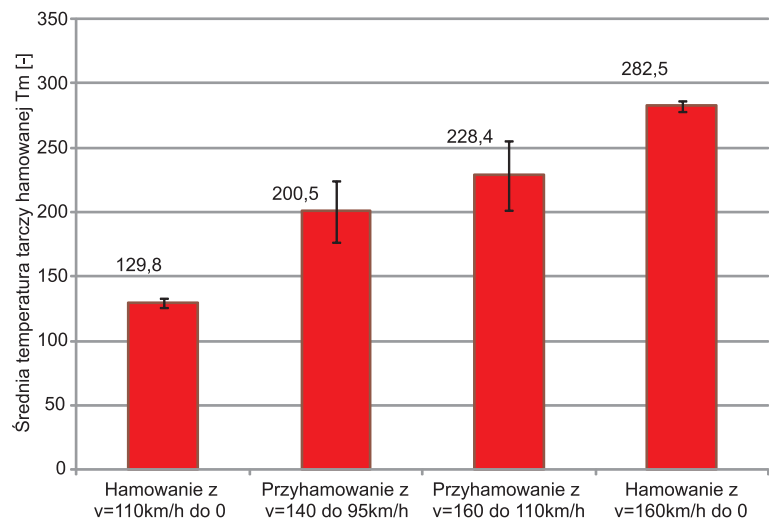
Wyniki rozkładu średniej temperatury uzyskiwanej przez segmentową tarczę hamulcową przedstawiono na rysunku 24 dla rozpatrywanych hamowań i przyhamowań.

Analizując wykres średniej temperatury tarczy hamulcowej dla pierwszych 100 hamowań i przyhamowań, nie



Rys. 23. Zestawienie wartości średniego współczynnika tarcia uzyskanego z różnych prędkości hamowania i przyhamowania w odniesieniu do wymagań karty UIC 541-3 [opracowanie własne]

Rys. 24. Zestawienie wartości średniej temperatury tarczy hamulcowej uzyskanego z różnych prędkości hamowania i przyhamowania [opracowanie własne]



Tablica 3

Zużycie masowe (wagowe) materiału ciernego

Strona	Masa okładzin po docieraniu [g]	Po 100 hamowaniach		Po 200 hamowaniach		Po 300 hamowaniach	
		Masa okładzin [g]	Zużycie [g]	Masa okładzin [g]	Zużycie [g]	Masa okładzin [g]	Zużycie [g]
L	2766	2502	264	2217	285	1933	284
P	2751	2489	262	2202	287	1911	291
Σ			526	Σ	572	Σ	575

[Opracowanie własne].

stwierdzono przekroczenia temperatury 400°C w tarczy ze względu na ograniczenia organicznego materiału ciernego według [2]. W tablicy 3 przedstawiono wartości zużycia wagowego jednego kompletu okładzin ciernych co 100 hamowań. Na jednym komplecie okładzin możliwe było wykonanie 300 hamowań według normy [4].

8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję nowej segmentowej tarczy hamulcowej do kół pojazdów szynowych, po badaniach według normy PN EN 14535-3 oraz karty UIC 541-3. W przeciwieństwie do obecnie produkowanych, tarcza hamulcowa została wykonana w technologii spawania płyty cierniej z prętami, spełniającymi funkcję wentylacji, ustalenia położenia względem koła oraz montażu do koła. Tarcza przeszła z wynikiem pozytywnym program badań zawarty w normie – podczas tysiąca hamowań w teście wytrzymałości nie wystąpiły pęknięcia powierzchniowe i wykruszenia materiału tarczy. Pod względem spełnienia wymagań karty UIC można stwierdzić, że uzyskane wartości chwilowego, jak i średniego współczynnika tarcia mieszczą się w zawartych tolerancjach dla μ_a oraz μ_m , temperatura tarczy w programie B1 odpowiadającemu przypadkom hamowania w elektrycznym zespole trakcyjnym nie przekracza 300°C (hamowanie awaryjne). W zakresie zużycia wagowego materiału ciernego stwierdzono, że jeden komplet organicznych okładzin ciernych umożliwia wykonanie 300 hamowań. Jednak należy podkreślić, że po tej liczbie hamowań pozostała grubość okładzin wyniosła 15 mm. Maksymalne dopuszczalne zużycie według karty UIC 541-3 nie może przekraczać 5 mm i dlatego ze względu na hamowania seriami po 100 hamowań według PN EN 14535-3 okładziny cierne wymieniono wcześniej, aby nie powtarzać danego cyklu hamowania, gdyż maksymalne zużycie 5 mm wystąpiłoby w czasie badań.

Literatura

1. Elektryczne zespoły trakcyjne, WWW http://www.pesa.pl/wp-content/uploads/2016/02/elektryczne_PL.pdf [dostęp 26.04.19].
2. Karta UIC 541-3: Hamulec – Hamulec tarczowy i jego zastosowanie – Warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych, 7 wydanie 2010, s. 12, 39.
3. PN-EN 14535-2: Kolejnictwo – tarcze hamulcowe kolejowych pojazdów szynowych – Część 2: Tarcze hamulcowe mocowane do kół, wymiary i wymagania dotyczące jakości, Warszawa 2011, s. 22.
4. PN-EN 14535-3: Kolejnictwo – Tarcze hamulcowe kolejowych pojazdów szynowych – Część 3: Tarcze hamulcowe, właściwości tarczy i pary cierniej, klasyfikacja, Warszawa, 2016, s. 12–16.
5. Przybyszewski M.: *Elektryczne zespoły trakcyjne. Budowa, działanie, zasady utrzymania i obsługi*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2017, s. 66–69.
6. Reibenschuh M. et al.: *Modelling and Analysis of Thermal and Stress Loads in Train Disc Brakes – Braking from 250km/h to Standstill*, Journal of Mechanical Engineering 2009, pp. 55, 7–8, 494–502.
7. Suwalski R., Zieliński A.: *Segmentowa tarcza hamulcowa typu 141BK do pojazdów kolejowych*, Problemy Kolejnictwa, 1994, nr 117, s. 89–104.
8. Ścieszka S.F.: *Hamulce cierne. Zagadnienia materiałowe, konstrukcyjne i tribologiczne*, Wydawnictwo Gliwice – Radom, 1998.
9. Tirović M.: *Energy thrift and improved performance achieved through novel railway brake discs*, Applied Energy 86 (2009) pp. 317–324.
10. Wu S.C., Zhang S.Q., Xu Z.W.: *Thermal crack growth-based fatigue life prediction due to braking for a high-speed railway brake disc*, International Journal of Fatigue 87 (2016) pp. 359–369.

Projekt był finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, program LIDER V, umowa nr LIDER/022/359/L-5/13/NCBR/2014.