

# Ocena propagacji pęknięć powierzchniowych kolejowych tarcz hamulcowych

Mateusz JÜNGST<sup>1</sup>, Wojciech SAWCZUK<sup>2</sup>

## Streszczenie

Układ kolejowego hamulca tarczowego, poddawany w trakcie eksploatacji dużym obciążeniom dynamicznym i termicznym, ulega różnym procesom zużyciowym zwłaszcza w obszarze pary ciernej. Jednymi z najczęściej występujących uszkodzeń są pęknięcia powierzchniowe tarczy hamulcowej. Mają one różną długość i zwykle pojawiają się znacznie szybciej, niż liniowe zużycie grubości pierścienia ciernego w wyniku współpracy z okładziną. Ich pojawienie się zwykle wymusza wcześniejszą wymianę lub regenerację tarczy przez jej przetoczenie, co generuje dodatkowe koszty dla eksploatującego pojazd kolejowy. W artykule oceniono pęknięcia powierzchniowe kolejowych tarcz hamulcowych i opracowano metodę szacowania ich głębokości.

**Słowa kluczowe:** eksploatacja, pojazd szynowy, hamulec tarczowy, pęknięcia powierzchniowe

## 1. Wprowadzenie

Obecnie na świecie panuje trend, aby rozwijać transport publiczny i zastępować nim transport indywidualny. Nie można jednak dokonać tego odgórnymi zarządzeniami, poza nielicznymi, uzasadnionymi przypadkami, ograniczając zabiegami prawnymi ruch samochodów. W celu zachęcenia przeciętnego obywatela do korzystania z transportu publicznego, należy zaoferować jemu niską cenę podróży, komfort i dużą prędkość – doskonale w tym zakresie sprawdza się transport kolejowy. Coraz większe prędkości pojazdów kolejowych wymagają także coraz lepszych rozwiązań umożliwiających wytracenie energii kinetycznej nieraz kilkusettonowej masy. Oprócz licznych układów hamulca elektrodynamicznego lub elektromagnetycznego, kluczową rolę spełniają hamulce cierne, zwykle uruchamiane pneumatycznie. W nowych pojazdach kolejowych, zwłaszcza przeznaczonych do jazdy z większymi prędkościami, stosuje się hamulce tarczowe (rys. 1).

Zależnie od pożądaných parametrów procesu hamowania, hamulce tarczowe mogą składać się z komponentów wykonanych z różnych materiałów: tarcze mogą być żeliwne, stalowe, rzadziej ceramiczne lub ze spieków

węglowych, okładziny zaś z kompozytów organicznych lub spieków metalicznych i ceramicznych [6].

W artykule skupiono się na zagadnieniach eksploatacyjnych tarcz hamulcowych wykonanych z żeliwa. Tarcze wykonane z tego materiału są powszechnie stosowane, dlatego na całym świecie prowadzi się badania ukierunkowane na poznanie procesów, jakim podlega ten materiał [1, 10, 11]. W stosunku do powszechnie stosowanego hamulca klockowego, hamulec tarczowy ma wiele zalet [6]:

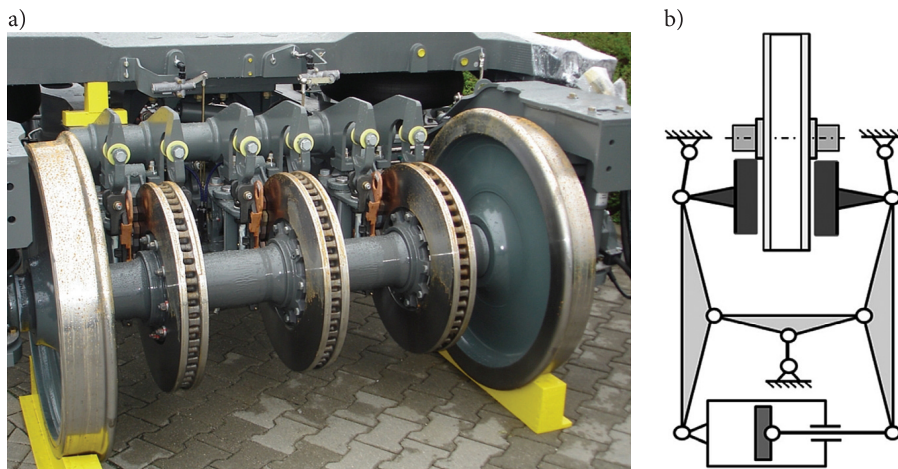
- zdolność do przejścia większej energii kinetycznej pojazdu,
- możliwość przenoszenia większych mocy hamowania ze względu na lepsze warunki odprowadzenia ciepła z pary ciernej,
- w przybliżeniu stały współczynnik tarcia w funkcji prędkości hamowania co sprawia, że proces hamowania przebiega stabilnie,
- cichy proces hamowania bez drgań przenoszonych na pojazd.

Układ hamulca tarczowego ma również wady:

- brak elementu czyszczącego powierzchnię toczną koła prowadzi do obniżenia współczynnika tarcia między kołem i szyną,

<sup>1</sup> Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych; e-mail: mateusz.m.jungst@doctorate.put.poznan.pl.

<sup>2</sup> Dr inż.; Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych; e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl.



Rys. 1. Mechanizm kolejowego hamulca tarczowego; a) widok ogólny układu na zestawie kołowym [fot. W. Sawczuk], b) schemat [4]

- podatność tarcz na warunki atmosferyczne, zwłaszcza na oblodzenie,
- umieszczenie hamulca tarczowego na osi zestawu kołowego znacznie zwiększa jego masę nieusprężynowaną.

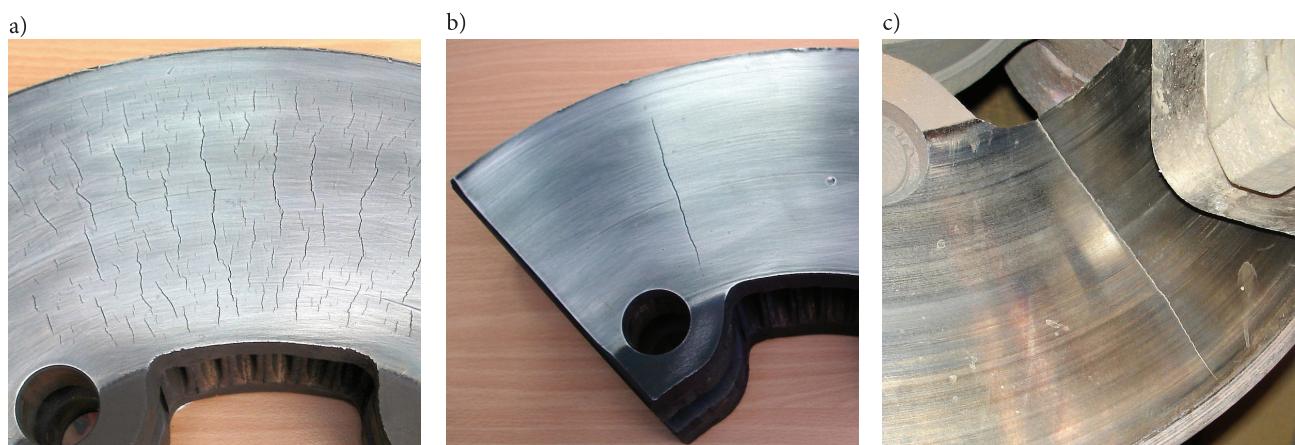
Z powodu kluczowej roli hamulca tarczowego, zachowanie jego sprawności jest niezmiernie ważne ze względu na bezpieczeństwo ruchu kolejowego; tym samym hamulec ten podlega rygorystycznym czynnościom przeglądowym, szczegółowo opisywanym w Dokumentacjach Systemu Utrzymania (DSU) na przykład, w wagonach piętrowych serii Bmnopux, oględziny układu wykonuje się w ramach przeglądów międzypociągowych P1/1 co  $1200 \pm 240$  km lub co 7 dni [2].

Teoretyczne, eksploatacyjne zużycie tarczy hamulcowej w układzie będącym w idealnym stanie powinno ograniczać się wyłącznie do stopniowego zmniejszania się grubości pierścienia ciernego wskutek suchego tarcia z okładziną hamulcową. W praktyce jednak, z powodu zużycia także elementów układu

dźwigniowego, jak i rzeczywistych właściwości materiałów stosowanych na tarczy i okładziny, na powierzchni tarczy pojawiają się także widoczne inne objawy zużycia, do których należą [3]:

- pęknięcia jednostronne na całej szerokości pierścienia ciernego,
- pęknięcia obustronne na całej szerokości pierścienia ciernego,
- pęknięcia na części szerokości pierścienia ciernego,
- pęknięcia powierzchniowe (mikropęknięcia),
- wklęsłości (wklęsłe wyżłobienia powierzchni cierniej),
- rowki i wykruszenia materiału tarczy.

Najczęściej występujące pęknięcia przedstawiono na rysunku 2. Spośród nich, największą grupę stanowią pęknięcia powierzchniowe, pojawiające się wcześniej, niż ubytek grubości pierścienia ciernego wskutek współpracy z okładziną [8]. Uszkodzenia te, zwane także mikropęknięciami, powstają przez nagrzewanie się strefy przypowierzchniowej, która zwiększa wówczas swoją objętość. Zjawisku temu przeciwdziała chłodniejsza warstwa materiału



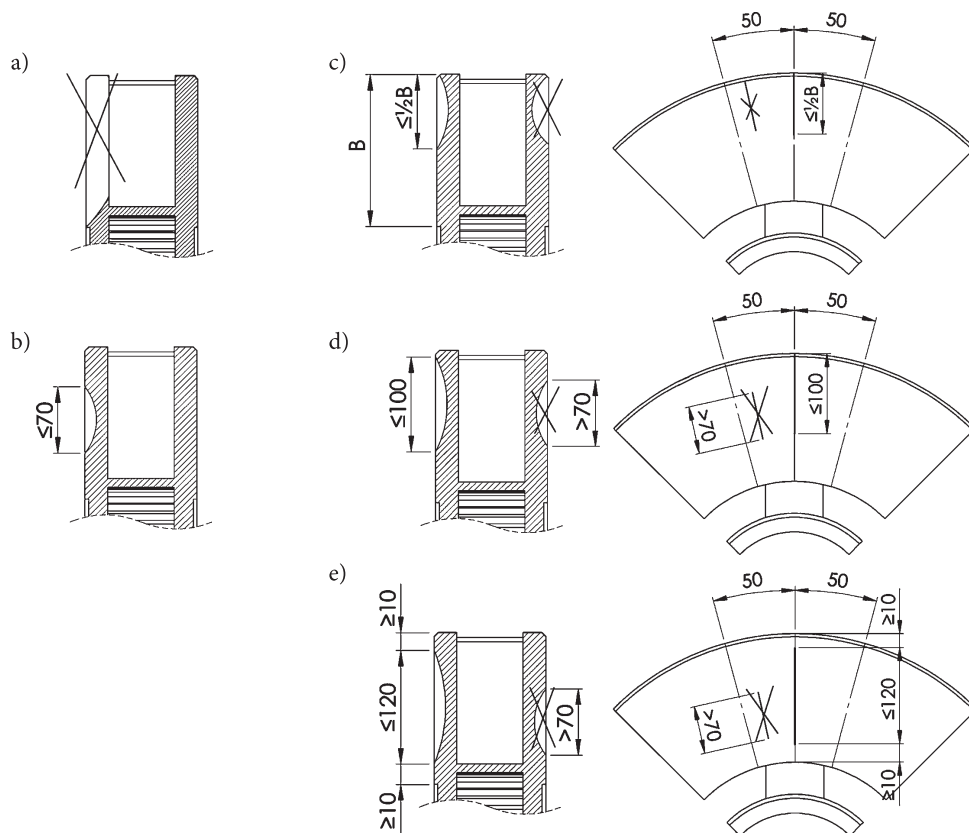
Rys. 2. Przykładowe pęknięcia na powierzchni tarcz hamulcowych: a) pęknięcia powierzchniowe (mikropęknięcia), b) pęknięcie na części pierścienia ciernego, c) pęknięcie jednostronne od promienia wewnętrznego na znacznej części powierzchni cierniej tarczy [fot. W. Sawczuk]

znajdująca się poniżej, co powoduje pojawienie się naprężeń ściskających. Po zaprzestaniu hamowania i rozpoczęciu procesu chłodzenia tarczy, wierzchnia warstwa kurczy się, a naprężenia zmieniają się w rozciągające. Wielokrotne powtarzanie tego cyklu prowadzi do stopniowego wzrostu dodatnich naprężeń, aż do osiągnięcia granicy wytrzymałości na rozciąganie materiału tarczy, przez co pojawiają się pęknięcia, rozrastające się promieniowo wraz z każdym kolejnym hamowaniem.

Tarcze hamulcowe mają pierścienie cierne o grubości 20 mm z naddatkiem około 4 mm na zużycie cierne [7]. Zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową i DSU dla pojazdów z hamulcami tarczowymi, tarczę z powierzchniowymi pęknięciami można regenerować przez przetoczenie z założeniem, że grubość pierścienia po przetoczeniu nie może być mniejsza niż 17 mm dla wagonów dopuszczonych do prędkości większej niż 140 km/h i 15 mm dla wagonów o prędkościach dopuszczalnych mniejszych od 140 km/h [2, 9]. Możliwość wykonania tej operacji ocenia się podczas oględzin tarczy. Ponadto,

w ocenie stanu technicznego tarczy należy wziąć pod uwagę, że [2]:

- niedopuszczalne są pęknięcia na całej szerokości pierścienia cierne (rys. 3a),
- dopuszczalne są pęknięcia o długościach do 70 mm, bez ograniczeń pod względem liczby ich występowania (rys. 3b),
- dopuszczalne są pęknięcia powierzchniowe o długości równej połowie szerokości pierścienia cierne, jeżeli na przeciwległej powierzchni ciernej na odcinku 100 mm nie występują żadne pęknięcia (rys. 3c),
- pęknięcia powierzchniowe o długościach do 100 mm są dopuszczalne tylko wtedy, gdy na przeciwległej powierzchni ciernej na odcinku 100 mm nie występują pęknięcia dłuższe niż 70 mm (rys. 3d),
- dopuszczalne są pęknięcia o długości 120 mm, jeżeli odstęp z zewnątrz i wewnątrz wynosi minimum 10 mm, jednak te pęknięcia są tylko wtedy dopuszczalne, gdy na przeciwległej powierzchni ciernej na odcinku 100 mm nie ma żadnego pęknięcia dłuższego niż 70 mm (rys. 3e).



Rys. 3. Rodzaje pęknięć pierścieni ciernych (pęknięcia przekreślone oznaczają, że wystąpienie danego pęknięcia jest niedopuszczalne): a) pęknięcie jednostronne na całej szerokości powierzchni ciernej tarczy przez cały przekrój (tzw. przełom), b) pęknięcie na części szerokości pierścienia cierne o długości do 70 mm, c) pęknięcie na części pierścienia cierne przy promieniu zewnętrznym z ograniczeniami, d) pęknięcie powierzchniowe o długości do 100 mm z ograniczeniami, e) pęknięcie powierzchniowe o długości do 120 mm z ograniczeniami [2]



## 2. Pomiary głębokości pęknięć powierzchniowych

Oprócz informacji o dopuszczalnych rozmiarach i liczbie pęknięć powierzchniowych, dokumentacje techniczno-ruchowe oraz dokumentacje systemu utrzymania w zakresie hamulca tarczowego, niekiedy zawierają także informacje o dopuszczalnych głębokościach pęknięć, rowków lub wklęsłości, lecz nie podają sposobu pomiaru, ani rodzaju przyrządu pomiarowego. Ze względu na charakter pęknięć powierzchniowych i kształt tarczy, trudno jest zbadać głębokość ubytku znanymi metodami nieniszczącymi (np. metodą ultradźwiękową, magnetyczną lub inną). W takich sytuacjach dobrym rozwiązaniem jest wykorzystanie sondy potencjałowej, jak np. RMG 4015 (rys. 4).

Jej działanie opiera się na pomiarze oporu elektrycznego między dwoma punktami na powierzchni badanego przedmiotu o właściwościach przewodzących. Jeśli między tymi dwoma punktami znajduje się pęknięcie, rezystancja jest większa, niż na powierzchni ciągłej i wzrasta wraz ze wzrostem głębokości. Dla danego materiału wartość rezystancji w dziedzinie częstotliwości opisuje zależność (1) [5]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f \cdot \pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}, \quad (1)$$

gdzie:

- $\sigma$  – specyficzna przewodność elektryczna,
- $\mu$  – przenikalność względna,
- $\mu_0$  – stała przenikalności,
- $f$  – częstotliwość.

a)



b)

Rys. 4. Sonda potencjałowa RMG 4015; a) widok ogólny, b) głowica do pomiaru pęknięć prostopadłych do badanej powierzchni [fot. W. Sawczuk]

Pomiary pęknięć wykonywano na dwóch segmentach tarczy typu BK141. Na pierwszym z nich było pojedyncze pęknięcie na całej szerokości pierścienia, na drugim zaś były powierzchniowe mikropęknięcia. Punkty pomiarowe rozmieszczono w równych odstępach na długości pęknięcia.

## 3. Analiza wyników badań

Wykonane badania wykazały, że głębokość pęknięcia powierzchniowego jest ściśle zależna od jego długości. Przebieg zmian głębokości w kolejnych punktach pomiarowych wzdłuż pęknięcia ma kształt łuku okręgu. Z tego względu dla wykonanych pomiarów podjęto się utworzenia regresyjnych funkcji okręgu, których przebiegi zaznaczono na rysunku 5.

Uzyskane przebiegi wykresów wskazują na pewną rozbieżność na obu końcach pęknięcia między funkcją regresyjną a wynikami rzeczywistymi – pęknięcie teoretyczne jest zawsze o kilka milimetrów dłuższe niż rzeczywiste. Przyczyny tej rozbieżności wynikają zarówno z zasady działania sondy pomiarowej, jak i zachowania materiału tarczy. Wszystkie funkcje regresyjne wykazują jednak bardzo dobre dopasowanie do wyników pomiarów.

Na podstawie regresyjnych funkcji okręgów wyznaczających głębokość pęknięcia jest możliwe modelowanie promienia tego okręgu w zależności od długości pęknięcia. Należy jednak zaznaczyć, że w tworzeniu modelu nie brano pod uwagę najdłuższego pęknięcia o długości 95 mm. Z dotychczas prowadzonych obserwacji wynika, że powierzchniowe pęknięcia tarczy zwiększają swoją głębokość liniowo, do osiągnięcia około 11,5–12 mm (osiągane w zakresie 65–70 mm). Dla dłuższych pęknięć powierzchniowych ich głębokość w przybliżeniu stabilizuje się na stałym poziomie. Ponadto, opierając się na dokumentacji, pęknięcia przekraczające długość 70 mm i tak w większości przypadków kwalifikują tarczę do wyłączenia z eksploatacji [2]. Zależność między długością pęknięcia i promieniem wyznaczającym jego głębokość opisuje równanie (2):

$$r = 0,9679 \cdot l_p + 1,0204, \quad (2)$$

gdzie:

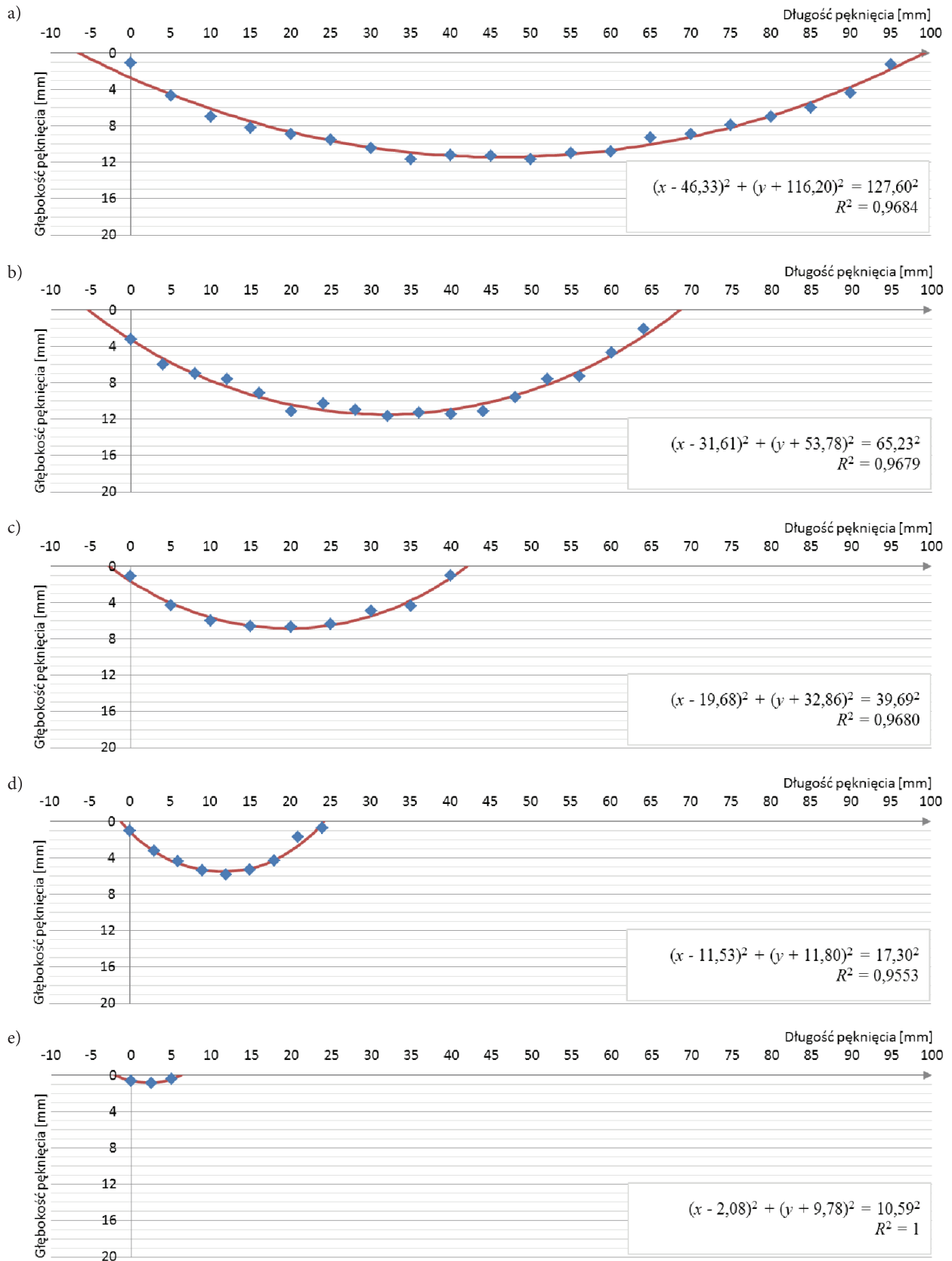
- $r$  – promień okręgu [mm],
- $l_p$  – długość pęknięcia [mm].

Funkcję wyznaczającą położenie środka okręgu na osi rzędnych opisuje równanie (3):

$$b = -0,7948 \cdot l_p - 0,6292, \quad (3)$$

gdzie:

- $b$  – współrzędna środka okręgu na osi rzędnych.



Rys. 5. Przebiegi głębokości pęknięć w zależności od ich długości; kolor niebieski – wyniki pomiarów, kolor czerwony – wyniki z modelu regresyjnego; a) pęknięcie o długości 95 mm, b) pęknięcie o długości 64 mm, c) pęknięcie o długości 40 mm, d) pęknięcie o długości 24 mm, e) pęknięcie o długości 5 mm [opracowanie własne]

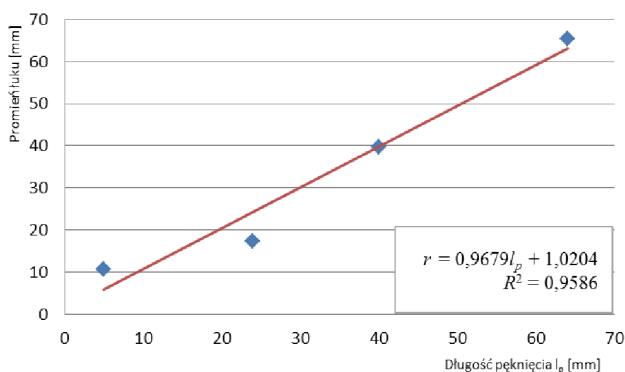
Sumując obie zależności, otrzymuje się głębokość pęknięcia w zależności od długości pęknięcia, co opisuje równanie (4):

$$h = r + b = 0,1731 \cdot l_p + 0,3912, \quad (4)$$

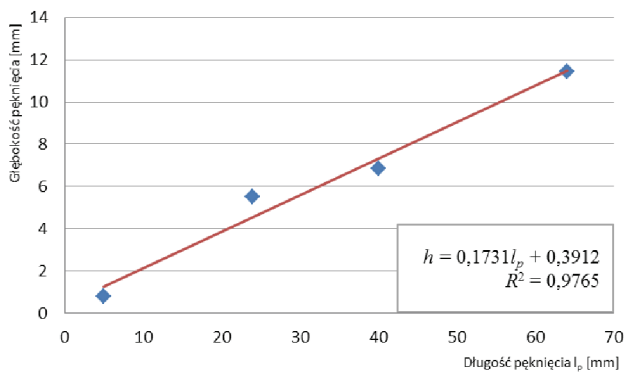
gdzie:

$h$  – głębokość pęknięcia [mm].

Zależności (2, 4) przedstawiono graficznie na rysunkach 6–7.



Rys. 6. Zależność promienia łuku wyznaczającego głębokość pęknięcia od jego długości; kolor niebieski – wartości promieni dla poszczególnych pęknięć wyznaczone z regresyjnych funkcji okręgów, kolor czerwony – regresja liniowa dla tych wartości [opracowanie własne]



Rys. 7. Zależność głębokości pęknięcia od jego długości; kolor niebieski – głębokości wyznaczone z regresyjnych funkcji okręgów, kolor czerwony – liniowa zależność głębokości pęknięcia od jego długości [opracowanie własne]

Pomimo małej liczby rzeczywistych danych pomiarowych, utworzone regresyjne funkcje dają bardzo dobre współczynniki determinacji  $R^2$  na poziomie 0,95–0,98, co świadczy o dobrym dopasowaniu modelu. Tym samym dowodzi to, że głębokość pęknięć powierzchniowych o długości do 70 mm na tarczy typu BK141 można określić przez zmierzenie ich długości.

## 4. Wnioski i podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały, że istnieje możliwość określenia głębokości pęknięcia bez prowadzenia czasochłonnych, specjalistycznych badań. Pęknięcia, które nie dyskwalifikują tarczy hamulcowej już na etapie oceny wizualnej (np. ze względu na pęknięcie pierścienia na całej jego grubości), można ocenić przez pomiar ich długości.

Pęknięcia powierzchni ciernej w tarczach hamulcowych wytworzonych z żeliwa sferoidalnego mają kształt łuku okręgu, co dowiedziono przez dopasowanie równania okręgu do rzeczywistych wyników pomiarów głębokości wykonanych za pomocą sondy potencjałowej.

Zależność głębokości od długości pęknięcia do około 70 mm jest liniowa, po czym stabilizuje się i staje się niezależna od wzrostu długości pęknięcia. Poznanie tej zależności dla pęknięć dłuższych niż 70 mm wymagałoby wykonania dodatkowych badań, do których trudno będzie uzyskać reprezentatywną grupę tarcz z takimi uszkodzeniami z racji stosunkowo rzadkiego występowania takich defektów pierścienia ciernej.

Należy zaznaczyć, że opisany w artykule sposób propagacji pęknięć powierzchniowych dotyczy wyłącznie tarcz hamulcowych wykonanych z żeliwa sferoidalnego. W przypadku tarcz z żeliwa szarego przebieg zmian głębokości na długości pęknięcia ma inny charakter, wskazujący prawdopodobnie na łączenie się małych pęknięć o łukowym kształcie w większe pęknięcia o znacznej długości, co będzie przedmiotem kolejnych badań.

## Literatura

1. D'Agostino L., Di Cocco V., Iacovello F.: *Overload effects on fatigue cracks in ferritic-pearlitic ductile cast irons*, *Procedia Structural Integrity*, Volume 2, 2016, pp. 3369–3376.
2. Dokumentacja Systemu Utrzymania – czteroosiowy piętrowy wagon pasażerski 2 klasy typu DBme serii Bmnpux, nr DSU-DBme 0130-1, grudzień 2010, Przewozy Regionalne spółka z o. o. Warszawa.
3. Gruszewski M.: *Wybrane zagadnienia eksploatacji hamulca tarczowego*, Technika Transportu Szynowego, 1995, pp. 6–7.
4. Kądziołka T., Kowalski S., Smolarski D.: *Analiza porównawcza wrażliwości dźwigniowych hamulców kolejowych*, *Pojazdy szynowe* nr 1/2011.
5. Miernik głębokości pęknięć RMG 4015, [on-line] [www.karldeutsch.icnet.pl/ofe\\_bpg.html](http://www.karldeutsch.icnet.pl/ofe_bpg.html) [dostęp: 17.10.2016].
6. Piechowiak T.: *Hamulce pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012.

7. PN-EN 14535-3:2016-02E: Kolejnictwo – Tarcze hamulcowe kolejowych pojazdów szynowych – Część 3: Tarcze hamulcowe, właściwości tarczy i pary ciernej, klasyfikacja, Warszawa, 2016.
8. Saumweber E.: *Auslegung und Leistungsgrenzen von Scheibenbremsen*, ZEV Glassers Annalen 112 (1988) Nr 4 April.
9. Wagon osobowy Z1 02, układ jezdny – tom 2. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa, Rail Consult Gesellschaft für Verkehrsberatung GmbH.
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, Volume 87, czerwiec 2016, pp. 359–369.
11. Zhiqiang L., Jianmin H., Zhiyong Y.: *The effect of braking energy on the fatigue crack propagation in railway brake discs*, Engineering Failure Analysis, Volume 44, wrzesień 2014, pp. 272–284.

## Evaluation of Surface Crack Propagation of Railway Brake Discs

### Summary

The system of railway disc brake, because of transferring high dynamic and thermal loads during the exploitation process, undergoes various wear processes especially in the area of the friction pair. Ones of the most common defects to the disc surface are surface cracks. They vary in length and usually appear much faster than linear wear on the friction ring caused by cooperation with brake lining. Their occurrence usually enforces a faster replacement or regeneration of the disc, which generates additional costs for the operator of a railway vehicle. The aim of the article is evaluation of the surface cracks of railway brake discs in terms of estimation of their depth.

**Keywords:** exploitation, railway vehicle, disc brake, surface cracks

## Оценка распространения поверхностных трещин железнодорожных тормозных дисков

### Резюме

Система железнодорожного тормозного диска из-за подвергания большой динамической и термической нагрузке во время эксплуатации, подвергает различным процессам износа, особенно в области пар трения. Одними из наиболее часто выступающих повреждений являются поверхностные трещины тормозного диска. У них разная длина и они выступают обычно на много чаще чем линейный износ толщины кольца трения в результате взаимодействия с фрикционной накладкой. Их выступление обычно вынуждает по-скорее изменения или восстановление диска через ее прокат, что вызывает дополнительные затраты для использующего единицу подвижного состава.

Целью статьи является оценка поверхностных трещин железнодорожных тормозных дисков в аспекте оценки их глубины.

**Ключевые слова:** эксплуатация, единица подвижного состава, тормозный диск, поверхностные трещины