

# Analiza współpracy koła tramwajowego z szyną w warunkach rzeczywistej eksploatacji

Tomasz STAŚKIEWICZ<sup>1</sup>, Tomasz NOWAKOWSKI<sup>2</sup>

## Streszczenie

Artykuł dotyczy wzajemnego dopasowania i współpracy wybranych profili kół tramwajowych z powszechnie występującymi w Polsce typami szyn. Opracowano dwuwymiarowe modele zestawów kołowych i torów tramwajowych eksploatowanych w Polsce. W wyniku analizy geometrycznej uzyskano obrazy położenia zestawu kołowego na torze i dystrybucję punktów styku. Zbadano wiele przypadków położenia zestawu kołowego na torze (np. na odcinku prostym, w łuku i na torze zużytych), przy różnych konfiguracjach profilu kół. W analizie wykorzystano także zarysy zużytych profili kół i szyn w celu przybliżenia modeli do ich rzeczywistych odpowiedników. Podkreślono znaczenie właściwego dobrania profilu koła do typu szyny, gdyż niewłaściwy dobór może spowodować pojawienie się punktów styku w niewłaściwych miejscach lub znaczne zwiększenie naprężeń kontaktowych. Ponadto wykryto możliwość wystąpienia zerowego luzu między kołem tramwajowym i szyną, zgodnymi z normami.

**Słowa kluczowe:** tramwaj, styk koło-szyna, eksploatacja

## 1. Wstęp

Publiczny transport miejski jest istotnym elementem pozwalającym przemieszczać się ludziom w miastach. Gęste sieci komunikacyjne oplatające aglomeracje przyciągają na myśl układ krwionośny wielkich skupisk ludzkich. Komunikacja miejska pozwala podróżować nie tylko taniej, ale często jest bardziej pewna i niezawodna niż samochód osobowy. Transport szynowy (w mieście jest to przeważnie tramwaj) oferuje atrakcyjniejsze, pod względem punktualności i czasu przejazdu, warunki podróżowania niż inne środki transportu miejskiego.

Z powodu rosnącej popularności tramwajów w Polsce oraz coraz większego udziału taboru niskopodłogowego, zaistniała konieczność zbadania zjawisk zachodzących na styku koła tramwajowego z szyną. Jest to interdyscyplinarne zagadnienie, łączące między innymi mechanikę, tribologię, metaloznawstwo i wytrzymałość materiałów. Geometria profili obręczy koła i szyny, a także typ styku, jego lokalizacja i siły, które w nim występują, mają wpływ na bezpieczeństwo, komfort jazdy i zużywanie się elementów tego skojarzenia ciernego. Problem styku koła tramwajowego z szyną jest w Polsce dotychczas mało zgłębiany. Istnieje niewiele publikacji na ten temat i należy ich szukać w literaturze obcojęzycznej [1, 2, 11-16].

W artykule podjęto próbę analizy współpracy koła tramwajowego z szyną w warunkach rzeczywistej eksploatacji pod względem położenia geometrycznego oraz typu i miejsca lub miejsc wystąpienia styku.

## 2. Analiza obecnego stanu

Przy budowie torów tramwajowych są stosowane m.in. następujące normy, rozporządzenia i wytyczne techniczne:

- Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych [17],
- PN-K-92011 – Torowiska tramwajowe – Wymagania i badania [8],
- PN-K-92009 – Komunikacja miejska – Skrajnia budowli [7],
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, Dz.U.1999.43.430 [10].

Przestrzeganie rozporządzeń jest obowiązkowe, natomiast nie ma obowiązku stosowania norm i wytycznych technicznych, chyba że są one przytoczone w rozporządzeniu lub ustawie. Należy jednak pamiętać

<sup>1</sup> Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych; e-mail: tomasz.staskiewicz@put.poznan.pl.

<sup>2</sup> Mgr inż.; Politechnika Poznańska, Zakład Pojazdów Szynowych; e-mail: tomasz.zb.nowakowski@doctorate.put.poznan.pl.

tać o tym, że normy i wytyczne zawierają wiedzę opartą doświadczeniem eksploatacyjnym, stąd ich stosowanie może być korzystne dla jakości funkcjonowania systemu tramwajowego. Trzeba pamiętać również, że są to zapisy w dużej części powstałe w czasach, gdy eksploatowano wyłącznie tabor wysokopodłogowy, a zwłaszcza pojazd typu Konstal 105N. W związku z tym niektóre sformułowania są niejasne lub nie mogą być odniesione do współczesnych pojazdów.

W Polsce do budowy torowisk tramwajowych wykorzystuje się szyny kolejowe (49E1, 60E1) oraz rowkowe (59R2, 60R2 i starsze 180S i 180P). W każdym systemie tramwajowym, w zależności od potrzeb spotyka się zarówno szyny kolejowe, jak i rowkowe. Z obserwacji autorów wynika, że szyny rowkowe, które powinny być stosowane w sytuacjach określonych w wytycznych technicznych, bywają wykorzystywane w niezasadzonych lokalizacjach (torowisko wydzielone, tor prosty) [17]. Obecnie najpowszechniej stosowanymi szynami są 49E1 oraz 60R2.

Wyróżnia się następujące profile obręczy kół: T, PST i TW. Profil T jest najstarszym, stożkowym profilem, który według [3] miał być wycofany z końcem 2001 roku. Profil PST zaprojektowano dla Poznańskiego Szybkiego Tramwaju w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku na podstawie obserwacji profili zużytych, natomiast profil TW będący modyfikacją profilu T, jest wykorzystywany jedynie lokalnie w Warszawie. Na rysunku 1 przedstawiono porównanie zarysów profilu T i PST.

Zwraca uwagę fakt, że profile według rysunku 1 różnią się wymiarem długości prowadnej (odległość między punktami atakującymi położonymi na obu kołach

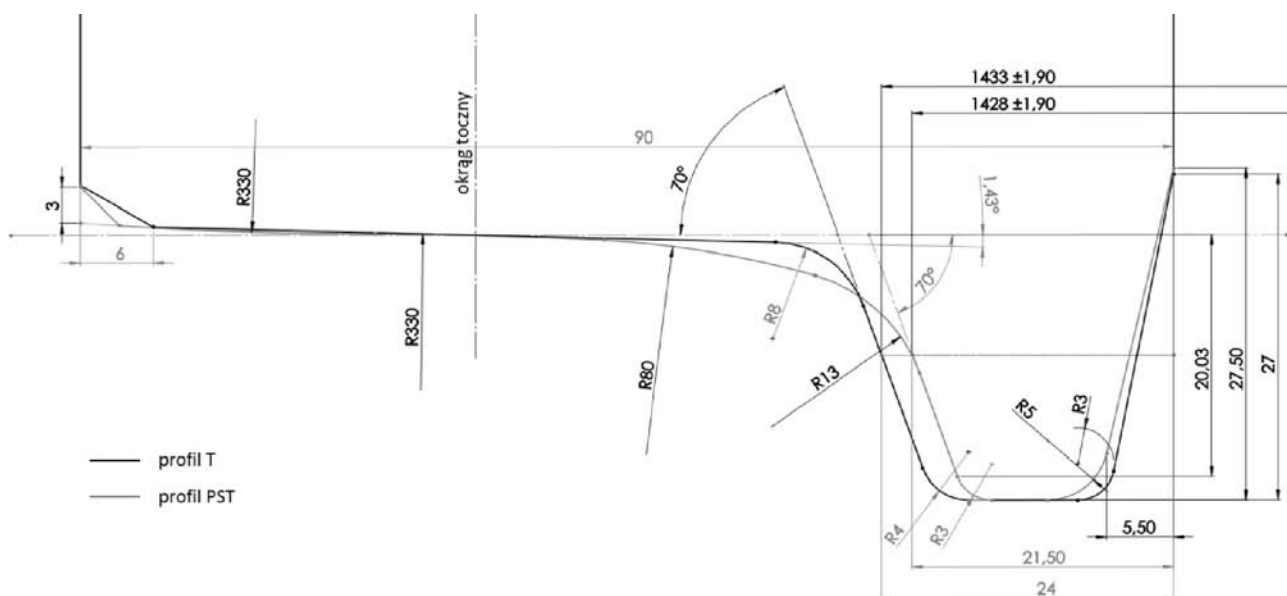
zestawu kołowego), co skutkuje tym, że profil T tworzy z szyną luz o wartości 2,5 mm, a profil PST – 5 mm. W Niemczech proponuje się, aby luz był nie mniejszy niż 5 mm [9]. Sprawdzenie wpływu luzu na dynamikę jazdy tramwaju oraz tempo zużywania się kół będzie prowadzone w dalszej części badań, w projekcie Lider.

W związku z postępującą wymianą taboru na nowoczesny, niskopodłogowy oraz modernizacją i budową torów, pojawiła się potrzeba aktualizacji i dostosowania istniejących wytycznych oraz przepisów do nowych warunków. Wskazana byłaby także ich naukowa weryfikacja.

### 3. Metodyka badań

#### 3.1. Badane obiekty

Obiektami badań były wybrane obręcze kół tramwajowych oraz szyny eksploatowane przez polskich operatorów tramwajowych w stanie nominalnym albo zużytych (zarysy rzeczywiste). Zarysy nominalnych obręczy kół (profil T i PST) zaczerpnięto z normy [3]. Ze względu na odmienny charakter zużycia poszczególnych osi w wózkach, w analizie ujęto obydwie przypadki: oś atakującą i oś tylną. Rzeczywiste profile kół pochodziły z pojazdu Konstal 105N o numerze inwentarzowym 1350, eksploatowanego w Gdańsku (profil T, przejściowo przed pełnym wdrożeniem profilu PST) oraz pojazdu Konstal 105N o numerze inwentarzowym 129, eksploatowanego w Poznaniu (profil PST). Wymienione pojazdy były wyposażone w wózki o możliwości obrotu względem osi pionowej.



Rys. 1. Porównanie zarysów profilu T i PST; opracowanie własne na podstawie [3]

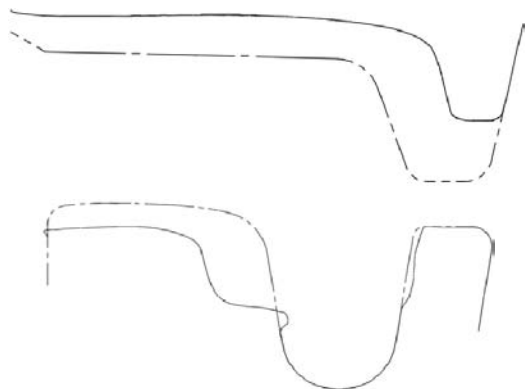
Fig. 1. Comparison of profiles T and PST; own work on basis of [3]

Nominalne zarysy szyn (180S, 59R2, 60R2 i 49E1) zaczerpnięto z norm [4, 5, 6]. Szyny o zarysach rzeczywistych pochodziły z łuków toru mierzonych w Poznaniu i we Wrocławiu (uzyskano je dzięki uprzejmości Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego we Wrocławiu).

### 3.2. Mierzone wielkości

W wyniku pomiarów profili obręczy kół oraz szyn uzyskano współrzędne punktów reprezentujących geometrię ich przekrojów poprzecznych. Pomiarzy profili kół wykonano za pomocą profilomierza elektronicznego do kół A-B, natomiast pomiar zarysów główek szyn – za pomocą profilomierza elektronicznego X-Y do szyn i rozjazdów.

Modele reprezentujące rzeczywiste obrazy obręczy i szyn powstały przez nałożenie na model nominalny profilu w trakcie zużywania i usunięciu zużytego materiału (rys. 2).



Rys. 2. Zarysy nominalne (linia przerywana) i zużyte (linia ciągła) obręczy koła i szyny [opracowanie własne]

Fig. 2. Nominal (dashed line) and worn (solid line) contours of wheel tire and rail [own work]

W analizie wykorzystano dwa warianty toru o szerokości normalnej (niezależnie od rodzaju szyn), o następujących oznaczeniach:

- tor bez odchyłek – tor o wymiarach nominalnych,
- tor mocno zużyty – tor o maksymalnej, dopuszczalnej według [17] szerokości szyn i o największym zmierzonym zużyciu.

Po przygotowaniu modeli obręczy zestawu kołowego, związane je walcem reprezentującym oś, zachowując rozstaw okręgów tocznych równy 1500 mm. Tor powstał przez odpowiednie usytuowanie szyn względem siebie, o odpowiednim rozstawie, wliczając w to dopuszczalne odchyłki [17] (w zależności od rozpatrywanego wariantu). Zestawy kołowe ustawiano na torach w różnych wariantach opisanych w dyskusji wyników.

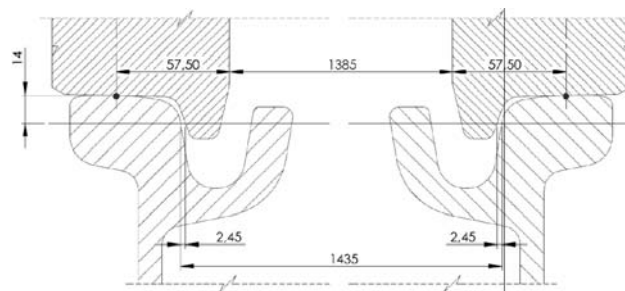
### 3.3. Przebieg analizy

W analizie można wyróżnić dwie części: geometryczną i symulacyjną. W pierwszej sprawdzano wzajemne położenie zestawu kołowego na torze w określonych pozycjach (na prostej albo w łuku), natomiast analiza symulacyjna polegała na zidentyfikowaniu wszystkich możliwych punktów styku podczas poprzecznego przemieszczania się zestawu kołowego po szynie w zakresie  $\pm 10$  mm począwszy od pozycji centralnej.

## 4. Wyniki analizy

### 4.1. Analiza geometryczna

Miejsca kontaktu między kołami i szynami oznaczono czarnymi punktami. Bardziej interesujące obszary styków przedstawiono w powiększeniu. Na rysunku 3 zaprezentowano koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w położeniu centralnym.



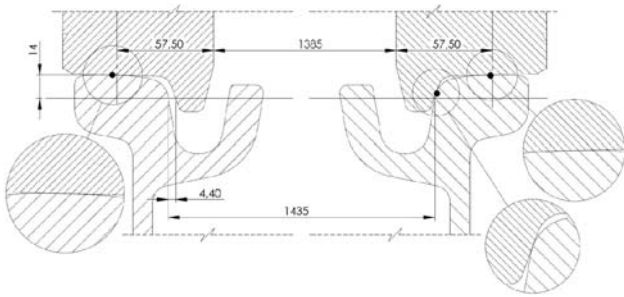
Rys. 3. Koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji centralnej [opracowanie własne]

Fig. 3. Profile T wheels (nominal) on track made of 60R2 rails (nominal) in central position [own work]

Na obu kołach styk jednopunktowy wystąpił w pobliżu okręgów tocznych, jest to poprawna lokalizacja styku. Luzy lewego i prawego koła wynoszą zaledwie po około 2,5 mm.

Na rysunku 4 przedstawiono koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji skrajnej.

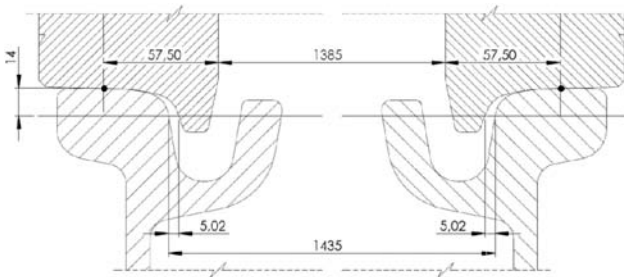
Na lewym kole wystąpił styk jednopunktowy w pobliżu okręgu tocznego, natomiast na prawym kole pojawił się styk dwupunktowy – na boku zewnętrznym obrzeża i w pobliżu okręgu tocznego. Luz lewego koła wynosi 4,4 mm, a luz prawego koła został wyczerpany. Ze względu na powstawanie poślizgów między kołem i szyną wskazane jest, aby styk w całym zakresie przesunięć poprzecznych koła był jednopunktowy. Poślizg styku to zjawisko niepożądane, ponieważ przyspiesza procesy zużywania pary ciernej oraz powoduje zwiększoną emisję hałasu.



Rys. 4. Koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji skrajnej [opracowanie własne]

Fig. 4. Profile T wheels (nominal) on track made of 60R2 rails (nominal) in utmost position [own work]

Na rysunku 5 przedstawiono koła o profilu PST (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji centralnej.

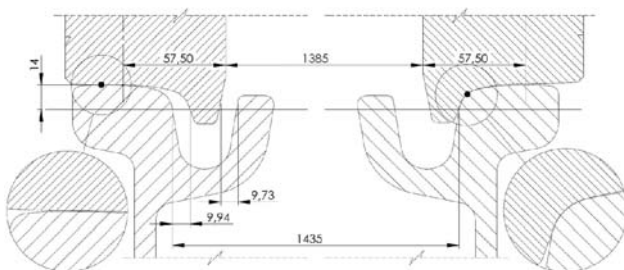


Rys. 5. Koła o profilu PST (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji centralnej [opracowanie własne]

Fig. 5. Profile PST wheels (nominal) on track made of 60R2 rails (nominal) in central position [own work]

Na obu kołach wystąpił styk jednopunktowy w pobliżu okręgów tocnych. Luzy lewego i prawego koła wynoszą po około 5 mm – jest to dwukrotnie większa wartość niż w przypadku profilu T.

Na rysunku 6 przedstawiono koła o profilu PST (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji skrajnej.



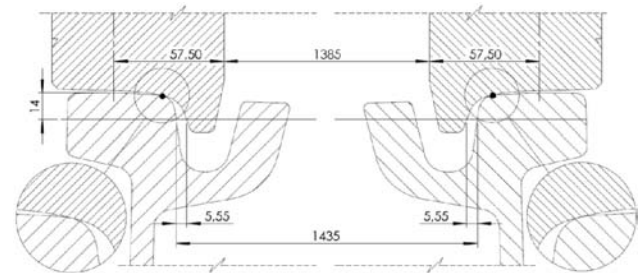
Rys. 6. Koła o profilu PST (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych) w pozycji skrajnej [opracowanie własne]

Fig. 6. Profile PST wheels (nominal) on track made of 60R2 rails (nominal) in utmost position [own work]

Na lewym kole wystąpił styk jednopunktowy na powierzchni toczonej, przesunięty w stronę zewnętrznej

płaszczyzny czołowej, natomiast na prawym kole – styk jednopunktowy na łuku przejściowym. Luz lewego koła wynosi około 10 mm, natomiast luz prawego koła został wyczerpany. Odległość między obrzeżem lewego koła i prowadnicą szyny wynosi około 10 mm. Kształty prawego koła i szyny wykazują konforemność w pobliżu obszaru kontaktu na łuku przejściowym, co nie wystąpiło w analogicznej sytuacji dla profilu T na szynie 60R2. W przypadku profilu PST nie wystąpił styk dwupunktowy, ponieważ promień łuku przejściowego nie jest mniejszy niż promień zaokrąglenia główki szyny w tym samym miejscu. Nowe szyny, obecnie używane do budowy torów mają ten sam promień zaokrąglenia główki szyny równy 13 mm.

Na rysunku 7 pokazano koła o profilu PST (nominalnym) na torze z szyn 180S (nominalnych) w pozycji centralnej. Jest to przykład zaczerpnięty z Poznańskiego Szybkiego Tramwaju, dla którego opracowano profil PST. Profil powstał kilka lat przed budową torów, które jednak zostały wykonane z szyn 180S, dopasowanych do profilu T, a zupełnie nie pasujących do profilu PST.



Rys. 7. Koła o profilu PST (nominalnym) na torze z szyn 180S (nominalnych) w pozycji centralnej, [opracowanie własne]

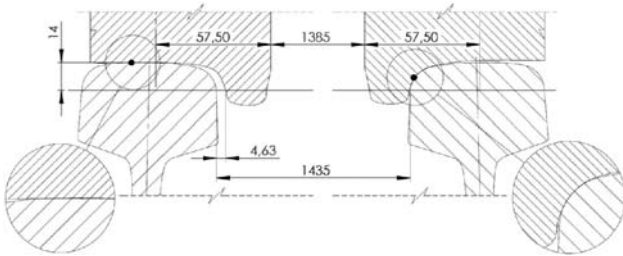
Fig. 7. Profile PST wheels (nominal) on track made of 180S rails (nominal) in central position [own work]

Na obydwu kołach wystąpił styk jednopunktowy w obszarze łuku przejściowego obręczy. Geometria kół i szyn w pobliżu styków nie wykazuje konforemności. Powierzchnia styku jest bardzo mała, co powoduje wzrost naprężeń kontaktowych. Można zatem spodziewać się przyspieszonego zużycia się kół i szyn w początkowej fazie eksploatacji (docieranie). Okręgi toczone kół znajdują się poza obszarami styku, a należy przypomnieć, iż jest to skojarzenie par kinematycznych o wymiarach nominalnych.

Na rysunku 8 przedstawiono koła o profilu T (w trakcie zużywania) na torze z szyn 49E1 (nominalnych) w pozycji skrajnej.

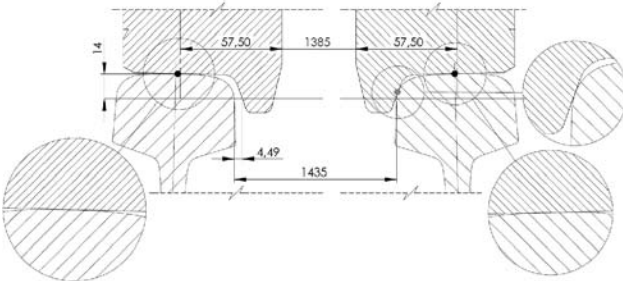
Na lewym kole wystąpił styk jednopunktowy na powierzchni toczonej, a na prawym kole jednopunktowy – na łuku przejściowym. Prawe koło wykazuje konforemność kształtu z główką szyny w obrębie łuku przejściowego. W stanie nominalnym profilu koła styk prawego koła był dwupunktowy, co widać na

rysunku 9 (drugi punkt kontaktu oznaczono szarym kolorem). Wzajemne docieranie się koła i szyny spowodowało utworzenie się styku konforemnego.



Rys. 8. Koła o profilu T (w trakcie zużywania) na torze z szyn 49E1 (nominalnych) w pozycji skrajnej [opracowanie własne]

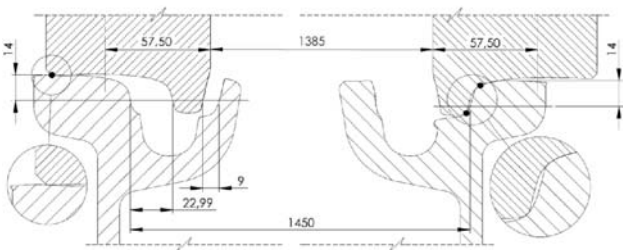
Fig. 8. Profile T wheels (worn) on track made of 49E1 rails (nominal) in utmost position [own work]



Rys. 9. Koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 49E1 (nominalnych) w pozycji skrajnej [opracowanie własne]

Fig. 9. Profile T wheels (nominal) on track made of 49E1 rails (nominal) in utmost position [own work]

Na rysunku 10 pokazano koła o profilu PST (w trakcie zużywania) na torze z szyn 60R2 (mocno zużytych) w pozycji skrajnej.



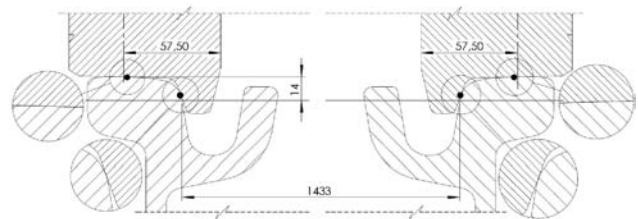
Rys. 10. Koła o profilu PST (w trakcie zużywania) na torze z szyn 60R2 (mocno zużytych) w pozycji skrajnej [opracowanie własne]

Fig. 10. Profile PST wheels (worn) on track made of 60R2 rails (worn) in utmost position [own work]

Na lewym kole wystąpił styk jednopunktowy na powierzchni toczonej, mocno przesunięty w stronę płaszczyzny czołowej, a na prawym kole – styk dwupunktowy na łuku przejściowym oraz na boku zewnętrznym obrzeża. Wnioskując po profilach szyn (pochodzą z łuku), można zauważyć, że nie tylko główka szyny zewnętrznej jest zużywana bocznie. Wyraźne ślady zużycia widać również na główce szy-

ny wewnętrznej oraz obydwu prowadnicach. Wynika to z małego promienia łuku ( $R \approx 25$  m), ukośnego ustawienia wózka w torze oraz wężykowania. Nie bez znaczenia są także parametry wózka takie, jak sztywność usprężynowania i zakres obrotu wózka wokół osi pionowej. Tramwaje w pełni niskopodłogowe, o konstrukcji najczęściej spotykanej w Polsce, składającej się z pięciu członów opartych na trzech wózkach, poruszają się na wózkach o niewielkim zakresie obrotu, co implikuje zwiększone kąty nabiegania na szynę oraz większe siły poprzeczne w styku koła z szyną. Tramwaje o wózkach obrotowych mniej intensywnie degradują tory w łukach.

Na rysunku 11 przedstawiono koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych), o najmniejszym możliwym luzie między kołem i szyną. Odległość toków szynowych zmniejszono o 2 mm względem rozstawu normalnego, zgodnie z zapisem w normie [8] o dopuszczalnych szerokościach toru. Długość prowadna zestawów kołowych została zwiększona o dopuszczalny wymiar odchyłki 1,9 mm [3]. Suma tych zmian skutkuje zmniejszeniem luzu całego zestawu kołowego w torze o 3,9 mm.



Rys. 11. Koła o profilu T (nominalnym) na torze z szyn 60R2 (nominalnych), o minimalnym luzie [opracowanie własne]

Fig. 11. Profile T wheels (nominal) on track made of 60R2 rails (nominal), minimum clearance [own work]

Na obu kołach wystąpiły styki dwupunktowe na powierzchniach toczonej oraz zewnętrznych bokach obrzeży. W tej sytuacji luzy kół zostały wyczerpane. Obydwa koła znajdują się w początkowej fazie wspinania się obrzeżami na szynę, co grozi wykolejeniem. Dla tak zwężonego toru prawdopodobnie nastąpi intensywne, boczne zużywanie się główek szyn. Należy podkreślić, że mimo małego prawdopodobieństwa wystąpienia jest to przypadek dopuszczalny przez normy, co jest niepokojące, tym bardziej, że niesie ze sobą większe ryzyko wykolejenia [3, 8].

## 4.2. Analiza symulacyjna

W wyniku analizy uzyskano wykresy geometrii kontaktu z zaznaczonymi stykami (linie pomiędzy punktami styku na obręczy i na szynie). Styk jednopunktowy oznaczono kolorem czarnym, dwupunktowy – szarym.

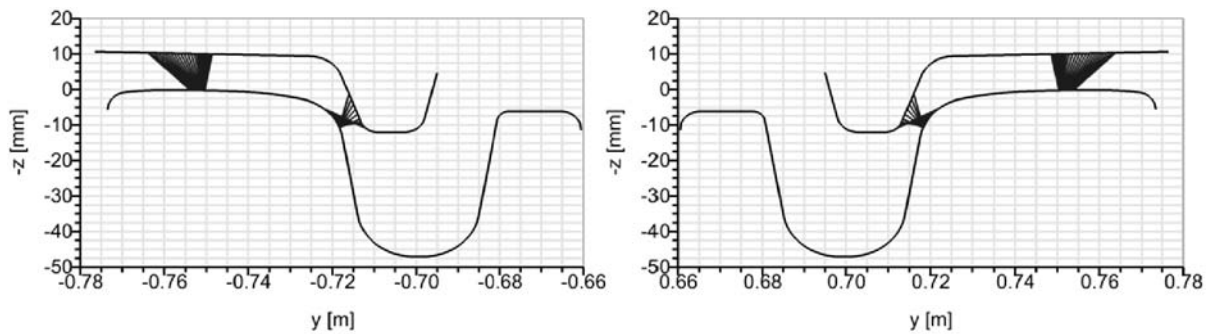
Na rysunku 12 zaprezentowano wykresy styków dla kół (o profilu nominalnym T) na torze nominalnym, wykonanym z szyn 60R2.

Na obu kołach wystąpił styk jednopunktowy – na powierzchni toczonej i na boku zewnętrznym obrzeża. Nieco odmienny wynik uzyskano w analizie geometrycznej (styk dwupunktowy). Wynika to z mniejszej dokładności analizy geometrycznej, której wyniki były przygotowywane przez wizualne dopasowanie skojarzenia ciernego. Uchwycono w niej moment przeskoaku styku jednopunktowego z powierzchni toczonej na zewnętrzny bok obrzeża, co przy bardzo małych odległościach tych punktów od główki szyny, zostało potraktowane jako styk dwupunktowy. Wykres styku o skupionych punktach oznacza, że pojazd

zyska większą stabilność jazdy, lecz zużycie kół i szyn będzie miejscowe i doprowadzi do wypłaszczenia się główek szyn [1].

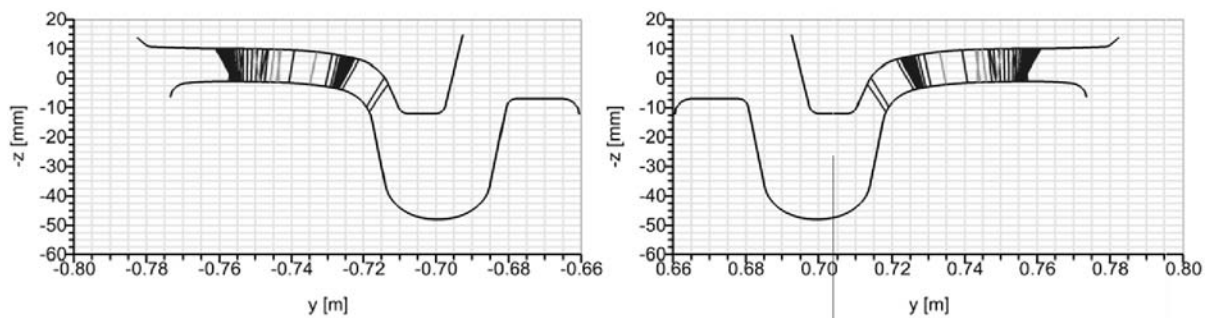
Na rysunku 13 zaprezentowano wykresy styków dla kół (o profilu nominalnym PST) na torze nominalnym, wykonanym z szyn 60R2.

Na obu kołach wystąpił styk dwupunktowy – na powierzchni toczonej, łuku przejściowym i boku zewnętrznym obrzeża. Analiza geometryczna wykazała styk jednopunktowy w położeniu skrajnym zestawu kołowego. Oznacza to, że podczas bocznego przemieszczania się obręczy po szynie, przez pewien moment istniał styk dwupunktowy, lecz przed osiągnięciem przez koło skrajnego położenia przekształcił się w styk jednopunktowy na łuku przejściowym. Wykres styku o roz-



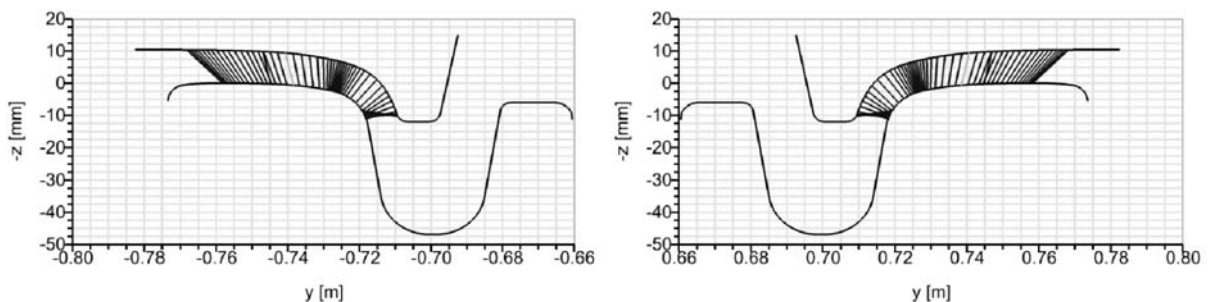
Rys. 12. Wykres punktów styku między kołami o profilu T (nominalnymi) i torem z szyn 60R2 (nominalnych) [opracowanie własne]

Fig. 12. Graph of contact points between profile T wheels (nominal) and track made of 60R2 rails (nominal) [own work]



Rys. 13. Wykres punktów styku między kołami o profilu PST (nominalnymi) a torem z szyn 60R2 (nominalnych) [opracowanie własne]

Fig. 13. Graph of contact points between profile PST wheels (nominal) and track made of 60R2 rails (nominal) [own work]



Rys. 14. Wykres punktów styku między kołami o profilu PP1 (nominalnymi) i torem z szyn 60R2 (nominalnych) [opracowanie własne]

Fig. 14. Graph of contact points between profile PP1 wheels (nominal) and track made of 60R2 rails (nominal) [own work]

proszonych punktach oznacza mniejszą stabilność jazdy, lecz bardziej równomierne zużywanie się obręczy i szyn [1], co jest pożądane w eksploatacji tramwajów.

Podczas prac nad nowym profilem koła tramwajowego rozpoczęto optymalizację jego kształtu ze względu na różne kryteria. Na rysunku 14 przedstawiono profil PP1 zoptymalizowany pod względem równomierności rozłożenia punktów styku wzdłuż szerokości obręczy koła (likwidacja przerw między liniami) oraz liczby punktów styku (dążenie do styku jednopunktowego).

Uwagę zwraca duża równomierność rozłożenia punktów styku, w przeciwieństwie do profili T i PST. Trwają prace nad weryfikacją jakości współpracy profilu PP1 z szyną. Wstępnie można powiedzieć, że w stosunku do profilu PST poprawie uległo tempo zużywania (szczególnie w łuku), lecz bezpieczeństwo jazdy pogorszyło się ze względu na wysoką wartość dopuszczalną współczynnika  $Y/Q$  wynikającą z kryterium Nadala.

## 5. Podsumowanie

W związku z brakiem prawnego przymusu unifikacji warunków technicznych, każdy system tramwajowy w Polsce jest nieco inny i z tego powodu istnieje duża dowolność w kształtowaniu styku między kołem i szyną. Właściwy dobór profili obręczy kół do szyn jest jednym z ważniejszych problemów. Należy pamiętać, że kontakt obrzeży kół z szynami występuje nie tylko podczas jazdy w łuku, ale może także występować na prostym odcinku toru ze względu na nierówności toru oraz ruch wężykowy zestawów kołowych. Większa długość prowadna profilu T zwiększa ryzyko wykołowania, gdyż istnieje, możliwość wystąpienia zerowego luzu między kołem a szyną przy odchyłkach podanych w wytycznych technicznych [17]. Styk obrzeża koła z prowadnicą szyny jest niekorzystny ze względu na jej zużywanie oraz występowanie szarpnięć podczas powstawania kontaktu, natomiast może on przyczynić się do poprawienia bezpieczeństwa jazdy przez utrudnianie przeciwegłemu kołu wspinania się na szynę. Zużyte profile obręczy kół i szyn wykazują większą wzajemną konforemność niż nowe – w przypadku profilu T następuje redukcja styku dwupunktowego do jednopunktowego dzięki docieraniu elementów skojarzenia ciernego. Wybrany zarys koła powinien podlegać procesowi docierania tylko raz – w początkowej fazie eksploatacji. Miasta przejściowo eksploatujące koła o dwóch różnych profilach (T i PST) odnotowują zmniejszone przebiegi międzyprzetoczeniowe (przykład Gdańska i Częstochowy). Należy dążyć do tworzenia się rozproszonego styku jednopunktowego między kołem i szyną w całym zakresie przesunięć bocznych zestawu kołowego.

## Podziękowania

Artykuł jest wynikiem projektu badawczego „Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną, celem opracowania nowego profilu koła tramwajowego” (LIDER/20/521/L-4/12/NCBR/2013), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER (wsparcie rozwoju kadry naukowej, a w szczególności podniesienie kompetencji w samodzielnym planowaniu, zarządzaniu oraz kierowaniu zespołem badawczym poprzez realizację projektów badawczych o charakterze aplikacyjnym).

## Literatura

1. Grassie S.L.: *Maintenance of the wheel-rail interface*, W: *Wheel-rail interface handbook*, pod red. Lewis R., Olofsson U., Woodhead Publishing, Cambridge 2011.
2. Iwnicki S.D.: *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, CRC Press, Boca Raton 2006.
3. PN-91-K-8825: Zestawy kołowe taboru, tramwajowego. Kontur bieżni kół elastycznych wagonów tramwajowych.
4. PN-92/H-93440: Stal. Szyny tramwajowe z rowkiem.
5. PN-EN 13674-1: Kolejnictwo. Tor. Szyny. Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej.
6. PN-EN 14811: Kolejnictwo. Tor. Szyny specjalne. Szyny rowkowe i związanie z nimi profile konstrukcyjne.
7. PN-K-92009: Komunikacja miejska. Skrajnia budowl.
8. PN-K-92011: Torowiska tramwajowe. Wymagania i badania.
9. Regulations on the Guidance of Rail Vehicles in accordance with the German Federal Regulations on the Construction and Operation of Light Rail Transit Systems (BOStrab), Office of Rail and Road, 2004, [dostęp: 10 sierpnia 2015], dostępny na [www.orr.gov.uk](http://www.orr.gov.uk).
10. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie Dz.U.1999.43.430.
11. Sato Y. i in.: *Wheel/rail contact analysis of trams and LRVs against derailment*, Elsevier Wear nr 265/2008, Elsevier B. V., Amsterdam 2008.
12. Sawley K., Urban C., Walker R.: *The effect of hollow-worn wheels on vehicle stability in straight track*, Elsevier Wear nr 258/2005, Elsevier B. V., Amsterdam 2005.
13. Sawley K., Wu H.: *The formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction*, Elsevier Wear nr 258/2005, Elsevier B. V., Amsterdam 2005.

14. Shevtsov I.Y.: *Wheel/Rail Interface Optimisation*, praca doktorska, Delft University of Technology, Delft, 2008.
15. Stow J., Allen P.: *A Good Practice Guide for Managing the Wheel-Rail Interface of Light Rail and Tramway Systems*, Office of Rail Regulation, Manchester 2008.
16. *Track Design Handbook for Light Rail Transit*, National Academy of Sciences, Washington 2012.
17. Wytuczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych, Warszawa 1983.

## Analysis of Interaction Between Tramway Wheel and Rail in Regular Operation

### Summary

The paper is focused on the problem of mutual compatibility and cooperation of assorted tram wheel profiles and rail types commonly exploited in Poland. Within the scope of preparation to the analysis, the two-dimensional models of wheelsets and tracks were created. Geometric analysis returned images of wheelset position on tracks and contact points distribution. Many cases of wheelsets' positions were investigated (e.g. on straight track, in curve, on worn track), for various configurations of wheel profiles. Selected cases were discussed in the paper. Contours of worn wheel and rail profiles were used to reconstruct regular operation conditions. It was noticed, that it is vital for correct cooperation to select the appropriate association of wheel and rail profiles. Otherwise it may cause improper location of contact zone or increase in contact stress. Moreover it was found, that due to actual standards, zero wheel-rail clearance can occur.

**Keywords:** tramway, wheels-rail interface, exploitation

## Анализ сотрудничества трамвайного колеса с рельсом в условиях фактической эксплуатации

### Резюме

Статья сосредоточена на вопросе взаимного соответствия и сотрудничества избранных профилей трамвайных колес с широко используемыми видами рельсов в Польше. В рамках подготовки к исследованиям геометрических зависимости во время сотрудничества трамвайного колеса с рельсом были произведены двухмерные модели колесных пар и трамвайных рельсов используемых в Польше. В результате геометрического анализа было получено представление положения колесной пары на рельсе и дистрибуции точек касания колеса и рельса. Были исследованы многие примеры положения колесной пары на рельсе (напр. на прямом участке, на дуге, или изношенном пути), для разных конфигураций профилей колес, из которых были избраны эти обсуждены в статье. В анализе были использованы также чертежа изношенных профилей колес и рельсов с целью приближения моделей до их фактических эквивалентов. Было замечено, что очень важным является подбор правильной профили до данного типа рельса. Это может вызвать возникновение точек касания в неправильных местах или значительное увеличение контактных напряжений. Кроме того был обнаружен нормативный случай выступления нулевого разбега трамвайной колесной пары в рельсе.

**Ключевые слова:** трамвай, точка касания колесо-рельс, эксплуатация