

**Andrzej CHUDZIKIEWICZ, Bogdan SOWIŃSKI,
Aleksander SZULCZYK**
Politechnika Warszawska

ZAGROŻENIE BEZPIECZEŃSTWA RUCHU POJAZDÓW SZYNOWYCH SPOWODOWANE STANEM TORU

Słowa kluczowe

Geometria toru kolejowego, prędkość, podsypka, stan toru.

Streszczenie

W pracy przedstawiono użycie narzędzi symulacyjnych do badania niebezpiecznych sytuacji grożących wykolejeniem się pojazdu szynowego. Wyszczególniono podstawowe przyczyny wykolejania się pociągów i przedyskutowano najczęściej stosowane kryteria oceny niebezpieczeństwa wykolejenia. Symulacyjne badania wykolejenia skoncentrowano na sytuacjach mających swoje źródło w torze.

W badaniach wzięto pod uwagę imperfekcje geometrii toru, przekraczanie dopuszczalnych prędkości oraz stan utrzymania podsypki. Pojęcie geometrycznych imperfekcji toru zostało tu rozszerzone i obejmuje oprócz nierówności toru również odchylenia powierzchni tocznych szyn od wymiarów nominalnych. Niebezpieczeństwo wykolejenia związane ze stanem podsypki zostało zbadane na przykładzie lokalnej zmiany jej struktury mechanicznej spowodowanej nieodpowiednim drenażem.

Obliczenia wykonano dla modelu matematycznego typowego wagonu pasażerskiego o liniowych parametrach sprężysto-tłumiących zawieszenia.

Wprowadzenie

Praca poświęcona jest przyczynom wykołowania się pojazdów szynowych spowodowanych stanem utrzymania toru.

Do podstawowych przyczyn wykołowania się wagonów należy zaliczyć [1]:

- a) pęknięcia szyn,
- b) wady powstałe w trakcie eksploatacji wagonu lub zużycie kół,
- c) imperfekcje geometrii toru,
- d) przekraczanie dopuszczalnych prędkości,
- e) stan utrzymania podsypki i podtorza,
- f) kolizja z innymi obiektami.

W kolejnych podrozdziałach krótko zostaną omówione punkty a) i b) (gdzie przyczyny wykołowania zależą od stanu pojazdu). Natomiast punkty c), d) i e) zostaną omówione obszerniej i oparte o badania symulacyjne. Punkt f) niezależny od stanu toru i pojazdu nie będzie omawiany.

1. Pęknięcia szyn [2–4]

Powodów, dla których szyny pękają, istnieje wiele. W przeszłości stwierdzano, że przyczynami pęknięcia są błędy produkcji szyn, wysokie temperatury kół powodujące zmiany metalurgiczne szyn, warunki klimatyczne, gdzie wpływ ma zarówno wysoka, ale przede wszystkim niska temperatura.

Pęknięcie szyn na ogół ma miejsce w pobliżu złączy szyn, które są również konieczne w torach bezстыkowych.



Rys. 1. Złącze szyn

Obszar ten poddawany jest dużym naprężeniom, które dodatkowo są zwiększane, w przypadku gdy złącze nie jest właściwie podparte przez podkład i/lub podsypkę. Kumulujące się działanie wielu przejazdów kół może spowodować pęknięcia zwykle zaczynające się w pobliżu wywierconych w szyjce szyny otworów.

1.1. Niedokładności produkcji szyn

Efektym ubocznym wprowadzonych obecnie torów bezстыkowych jest poddawanie w nich szyn cyklicznym naprężeniom termicznym zarówno ściskającym jak i rozciągającym. Jednocześnie tory bezстыkowe umożliwiają operatorom zwiększanie prędkości podróży i zwiększanie obciążenia osiowego.

Wszystko to powoduje konieczność stosowania twardszych gatunków stali w produkcji szyn wymagających ich rzadszej wymiany. Stal taka jest zwykle bardziej krucha i w mniejszym stopniu ulega plastycznym odkształceniom. Zanieczyszczenia w procesie produkcji tego wyrobu powodować mogą dość prędkie jego pękanie.

1.2. Wysokie temperatury

Oddziaływanie wysokich temperatur na szyny zachodzi w przypadku dużych poślizgów kół lokomotyw przy starcie lub hamowaniu. Na skutek oddziaływania stycznych sił tarcia między kołem a szyną dochodzi do dużego wzrostu temperatury szyny. Ruch pojazdu sprawia, szczególnie przy niskich temperaturach powietrza, dość gwałtowne ochłodzenie się rozgrzanego fragmentu szyny. Daje to efekt wyżarzania stali i powoduje zasadnicze zmiany jej własności fizycznych i struktury krystalicznej. Skutkiem tego są wewnętrzne naprężenia w szynie, utlenianie się jej powierzchni oraz chemiczne reakcje z zanieczyszczeniami na niej i w konsekwencji obszar taki staje się bardziej podatny na pęknięcia.

1.3. Warunki klimatyczne

W torach bezстыkowych tuki szynowe mają za zadanie znieść naprężenia związane ze ściskaniem w czasie zwiększonych temperatur okresu letniego i rozciąganiem w okresie zimowym. Z uwagi na to, że spawane szyny nie mogą wydłużać się i skracać, muszą realizować efekty zmian termicznych poprzez zmiany wielkości przekrojów poprzecznych. Może to powodować, szczególnie przy niskich temperaturach, duże naprężenia rozciągające, działające w kierunku jazdy. Takie naprężenia rozciągające, działając na słabsze punkty szyny, wspomniane w punktach 1.1 i 1.2 lub na spawy szyn, mogą spowodować pęknięcia.

Rozciąganie w szynie jest zwykle zwiększane przez proces hamowania pociągu. Zwalniający pociąg przesuwa przekroje szyny zwiększając naprężenia rozciągające za hamującym kołem. Efekt ten częściowo jest oczywiście eliminowany przez przytwierdzenia szyn.

Niskie temperatury sprawiają, że podsypka i przytwierdzenie szyny nie zapewniają dostatecznego podparcia szynom, dając w efekcie tzw. „zawieszony podkład”. W takich miejscach przejeżdżający pociąg powoduje duże ugięcia szyn a w konsekwencji duże naprężenia w ich przekrojach.

Ostatnio szeroko dyskutowaną przyczyną pęknięcia szyn jest tzw. zjawisko „gauge corner cracking” [5] (pęknięcie na powierzchniach toczonej szyny spowodowane zmęczeniem metalu) zidentyfikowane po katastrofie kolejowej w pobliżu Hatfield w Wielkiej Brytanii.

2. Wady powstałe w trakcie eksploatacji wagonu lub zużycie kół [6]

Wykolejenia związane z uszkodzeniem/zużyciem kół należą do rzadko zdarzających się katastrof. Wiążą się one z utratą przez koło swojego kształtu – poligonizację koła. Najbardziej głośnym wypadkiem spowodowanym przez tę usterkę była katastrofa w Eschede w Niemczech.

W przypadku toczenia się koła po szynie zużycie powierzchni koła może mieć wiele przyczyn. Zużycie powierzchni może być spowodowane przez tarcie w kontakcie, co daje utratę materiału na powierzchni stykających się ciał jak również przez tarcie między cząsteczkami zanieczyszczającymi powierzchnię szyny a kołem. Utrata powierzchniowych warstw materiału koła w praktyce skutkuje często „poligonizacją” powierzchni tocznej, tzn. koło uzyskuje kształt mniej lub bardziej regularnego wieloboku o zaokrąglonych wierzchołkach.

Poligonizacja koła może być spowodowana zużyciem (w sensie utraty materiału), ale również kombinacją takich czynników jak termiczne oddziaływania i plastyczne odkształcenia zachodzące lokalnie na powierzchni tocznej. Wspomniane odkształcenia pojawiają się, gdy koło jest poddawane różnym zmiennym obciążeniom lub podczas procesu ruszania i hamowania. Podobnie jak w przypadku szyny odkształcenia plastyczne jak i oddziaływania termiczne prowadzą do zmian w strukturze krystalicznej metalu, a co za tym idzie i powierzchni tocznych dając twardszą strukturę krystaliczną. W praktyce takie zmiany prowadzą do poligonizacji z jednej strony poprzez lokalne zmiany objętości materiału koła, a z drugiej poprzez fakt, że bardziej miękkie fragmenty powierzchni tocznej koła zużywają się szybciej niż twardsze.

Zwykle poligonizacja koła powoduje wzrost hałasu emitowanego przez toczące się po szynie koło i wzrost sił w kontakcie między kołem a szyną a co za tym idzie szybsze zużycie profili kół i szyn. Poligonizacja powierzchni tocznych powoduje poza tym zwiększone drgania układu zestaw kołowy–tor. W krańcowych przypadkach może spowodować wykolejenie pojazdu szynowego.

Wykolejenia, których przyczyną były wady pojazdów, są związane z uszkodzeniami zawieszenia albo znacznym brakiem symetrii przewożonego ładunku. Wymienione usterki powodują duże różnice w siłach pionowych i poprzecznych dla lewego i prawego toku szynowego. Duże różnice w kontaktowych siłach tarcia mogą powodować nawet przy niewielkim kącie nabiegania tendencje do wspinania się koła na szynę, co prowadzi do wykolejenia.

3. Imperfekcje geometrii toru

Do czynników mogących spowodować wykolejenie, a mających przyczyny w geometrii toru, należą:

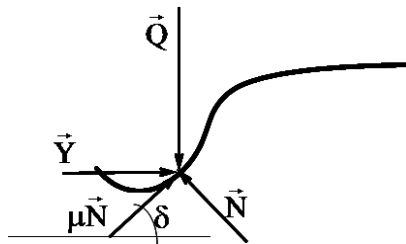
- a) duża poprzeczna nierówność toru, lokalna przechyłka i stopień zużycia profili części tocznych,

- b) nadmierne poszerzenie toru,
- c) wyboczenie toru, przesunięcie płaszczyzny toru,
- d) nieprawidłowa przechyłka na łuku.

3.1. Przegląd kryteriów szacowania niebezpieczeństwa wykolejenia [7, 8]

Powszechnie stosowanymi kryteriami służącymi do oceny niebezpieczeństwa wykolejenia są kryteria: Nadala, Weinstocka, kryterium stosunku sumy wypadkowych sił poprzecznych do pionowych dla jednej strony wózka, stosowane w Stanach Zjednoczonych kryterium szacujące tzw. „współczynnik wykolejenia” poprzez wartość chwilowego obciążenia pionowego toru i kryterium granicznej siły poprzecznej oddziaływania zestawu kołowego na tor. Kryteria te można nazwać kryteriami dynamicznymi. Istnieją też kryteria operujące pojęciami kinematycznymi, tzn. ustalające maksymalne przyspieszenia w wybranych punktach pojazdu. Kryteria te mają na celu szacowanie niebezpieczeństwa zaistnienia cykli granicznych i utraty stateczności poprzecznej.

Kryterium Nadala, które jest oparte na prostym schemacie obliczania stosunku sił pionowych Q i poprzecznych Y działających między kołem a szyną przy założeniu kontaktu jednopunktowego na obrzeżu koła (rys. 2).



Rys. 2. Schemat sił działających na koło stosowany w kryterium Nadala

$$Y = N \sin(\delta) - \mu N \cos(\delta)$$

$$Q = N \cos(\delta) + \mu N \sin(\delta)$$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}(\delta) - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg}(\delta)}$$

Maksimum Y/Q jest zwykle używane do oszacowania bliskości wykolejenia się pojazdu.

Kryterium Weinstocka można uznać za bardziej realistyczne dla małych lub ujemnych kątów nabiegania. Bierze się w nim pod uwagę również drugie koło osi zestawu kołowego.

Kryterium Weinstocka ustala wartość graniczną dla sumy bezwzględnych wartości współczynników Y/Q dla obydwu kół znajdujących się na wspólnej osi. Suma Y/Q dla osi nie powinna przekraczać sumy współczynnika z kryterium Nadala i współczynnika tarcia.

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}(\delta) - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg}(\delta)} + \mu$$

Kryterium Weinstocka jest mniej wrażliwe na zmiany współczynnika tarcia w stosunku do kryterium Nadala, szczególnie dla dużych wartości tego współczynnika.

Kryterium sumy wypadkowych sił poprzecznych do pionowych dla jednej strony wózka związane jest z wykolejeniem na skutek zmiennej szerokości toru lub obrotu szyn.

Współczynnik wykolejenia dla jednej strony wózka jest to suma sił poprzecznych działających na koła po jednej stronie wózka podzielona przez sumę sił pionowych działających na te same koła. Wykolejenia tego rodzaju mogą się zdarzać przy nadmiernym poszerzeniu toru bądź uszkodzonych podkładach czy mocowaniach szyn.

Kryterium szacujące tzw. „współczynnik wykolejenia” poprzez wartość chwilowego obciążenia pionowego toru mówi, że wartość siły pionowej działającej na tor związanej z jednym kołem nie powinna być mniejsza niż 10% statycznego obciążenia przypadającego na koło $Q_{\min} \geq \frac{Q_0}{10}$. Kryterium to w zasadzie szacuje możliwość utraty kontaktu koła z szyną.

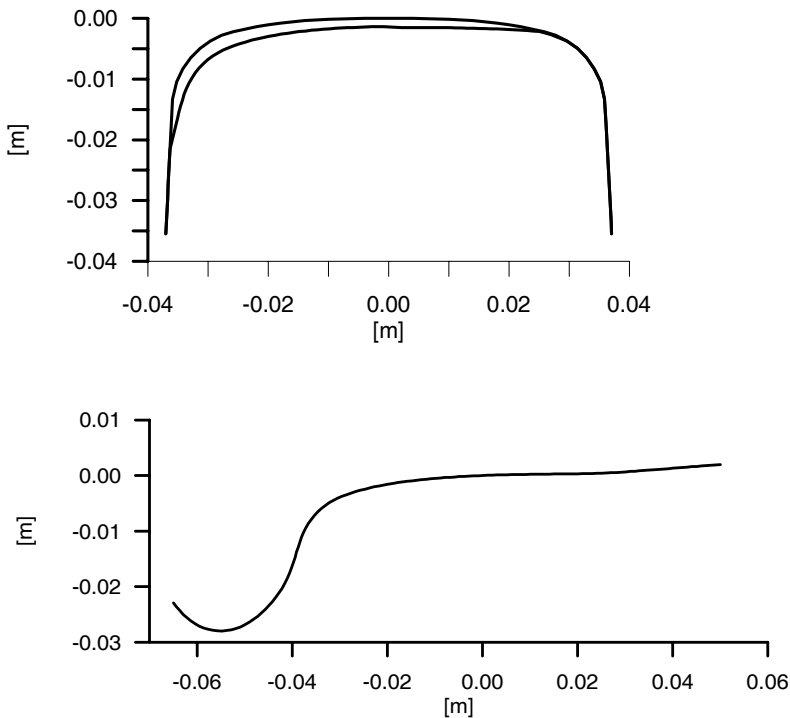
Kryterium granicznej siły poprzecznej sformułowano w celu zminimalizowania ryzyka przemieszczenia toru. Związane jest ono z wprowadzeniem granicznej wartości siły poprzecznej wywieranej przez zestaw kołowy na tor. Problem ten jest istotny ze względu na zwiększanie prędkości pociągów, zwiększanie obciążeń na oś, jak również z powodu powszechnego stosowania torów bezstykowych. Graniczną wartość siły poprzecznej oblicza się wg wzoru:

$$Y_{\max} \leq 0,85 \left(10 + \frac{P}{3} \right), \text{ gdzie } Y = \text{siła poprzeczna, } P = \text{obciążenie na oś w [kN]}$$

3.2. Wpływ geometrii zużycia profili szyn na wartość współczynnika wykolejenia [9]

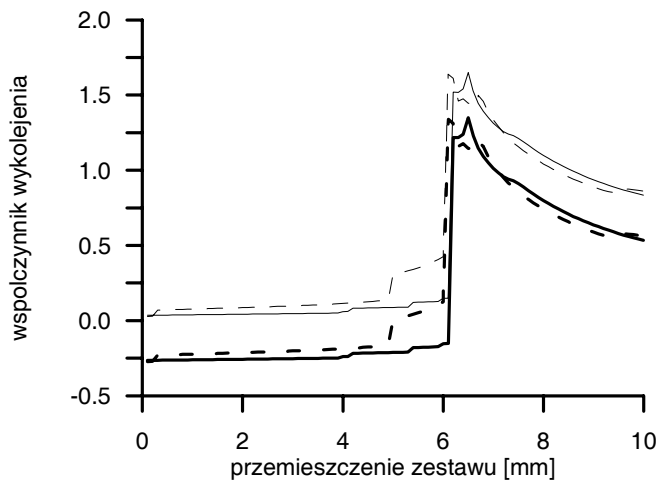
Pojęcie geometrycznych imperfekcji toru zostanie tu rozszerzone i obejmować będzie oprócz nierówności toru również odchylenia powierzchni toczonej szyn od wymiarów nominalnych.

Aby pokazać istnienie wpływu zużycia profili szyn na wartość współczynnika wykołowania, wybrano dwa profile szyn (rys. 3): nominalny UIC60 i pomierzony po pewnym czasie eksploatacji. Jako profil koła użyty został nominalny profil koła S1002. Przyjęto szerokość toru równą 1435 mm, a pochylenie szyn 1:40. Wartość współczynnika tarcia przyjęto równą 0,3. Obliczenia współczynnika wykołowania przeprowadzono wg wzorów Nadala i Weinstocka, traktując współczynnik jako funkcję zależną od przemieszczenia poprzecznego zestawu kołowego. Taka analiza wiążąca przemieszczenia poprzeczne z położeniem punktu kontaktu i tangensem kąta kontaktu pokazuje faktyczne (geometryczne) zależności współczynnika wykołowania od zużycia profili.

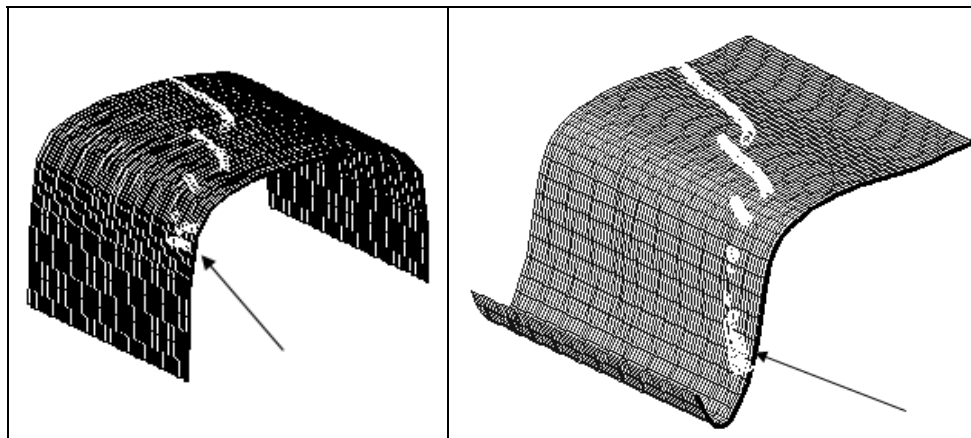


Rys. 3. Przykładowe profile szyn (nowy i po eksploatacji) oraz profil koła S1002

Przeprowadzone obliczenia wskazują na istnienie zależności między stopniem zużycia profili szyn a współczynnikami wykołowania. Pokazują również, że dla przemieszczeń poprzecznych zestawu kołowego większych niż ok. 6 mm wartość współczynnika wykołowania przekracza 1, co oznacza sytuację niebezpieczną. Na sytuację grozącą wykołowaniem wskazuje również położenie punktów kontaktu na powierzchniach toczyń koła i szyny (rys. 5).



Rys. 4. Przebieg współczynnika wykołowania wg Nadala (linie pogrubione) i Weinstocka (linie cienkie) dla nowych (linie przerywane) i zużytych (linie ciągłe) profili szyn



Rys. 5. Położenie punktów kontaktu na powierzchni koła i szyny dla różnych przemieszczeń zestawu kołowego względem toru (strzałki wskazują punkty kontaktu dla przemieszczeń poprzecznych zestawu większych od 6 mm)

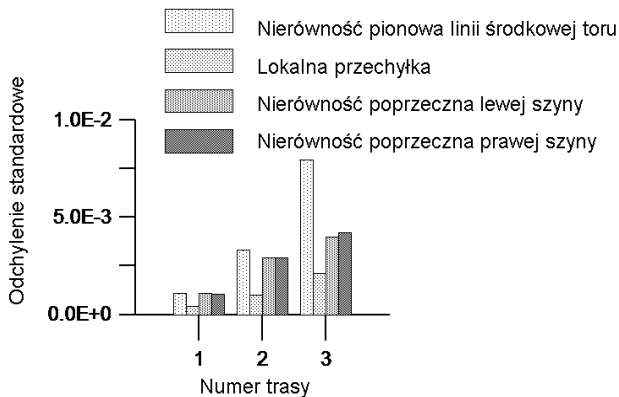
3.3. Wpływ nierówności geometrycznych toru na możliwość wykołowania [10]

W podrozdziale tym zostaną omówione przede wszystkim przyczyny wykołowania się pojazdów szynowych będące efektem dynamicznych przejściowych oddziaływań pojazdu z torem z nierównościami.

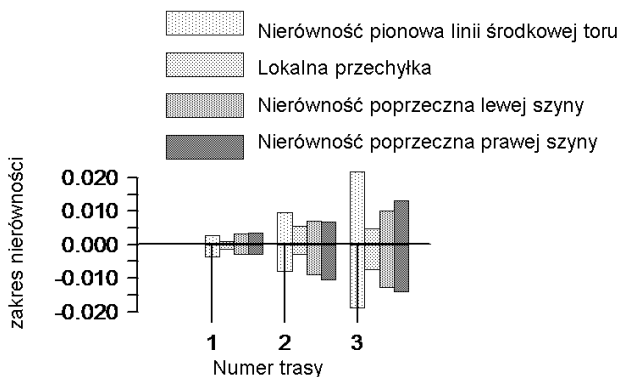
Geometryczne nierówności toru takie jak nierówność poprzeczna linii środkowej, przechyłka i szerokość generują kinematyczne zjawiska w zakresie ni-

skich częstotliwości drgań pojazdu szynowego. Ten zakres częstotliwości jest odpowiedzialny za dynamiczne zachowanie się pojazdu szynowego na torze prostym i za prowadzenie pojazdu na łukach regularnych.

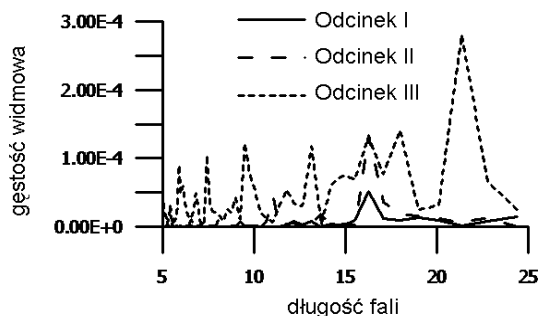
W tej części pracy przedstawione zostaną wyniki badań symulacyjnych, pokazujące zależność wartości współczynnika wykołnienia definiowanego jako Y/Q od stanu geometrii toru. Symulacje były prowadzone dla prostego toru. Rozpatrywanym obiektem był wagon pasażerski o typowych parametrach bezwładnościowych i sprężysto-tłumiących. Symulacje przeprowadzono dla odcinków toru o długości 400 m z prędkościami od 100 do 220 km/h. Do badań przyjęto trzy odcinki toru o różnych nierównościach geometrycznych. Dane nierówności zostały uzyskane przez pomiary na eksploatowanych trasach PKP. Przeprowadzono dla nich statystyczną i częstotliwościową analizę nierówności (rys. 6, 7, 8). Dla każdego typu toru użyto profili szyn o różnych stopniach zużycia. Geometria położenia punktów kontaktu tych profili w zależności od stopnia zużycia została zanalizowana w podrozdziale 4.2.



Rys. 6. Odchylenia standardowe nierówności trzech badanych odcinków toru



Rys. 7. Zakres zmian nierówności badanych odcinków



Rys. 8. Gęstość widmowa mocy poprzecznej nierówności linii środkowej toru

Zbiorcze zestawienie wyników badań symulacyjnych przy nominalnych profilach kół i szyn przedstawiono w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Statystyczne wartości współczynnika wykołnienia Y/Q dla odcinków toru o różnym stanie utrzymania (prędkość symulowanego pojazdu = 100 km/h)

Rodzaj toru	Profil szyny	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Minimum	Maksimum
Odcinek I	Nominalny	0,0015552	0,0174492	$1,2497 \cdot 10^{-5}$	0,0603
	Zużyty	0,0011080	0,0108951	$6,9247 \cdot 10^{-6}$	0,0981
Odcinek II	Nominalny	0,0024819	0,0226815	$2,1369 \cdot 10^{-5}$	0,0974
	Zużyty	0,0011401	0,0109714	$1,5462 \cdot 10^{-5}$	0,1185
Odcinek III	Nominalny	0,0547055	0,1169081	$4,1119 \cdot 10^{-2}$	2,5266
	Zużyty	0,0326276	0,1381028	$6,1290 \cdot 10^{-2}$	2,2693

Tabela 2. Statystyczne wartości przemieszczeń poprzecznych zestawu kołowego

Rodzaj toru	Profil szyny	Odchylenie standardowe	Minimum	Maksimum
Odcinek I	Nominalny	$6,2009 \cdot 10^{-4}$	-0,002951	0,002967
	Zużyty	$2,1202 \cdot 10^{-3}$	-0,006167	0,005853
Odcinek II	Nominalny	$1,6993 \cdot 10^{-3}$	-0,004894	0,004769
	Zużyty	$2,4283 \cdot 10^{-3}$	-0,00603	0,005966
Odcinek III	Nominalny	$3,2327 \cdot 10^{-3}$	-0,006648	0,006639
	Zużyty	$3,8104 \cdot 10^{-3}$	-0,007153	0,006997

Przy takiej samej prędkości symulowanego pojazdu pogorszenie stanu utrzymania toru spowodowało ponad 30-krotny wzrost maksymalnej wartości współczynnika wykołnienia i ok. 20-krotny wzrost wartości średniej.

Wraz ze zmianą stanu utrzymania (nierówności geometryczne) toru wzrosły też maksymalne przemieszczenia zestawu kołowego przekraczając 7 mm, co umieszcza punkt kontaktu (rys. 5) na obrzeżu koła, w strefie zagrożonej wykołnieniem wg kryterium tak Nadala, jak i Weinstocka.

3.4. Wyboczenie toru [11–14]

Wyboczeniem toru lub przesunięciem jego płaszczyzny nazywane jest pojawienie się dużych poprzecznych nierówności na torze bezстыkowym. Mają one zazwyczaj kształt sinusoidy o długości fali ok. 20 m i amplitudzie dochodzącej do 1 m. Skutkiem takich nierówności może być wykolejenie pociągu. Wyboczenie może pojawić się na torze prostym, jak i na łuku. Zwykle jest ono efektem kombinacji trzech oddziaływań: dużych sił ściskających, słabego stanu utrzymania toru oraz dynamicznego oddziaływania pociągu. Siły ściskające wynikają z naprężeń termicznych i w mniejszym stopniu z czynników mechanicznych takich jak np.: hamowanie, tarcie toczne czy kontakt z obrzeżem.

Warunki pogodowe układania toru wymagają temperatury otoczenia (temperatura neutralna) takiej aby naprężenia normalne w szynie były bliskie zera. Przyjmuje się, że jest to temperatura wynosząca ok. 25°C. Zwiększenie temperatury powoduje powstawanie sił ściskających szacowanych wzorem:

$$N = EA \alpha \Delta T$$

gdzie: E – moduł Younga materiału szyny,
 A – powierzchnia przekroju poprzecznego szyny,
 α – współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału szyny,
 ΔT – przyrost temperatury.

Zakłada się, że temperatura szyny, powodująca zagrożenie wyboczeniem, wynosi ok. 55°C.

Do czynników stanu utrzymania toru wpływających na możliwość wyboczenia należy zaliczyć między innymi: zmniejszenie poprzecznych i podłużnych sił oporu toru, błędy układania toru w kierunku poprzecznym i obniżenie temperatury neutralnej szyny zwykle przez montaż toru w niesprzyjających warunkach pogodowych. Na siły oporu toru wpływają własności sprężyste podsypki, stan techniczny mocowań szyn i jakość podkładów. Siły te służą do utrzymywania poprzecznej i podłużnej stabilności toru. Zmniejszenie ich następuje w przypadku niedoboru grubości warstwy podsypki, co jest szczególnie niebezpieczne na łukach i krzywych przejściowych.

Wyboczenie toru zwykle zapoczątkowywane jest przez niewielkie nierówności poprzecznej linii środkowej toru. Na krzywiznach toru pojazdy zwiększają oddziaływanie poprzeczne na tor. Na skutek tego oddziaływania nierówności te mają tendencję do zwiększania się inicjując proces wyboczenia. Kumulowanie odkształceń sprawia, że większość wyboczeniowych wykolejeń zdarza się daleko od początku składu pociągu. Kumulowanie odkształceń sprawia, że wężycowanie zestawów kołowych również może zainicjować wyboczenie toru.

4. Przekraczanie dopuszczalnych prędkości

Wpływ prędkości na współczynnik wykolejenia zostanie pokazany na podstawie badań symulacyjnych przedstawionych w podrozdziale 3.3. Dla odcinków trasy I oraz II, z których pierwszy charakteryzuje się niewielkimi amplitudami nierówności geometrycznych pokazany zostanie wzrost wartości współczynnika wykolejenia Y/Q dla jednego koła zestawu. Pokazany zostanie też wpływ prędkości na ruch ustalony pojazdu na łuku regularnym.

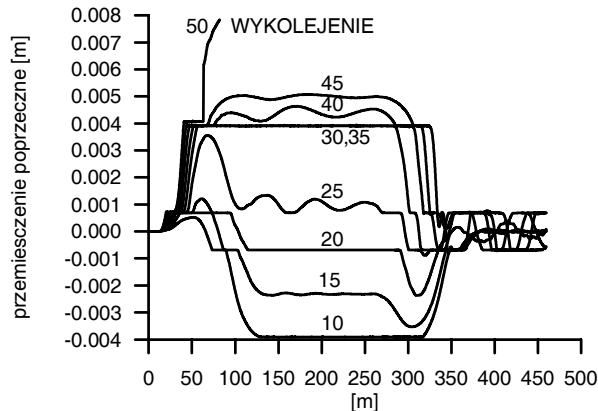
Tabela 3. Statystyczne wartości współczynnika wykolejenia dla różnych wartości prędkości (odcinek I – stan utrzymania dobry)

Profil szyny	Prędkość pojazdu km/h	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Minimum	Maksimum
Nominalny	100	$1,555227 \cdot 10^{-2}$	$1,744919 \cdot 10^{-2}$	$1,249696 \cdot 10^{-5}$	0,0603197
Zużyty		$1,108033 \cdot 10^{-2}$	$1,089513 \cdot 10^{-2}$	$6,924716 \cdot 10^{-6}$	0,0980537
Nominalny	120	$2,726446 \cdot 10^{-2}$	$2,914265 \cdot 10^{-2}$	$3,121459 \cdot 10^{-5}$	0,3064719
Zużyty		$1,052538 \cdot 10^{-2}$	$7,141562 \cdot 10^{-3}$	$7,578139 \cdot 10^{-6}$	0,0875615
Nominalny	140	0,0354915	$3,941184 \cdot 10^{-2}$	$5,356059 \cdot 10^{-5}$	0,3128122
Zużyty		$1,042638 \cdot 10^{-2}$	$9,243561 \cdot 10^{-3}$	$8,278639 \cdot 10^{-6}$	0,0936635
Nominalny	160	$3,740472 \cdot 10^{-2}$	0,0502488	$2,972691 \cdot 10^{-5}$	0,3616988
Zużyty		$1,142686 \cdot 10^{-2}$	$1,071938 \cdot 10^{-2}$	$3,706912 \cdot 10^{-6}$	0,1003908
Nominalny	180	$3,488812 \cdot 10^{-2}$	$3,966604 \cdot 10^{-2}$	$4,443873 \cdot 10^{-5}$	0,3742029
Zużyty		$1,120642 \cdot 10^{-2}$	$1,200326 \cdot 10^{-2}$	$1,217103 \cdot 10^{-5}$	0,1078978
Nominalny	200	$3,558432 \cdot 10^{-2}$	0,041684	$1,300649 \cdot 10^{-5}$	0,3826907
Zużyty		$1,120316 \cdot 10^{-2}$	0,0134636	$5,723574 \cdot 10^{-6}$	0,1159221
Nominalny	220	$3,134232 \cdot 10^{-2}$	$3,191267 \cdot 10^{-2}$	$8,868518 \cdot 10^{-7}$	0,4246992
Zużyty		$1,591883 \cdot 10^{-2}$	$1,978388 \cdot 10^{-2}$	$3,777855 \cdot 10^{-6}$	0,1403947

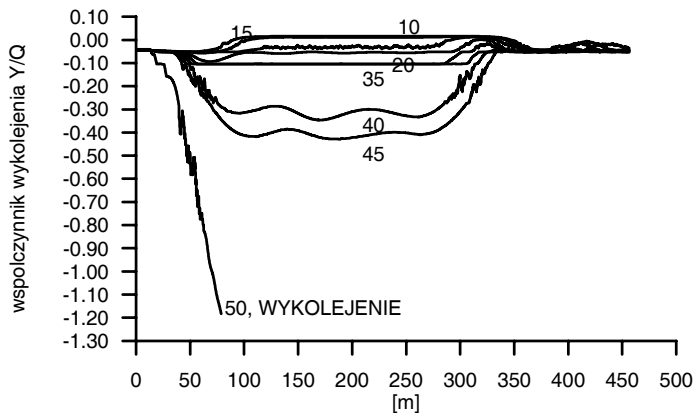
Tabela 4. Statystyczne wartości współczynnika wykolejenia dla różnych wartości prędkości (odcinek II – stan utrzymania średni)

Profil szyny	Prędkość pojazdu km/h	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Minimum	Maksimum
Nominalny	100	$2,481951 \cdot 10^{-2}$	$2,268162 \cdot 10^{-2}$	$2,136889 \cdot 10^{-5}$	0,0974044
Zużyty		$1,140129 \cdot 10^{-2}$	0,0109714	$1,546159 \cdot 10^{-5}$	0,1184749
Nominalny	120	$2,960531 \cdot 10^{-2}$	$2,587508 \cdot 10^{-2}$	$1,166395 \cdot 10^{-6}$	0,2865431
Zużyty		$1,334342 \cdot 10^{-2}$	$5,181706 \cdot 10^{-2}$	$6,074561 \cdot 10^{-6}$	0,246506
Nominalny	140	$3,227412 \cdot 10^{-2}$	$3,498697 \cdot 10^{-2}$	$3,693118 \cdot 10^{-5}$	0,3650298
Zużyty		$1,449718 \cdot 10^{-2}$	$1,942947 \cdot 10^{-2}$	$1,617551 \cdot 10^{-6}$	0,3356967
Nominalny	160	$3,441187 \cdot 10^{-2}$	$4,141587 \cdot 10^{-2}$	$1,972741 \cdot 10^{-5}$	0,4195569
Zużyty		0,0149174	$4,823494 \cdot 10^{-2}$	$1,401016 \cdot 10^{-6}$	2,0279 Wykolejenie
Nominalny	180	$3,674157 \cdot 10^{-2}$	$4,647227 \cdot 10^{-2}$	$2,376732 \cdot 10^{-5}$	0,6795569
Zużyty		Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie
Nominalny	200	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie
Zużyty		Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie
Nominalny	220	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie
Zużyty		Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie	Wykolejenie

Wpływ prędkości na wartość współczynnika wykolejenia zostanie pokazany na przykładzie wyników symulacji ruchu pojazdu po łuku regularnym o promieniu 800 m i przechyłce 10 cm. Całość trasy symulacji składa się z odcinka prostego o długości 30 m, krzywej przejściowej o długości 100 m, łuku regularnego o długości 150 m, wyjścia z łuku przez krzywą przejściową o długości 100 m. Wyniki badań symulacyjnych, dla prędkości 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 m/s, gdzie nastąpiło wykolejenie, są przedstawione na rys. 9. i 10.



Rys. 9. Przesunięcia poprzeczne zestawu kołowego w funkcji drogi

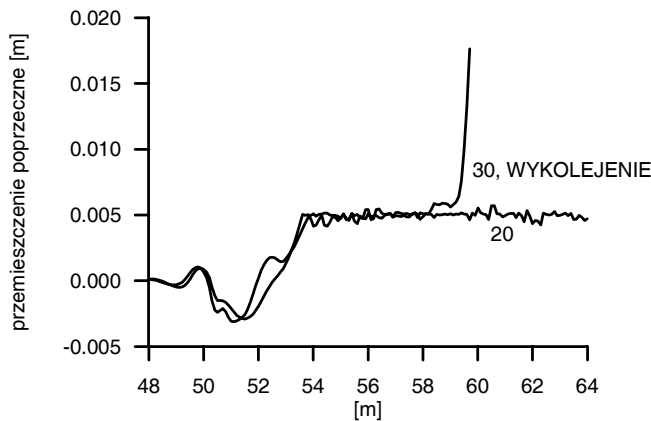


Rys. 10. Stosunek sił Y/Q na kole zewnętrznym w funkcji drogi

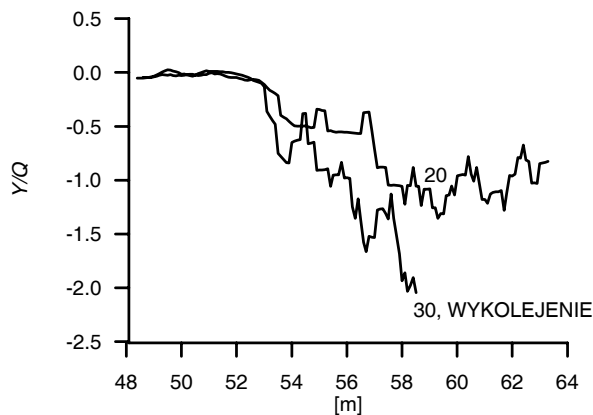
Na wykresach tych można zaobserwować efekt zbyt małej prędkości na łuku z przechyłką, gdzie dla prędkości $v = 10$ m/s położenie zestawu kołowego jest bliskie kontaktowi koła z obrzeżem na wewnętrznym toku szynowym, jak i efekt zbyt dużej prędkości. Dla prędkości $v = 50$ m/s dochodzi do wykolejenia.

5. Stan utrzymania podsypki i podtorza [15]

Zjawisko „zawieszonego podkładu”, stwarzające niebezpieczeństwo wyko-
lejenia, może być spowodowane nieodpowiednim drenażem podsypki lub grun-
tu. Przejeżdżający pociąg powoduje wówczas zasysanie wody w jedno miejsce
toru, gdzie następuje utrata przez podsypkę jej cech mechanicznych (utrata
sztywności) i efekt analogiczny do zawieszonego podkładu (tzw. „wychlapka”).
Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wyniki symulacji ruchu pojazdu szynowe-
go przez obszar „zawieszonego podkładu”. Efekt taki uzyskano zmniejszając
lokalnie sztywność zastępczą toru, po jednej stronie toku szynowego. Wyniki
symulacji przedstawiono dla dwóch prędkości pojazdu 20 m/s i 30 m/s.



Rys. 11. Przesunięcia poprzeczne zestawu kołowego przy przejeździe przez „zawieszony podkład” (prędkość pojazdu 20 m/s i 30 m/s)



Rys. 12. Stosunek sił Y/Q przy przejeździe przez „zawieszony podkład” (prędkość pojazdu 20 m/s i 30 m/s)

Model symulacyjny wskazuje na niebezpieczeństwo wykolejenia przy prędkości ok. 30 m/s

Również zły stan utrzymania podtorza może mieć wpływ na wykolejenie. Dotyczy to oddziaływań erozyjnych szczególnie na nasypach kolejowych.

Wnioski

Wnioski związane z rozważanymi w artykule problemami można ująć w następujących punktach:

1. Zwiększenie prędkości podróżowania wymaga stałego monitorowania stanu toru.
2. Jakość toru ma znaczący wpływ na dynamikę zestawów kołowych, a w konsekwencji na bezpieczeństwo i komfort jazdy po torze dobrze utrzymanym.
3. Badania symulacyjne są użytecznym narzędziem do analizy stanu bezpieczeństwa pojazdu szynowego w zależności od stanu toru (podtorza) i pojazdu.

Bibliografia

1. DOT/FRA/ORD-04/16: On-line high-speed rail defect detection, 2004.
2. Grassie, S. L., Kalousek J.: Rolling contact fatigue of rails: characteristics, causes and treatments, Proceedings of 6th International Heavy Haul Conference, The International Heavy Haul Association, Cape Town, South Africa 1997, pp. 381–404.
3. Olofsson, U., Nilsson, R.: Surface cracks and wear of rail: A full-scale test on a commuter train track, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2002; Volume 216: 4, pp. 249–264.
4. Esveld, C.: Modern railway track, Delft: MRT-Productions, 2001,
5. Doherty, A., Clark, S., Care, R., Dembosky, M.: Why Rails Crack?, Ingénia, Issue 23, June 2005.
6. Nielsen, J.C., Johansson, A.: Out-of-round railway wheels – a literature survey, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 214, No 2/2000.
7. Chudzikiewicz, A., Sowiński, B.: Running safety assessment of railway vehicles using computer simulation methods, Proceedings of 8th International Conference on Running Gears, Budapest Hungary, 2007.
8. DOT/FRA/ORD-01/05: Safety of railroad passenger vehicle dynamics, 2002
9. Chudzikiewicz, A., Drożdźiel, J., Sowiński, B.: The influence of wheel and rail rolling surfaces wear on railway vehicle dynamics. Proc. CSME Forum – 2004. The University of Western Ontario, Canada, June 1-4, 2004.
10. Sowiński B.: Zagadnienia aproksymacji i dyskretyzacji w badaniach symulacyjnych dynamiki toru i pojazdu szynowego, Oficyna Wydawnicza P.W. 2007.

11. Kish A., Samavedam G.: Risk analysis based CWR track buckling safety evaluations, Proceedings of International Conference on Innovations in the Design & Assessment of Railway Track, Delft University of Technology, The Netherlands, Dec. 2–3, 1999.
12. Zaremski A.M., Grissom G.T., Lees Jr. H.M.: Assessing the risk of track buckling: to reduce the risk of track buckles, Railway Track and Structures, 2005.
13. Zaremski A.M. Forecasting of track component lives and its use in track maintenance planning, Heavy Haul Railway International Conference, Vancouver, Canada, 1991.
14. DOT/FRA/ORD-97/02: Analyses of track shift under high-speed vehicle-track interaction, 1997.
15. Projekt badawczy nr 4 T12C 006 30: Predykcja długookresowych zmian parametrów toru kolejowego powstających w procesie eksploatacji, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 2008.

Recenzent:
Andrzej GRZYB

Emergencies in Railway Vehicle Run Due to State of Track Maintenance

Key-words

Railway track geometry, velocity, ballast, track maintenance condition.

Summary

This paper presents the simulation tools application to study the danger events connected with the railway vehicle derailment. Listed are the main reasons of train derailments, and discussed are the most often criteria of derailment. Simulation studies were concentrated on the situation having the source in track imperfections.

Studies took into account track geometry imperfections, exceeding the railway vehicle permissible velocity limits and the ballast maintenance state. The idea of track geometrical imperfections was exceeded in this paper, and the geometrical irregularities cover deviations of rail profiles from nominal dimensions.

Emergencies of derailment connected to the track maintenance state was investigated based on the local changes of ballast mechanical properties caused by insufficient drainage.

The calculations were done using the model of a typical passenger car with linear spring and damping suspension parameters.