



Planowanie szlifowania szyn w torach kolejowych

HENRYK BAŁUCH

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Katedra Inżynierii i Komunikacji, 00-908 Warszawa, ul. S Kaliskiego 2

Streszczenie. Podstawowym celem szlifowania szyn jest usuwanie ich wad, głównie zużycia falistego i rys, które tworzą się wskutek zmęczenia na styku koła z szyną. Szlifowanie jest więc procesem polegającym na usuwaniu stali z wierzchu główki szyny za pomocą materiału ściernego. Zużycie faliste i pozostałe uszkodzenia eksploatacyjne stanowią źródło nadmiernych oddziaływań dynamicznych przenoszących się nie tylko na szyny, lecz na całą konstrukcję nawierzchni i na pojazdy szynowe. Obserwacje wykazują, że rysy mogą prowadzić do pęknięć szyn. Główną zaletą szlifowania, stosowanego od przeszło 80 lat jest usuwanie falistości powierzchni szyn i usuwanie ich nadpęknięć. Prawdopodobną przyczyną narastania rys i zużycia falistego w ostatnich latach są zjawiska zmęczenia kontaktowego powodowanego przez wózki mające zestawy kołowe o większej sztywności skrętnej oraz nierówności na kołach, takie jak poligonizacja. Technika pomiaru i obserwacji rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych jest opanowana na większości kolei i ciągle doskonała. Szlifowanie szyn musi być jednak stosowane z rozwagą i z właściwym zrozumieniem wynikających z niego korzyści oraz ograniczeń. Zasadniczym warunkiem szlifowania jest więc obecnie dobry program zarządzania, przede wszystkim zaś — właściwa metoda planowania napraw. Celem artykułu jest przedstawienie proponowanej metody planowania szlifowania szyn. Metoda ta jest oparta na analizie danych zebranych przez autora i jego zespół badawczy z licznych badań. Eksperymenty były prowadzone z użyciem specjalnego pociągu na torach o różnych rozmiarach falistego zużycia. Przedstawiono procedurę planowania szlifowania szyn oraz określono odchyłki dopuszczalne zużycia falistego, uzależnione od amplitud i długości fal.

Słowa kluczowe: droga kolejowa, szlifowanie szyn, zużycie faliste, rysy na szynach

Symbole UKD: 625.17

1. Wstęp

Rozwój pasażerskich przewozów kolejowych zależy od prędkości przemieszczania się. Dowiodły tego doświadczenia krajów, w których zbudowano linie kolejowe przeznaczone do prędkości pociągów 300-350 km/h. Uzyskiwane na tych

liniach prędkości handlowe¹ przekraczające 200 km/h stwarzają konkurencję dla przewozów lotniczych na odległościach do 600-800 km.

W Polsce jest tylko jedna linia — Centralna Magistrala Kolejowa o długości 224 km, zbudowana w latach siedemdziesiątych minionego stulecia, łącząca Grodzisk Mazowiecki z Zawierciem, mająca układ geometryczny umożliwiający jazdę pociągów z prędkością 250 km/h. W ostatnich latach podjęto działania zmierzające do zaprojektowania i budowy linii oznaczonej symbolem Y, która ma przejść przez Łódź i połączyć Warszawę z Poznaniem oraz Wrocławiem. Każdy z wariantów tej linii przekracza 500 km. Przewiduje się na niej maksymalną prędkość 350 km/h [21].

Jedną z podstawowych cech linii kolejowych przeznaczonych do dużych prędkości pociągów jest konieczność bardzo dokładnego utrzymania nawierzchni. Przy prędkości pociągów 300 km/h nieprzekroczenie granicznej wartości hałasu 70 dB(A) wymaga m.in. usuwania z powierzchni tocznej szyny nierówności 0,02 mm [28]. Wśród licznych procesów technologicznych budowy oraz napraw torów kolejowych i tramwajowych coraz większego znaczenia nabiera proces szlifowania szyn. Do tego celu służą zestawy maszyn szlifierskich przemieszczających się po torze nazywane — od swej długości przekraczającej nawet 100 m — pociągami do szlifowania szyn [13]. Prędkość robocza takiego pociągu w zależności od liczby ściernic waha się od kilku do kilkunastu km/h. Trwają jednak prace nad pociągami do szlifowania z prędkością 80-100 km/h [29, 14, 30]. Cały proces jest sterowany komputerowo, a dokładność obróbki przekroju szyn leżących w torze wynosi 0,01 mm. Proces ten musi również spełniać wymagania ekologiczne i tak np. produkty ścierania, tzn. materiał kamieni szlifierskich oraz opiłki stali nie mogą spadać na tor i są zasysane do specjalnych worków. Doświadczenia wielu kolei dowodzą, że szlifowanie szyn przedłuża ich eksploatację o 50-100% [31].

Szlifowanie szyn jest przedsięwzięciem wymagającym starannego zaplanowania. Wynika to z konieczności sprowadzenia pociągów do szlifowania szyn, zamknięć torów na czas wykonywania tej pracy i znacznych kosztów. Podstawą planowania są pewne wartości graniczne, przy których zabieg szlifowania jest konieczny. Zagadnieniom tym poświęcono wiele prac w Polsce i za granicą, np. [3, 4, 11]. Artykuł niniejszy przedstawia opracowaną ostatnio metodę planowania szlifowania szyn. Praca ta wpisuje się w cykl licznych opracowań dotyczących zarządzania eksploatacją nawierzchni szynowych z zastosowaniem systemów komputerowych. Znane są poglądy, że stosowanie takich systemów pozwala uzyskać oszczędność zasobów szacowanych na 20-30% [22].

¹ Prędkość handlową oblicza się, przyjmując czas między odjazdem pociągu ze stacji początkowej i przyjazdem do stacji końcowej, tzn. wliczając również czasy postojów na stacjach pośrednich oraz wydłużenie czasu na rozpęd i hamowanie. W roku 2008 największa prędkość handlowa wynosi 279 km/h we Francji na linii Lorraine-Champagne, przy prędkości maksymalnej 320 km/h.

2. Zjawiska degradacji szyn wymagające ich szlifowania

2.1. Uwagi ogólne

Przyczyną degradacji nawierzchni kolejowej są oddziaływania dynamiczne i siły przyrody. Szyny i koła pojazdów szynowych podlegają ścieraniu, odkształceniom plastycznym oraz zmęczeniu. Na rozwój tych procesów wywiera wpływ wielkość oddziaływań dynamicznych, zależna w dużym stopniu od cech konstrukcyjnych i stanu pojazdów szynowych [8]. Skutkiem tych procesów jest zmniejszanie przekroju poprzecznego szyn, zużycie faliste i uszkodzenia kontaktowo-zmęczeniowe [16].

W ciągu ostatnich 30-40 lat wykonano wiele badań nad procesem rozwoju uszkodzeń szyn, budując liczne modele stochastyczne oparte na danych historycznych. Podejście takie jest szczególnie przydatne w okolicznościach, gdy nie są wystarczająco znane szczegółowe warunki eksploatacji. Bardziej złożone modele uwzględniające siły na styku koła z szyną opracowywano, wykorzystując pakiety oprogramowania ADAMS/Rail, MEDYNA, Vampire, GenSys, NUCARS. Modele te zakładają stosunkowo proste obciążenia, podczas gdy w rzeczywistości są one bardzo różnorodne.

Obserwacje nawierzchni prowadzone w kraju [4, 8] i za granicą [9, 14, 15, 17, 25] uzasadniają przyjęcie podziału występujących w niej zjawisk i procesów degradacji, których usunięcie wymaga szlifowania szyn na:

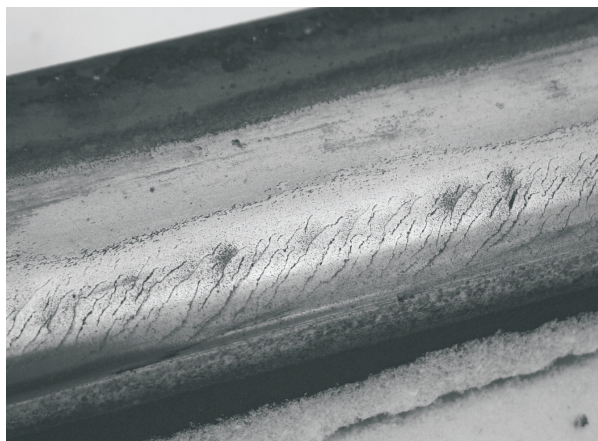
- 1) uszkodzenia kontaktowo-zmęczeniowe,
- 2) zużycie faliste.

2.2. Uszkodzenia kontaktowo-zmęczeniowe

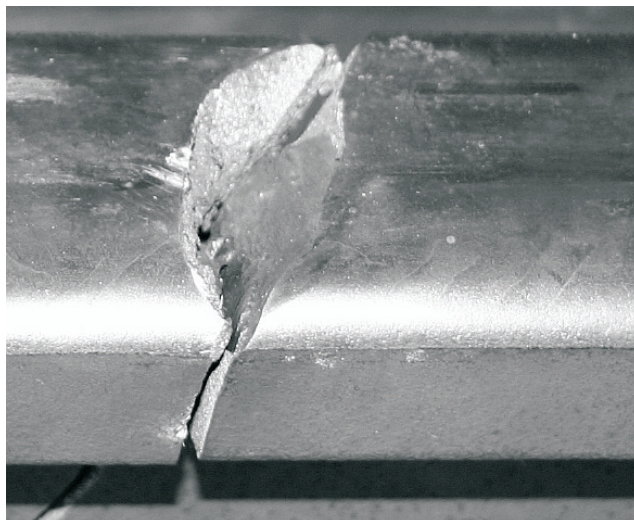
Zjawiskiem nastroczającym coraz więcej obaw w eksploatacji nawierzchni kolejowej są rysy zwane też nadpęknięciami (*head-checks*), pojawiające się na wielu odcinkach torów, przeważnie w tokach zewnętrznych łuków (rys. 1). Tego rodzaju nadpęknięcia stały się powodem głośnej katastrofy w Hadfield, w październiku 2000 roku. W najbliższych latach nadpęknięcia i rysy będą stanowiły przedmiot największego zainteresowania kolei [2].

Rysy te są wynikiem splotu dużych normalnych i stycznych naprężeń powodujących przesunięcia powierzchniowych warstw stali szynowej lub przekroczenie granicy plastyczności. Taka mikroskopowa rysa rozwija się następnie pod niewielkim kątem do powierzchni główki. Woda i inne zanieczyszczenia środowiska, przedostające się do szczelin, zmniejszają występujące między nimi tarcie, powodując, że szczeliny te wzajemnie się przesuwają. W skrajnych przypadkach może dojść do pęknięcia szyny rozwijającego się od takich rys (rys. 2).

Innym rodzajem uszkodzeń zmęczeniowych są trwałe odkształcenia powierzchni główki szyny, które nieusuwane w porę pogłębiają się do tego stopnia,



Rys. 1. Rysy na główce szyny

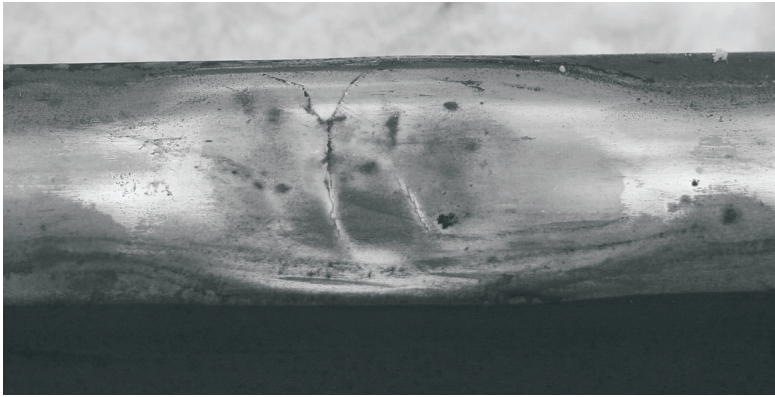


Rys. 2. Pęknięcie szyny rozwijające się od rys; ciemna plama na prawym odcinku świadczy o rozwijającym się pęknięciu zmęczeniowym

że ich usunięcie drogą szlifowania byłoby zbyt kosztowne (pociąg do szlifowania szyn za jednym przejazdem usuwa warstwę stali rzędu 0,1 mm). Zagłębienie takie przedstawia rysunek 3.

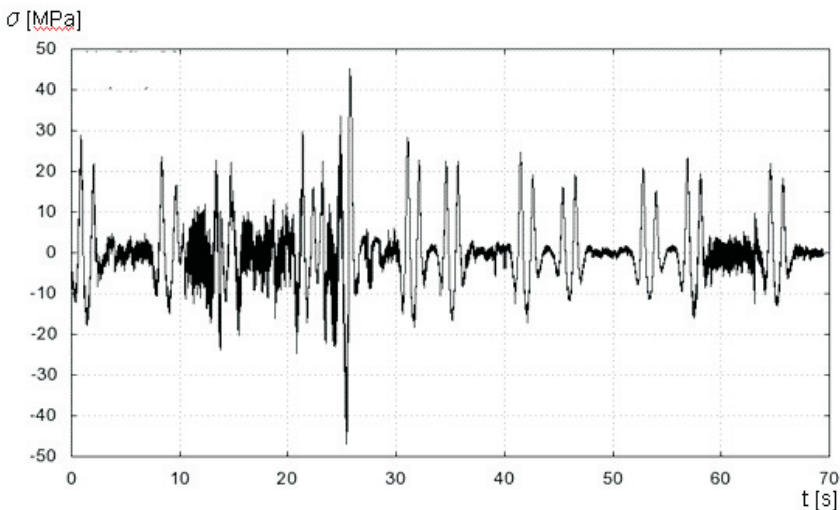
Uszkodzenia zmęczeniowe szyn można obserwować na miejscu podczas przeglądów technicznych lub na obrazach rejestrowanych przez wagony pomiarowe jadące z prędkością 25-250 km/h [10, 19].

Przyczyną takich lub podobnych zagłębień są zwykle wady materiału, rzadziej zaś nadmierne oddziaływania źle utrzymanych pojazdów szynowych. W tym



Rys. 3. Odształcenie główki szyny o głębokości 3,5 mm z widocznymi wykruszeniami

drugim przypadku naciski dynamiczne na szyny, a co za tym idzie — naprężenia kontaktowe, mogą być 2-3 razy większe od oddziaływań pojazdów należycie utrzymanych. Przykładem takiego zwiększenia oddziaływań zaczerpniętym z badań [8] może być rysunek 4. Uwidocznione na nim naprężenia w stopkach szyn pod wpływem lekkich pojazdów zostały pomierzone w warunkach quasistatycznych, tj. przy prędkości pociągu 6 km/h. Są one stosunkowo małe, warto jednak zwrócić uwagę, że drugi zestaw kołowy trzeciego wagonu powoduje impulsy (*peak to peak*) równe 90 MPa, tj. dwa razy większe od naprężeń w trzech ostatnich wagonach, w których podwozia były należycie utrzymane.



Rys. 4. Naprężenia w stopce szyny położonej w toku wewnętrznym łuku o promieniu 300 m; na osi odciętych czas przejazdu przez stanowisko pomiarowe

Na powstawanie uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych, podobnie jak na tworzenie się deformacji kół pojazdów szynowych, wywierają wpływ czynniki, którymi trudno jest sterować. Jednym z najważniejszych jest tu tarcie występujące podczas toczenia się koła po szynie, decydujące o przenoszonej sile [25]. Od tego tarcia zależą też warunki, w których powstaje niestabilny ruch wywołujący hałas i sprzyjający poligonizacji kół.

Zjawiska na styku koła z szyną można rozpatrywać w skali makro i mikro. W skali makro przy nacisku koła 50-100 kN i promieniu koła 0,5 m powierzchnia kontaktu ma średnicę, która może dochodzić do 0,1 m. Maksymalne naprężenie w środku kontaktu wynosi ok. 500 MPa. W skali mikro uwzględnia się nierówności na powierzchni koła i szyny. W tych warunkach strefa kontaktu waha się od 0,2 do 0,5 powierzchni nominalnej, a maksymalne naprężenia w kontakcie w skali mikro wynoszą 1000-2500 MPa. Również temperatury występujące na styku koła z szyną należy rozpatrywać w skali makro i mikro. W skali makro, tj. przy styku hertzowskim, średnia temperatura nie przekracza 150 K, a temperatura maksymalna 450 K. Temperatura w mikrokontaktach jest znacznie wyższa i osiąga 1000 K, wpływając znacząco na siły tarcia.

Symulacja komputerowa wykonywana przy zastosowaniu amerykańskiego oprogramowania WRTOL (*Wheel/Rail Tolerance*) wykazuje rozrzuty naprężeń na styku koła z szyną od 1000 do 5000 MPa, z tym że większość wyników oscyluje wokół 2000 MPa [32]. Z badań [15] wynika, że samo zwiększanie twardości stali szynowej nie jest środkiem zmniejszającym występowanie uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych.

Wyniki obserwacji zebrane przez autora i jego zespół w zestawieniu z wynikami badań naprężeń własnych szyny, które przekraczają w główce 200 MPa pozwalają wysunąć hipotezę, że powodem powstawania zagłębień i wykruszeń są procesy zmęczeniowe w górnej warstwie główek szyn powodowane szybkozmiennym przejściem od naprężeń własnych rozciągających do dużych naprężeń ściskających w kontakcie koła z szyną pod wpływem impulsów sił pochodzących od kół mających nadmierne zużycie.

Naprężenia własne powstające podczas produkcji szyn ulegają zmianie w strefie styku i w środku główki stają się naprężeniami rozciągającymi, co może doprowadzić do powstania i rozwoju uszkodzeń.

2.3. Faliste zużycie szyn

Zużycie faliste szyn, znane od ponad 100 lat, jest wynikiem złożonych zjawisk na styku koła z szyną. Wzrost falistego zużycia szyn dał się zauważyć po wprowadzeniu wagonów pasażerskich o mniejszych naciskach osi, lecz o większej sztywności skrętnej wózków i zastosowaniu twardszej stali w szynach i kołach. Istnieje wiele hipotez na temat genezy falistego zużycia szyn, przy czym są to niejednokrotnie hipotezy przeciwstawne. Z nowszych prac wynika, że różne formy falistego zużycia szyn zależą od superpozycji drgań pochodzących od sąsiednich kół wywołujących zjawiska rezonansowe [20, 18].

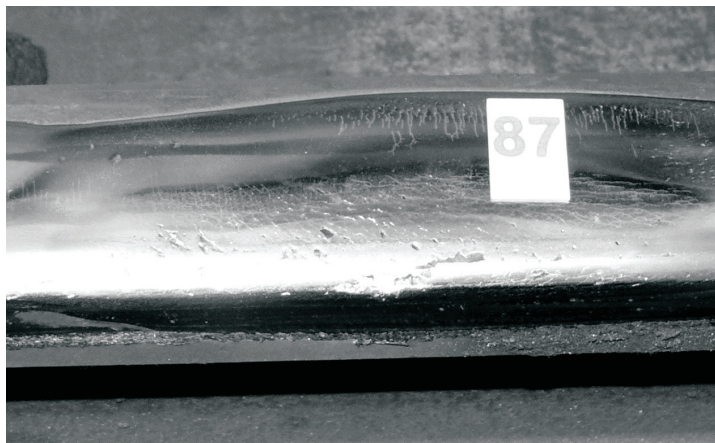
Wyniki prowadzonych badań doprowadziły już do określenia czynników, od których zależy powstawanie falistego zużycia szyn. W odniesieniu do pojazdów szynowych są to wady na powierzchni tocznej kół, stosunek nacisku koła do jego średnicy, masa nieusprężynowana, rozstaw osi i hamulce klockowe. Wśród cech nawierzchni wymienia się nierówności toków szynowych, osłabienie przytwierdzeń i naprężenia własne szyn. Warunkiem najbardziej sprzyjającym powstawaniu zużycia falistego jest jednolity ruch pociągów z prędkościami bardzo mało zróżnicowanymi i jednakowym typem pojazdów szynowych. Bardzo szybki rozwój falistości występuje na kolejach podziemnych w nawierzchni bezpodsypkowej i na podsypce, o czym świadczą doświadczenia metra w USA, Rosji, Paryżu, Londynie, Hong-Kongu. Znane są przypadki z USA kiedy to wprowadzenie nowego taboru spowodowało zanik zużycia falistego szyn [18]. Doświadczenia krajowe są inne, znane są bowiem przypadki, gdy nowy typ taboru wzmagał rozwój falistości szyn [8].

Tworzeniu się falistego zużycia na szynach nowych, nieszlifowanych sprzyja też niewidoczna gołym okiem falistość górnej warstwy odwęglonej powstająca w czasie ich produkcji.

Dominującą postacią falistego zużycia szyn w Polsce jest zużycie o falach krótkich (30-100 mm) [3, 4, 5]. Fale krótkie (rys. 5) pojawiające się z reguły na odcinkach prostych oraz w toku wewnętrznym łuku wywołują drgania szyn, które nie są wystarczająco tłumione przez przytwierdzenia. Fale średnie (rys. 6) pojawiają się na odcinkach toru o jednolitym ruchu pociągów (prędkość, nacisk osi, kierunek jazdy) i występują rzadziej niż fale krótkie. Głębokość fal średnich, mających długość 100-300 mm w rzadkich przypadkach dochodzi do 0,2 mm. Warto dodać dla porównania, że podobną głębokość osiągają fale krótkie.

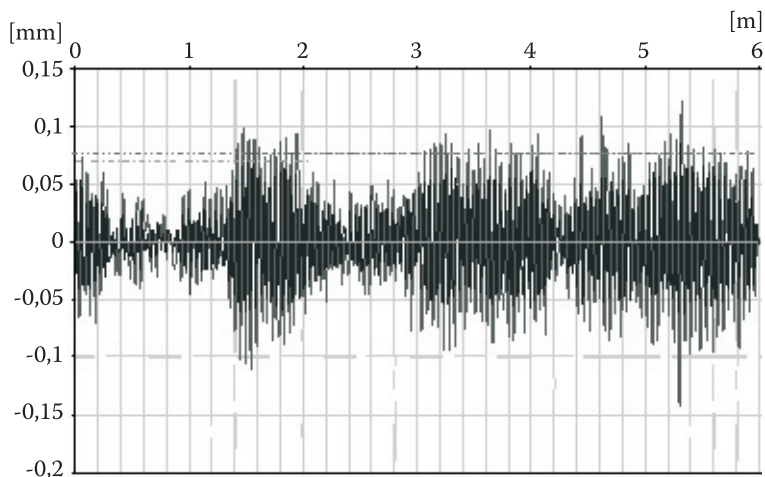


Rys. 5. Zużycie faliste szyn o falach krótkich; jasne pasma to wyniosłości, ciemne — zagłębienia

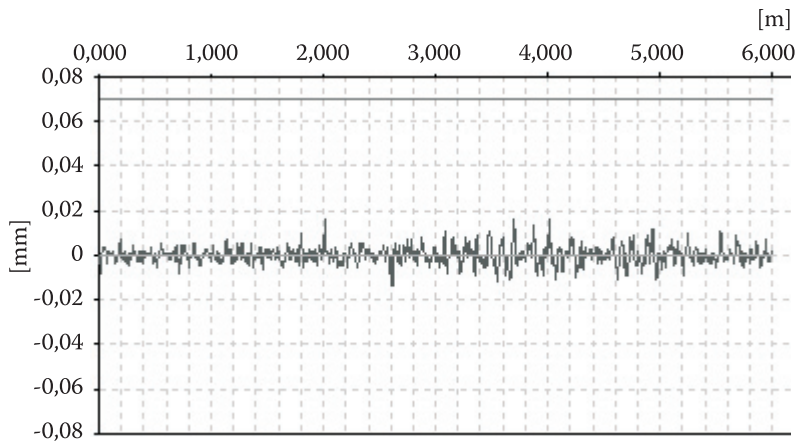


Rys. 6. Zużycie faliste szyn o falach długich

Faliste zużycie szyn jest powodem sił oddziaływujących na nawierzchnię i części jezdne pojazdów szynowych z wysoką częstotliwością. Siły te mają znaczący wpływ na uszkodzenia przytwierdzeń i przyspieszają degradację szyn [8]. Wpływ ten można zilustrować na przykładzie badań prowadzonych w torze o dużym zużyciu falistym (rys. 7) oraz w torze o takiej samej konstrukcji i układzie geometrycznym bez falistego zużycia szyn (rys. 8). W pierwszym przypadku amplituda fal krótkich przekraczała w licznych przypadkach 0,1 mm, a ich maksymalna głębokość (*peak to peak*) wyniosła 0,26 mm, w drugim pomierzone fale miały amplitudy rzadko przekraczające 0,01 mm, co uznaje się za brak falistości i czego nie dostrzega się na powierzchni tocznej szyny w postaci ciemnych i jasnych plam.

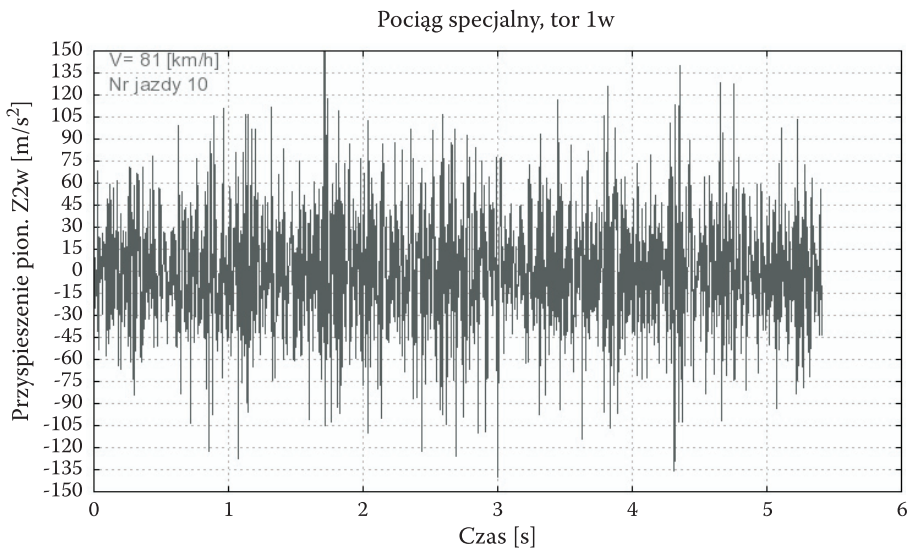


Rys. 7. Duże faliste zużycie szyn w toku wewnętrznym łuku o promieniu 300 m



Rys. 8. Bardzo małe amplitudy fal w toku wewnętrznym łuku o promieniu 300 m uznawane za brak zużycia falistego

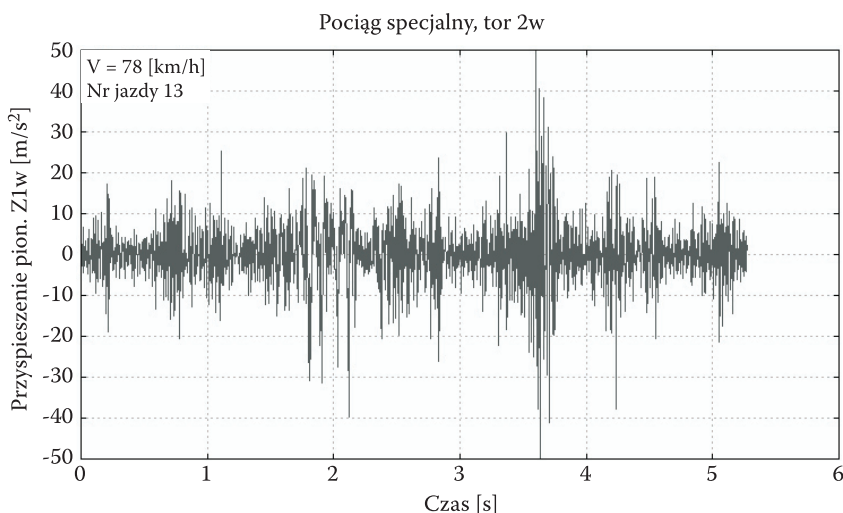
Wyniki badań przyspieszeń pionowych pomierzonych w szynach na odcinku toru mającym falistość pokazaną na rysunku 7 przedstawia rysunek 9². Amplitudy przyspieszenia drgań przekraczają tu często 100 m/s^2 . Na odcinku bez zużycia falistego, który jest przedstawiony na rysunku 8 przyspieszenia drgań pionowych



Rys. 9. Przyspieszenia pionowe w szynach na odcinku toru o zużyciu falistym pokazanym na rysunku 7

² Pomiarzy drgań i naprężeń zostały przeprowadzone przez Laboratorium Dynamiki Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa wg założeń przygotowanych przez autora.

szyny są kilkakrotnie mniejsze (rys. 10). Największa amplituda 50 m/s^2 została spowodowana przez ten sam zestaw kołowy, który wywołał największy impuls naprężeń pokazany na rysunku 4. Podobne różnice występują również w przyspieszeniach drgań poziomych pomierzonych w szynach.



Rys. 10. Przyspieszenia pionowe w szynach na odcinku toru pokazanym na rysunku 8 (bez zużycia falistego szyn)

Przyspieszenia drgań tego rzędu jak pokazane na rysunku 9 powodują nie tylko bardzo uciążliwe pogorszenie klimatu ekologicznego (hałas, wibracje), lecz skutkują również bardzo wyraźnym przyspieszeniem degradacji nawierzchni szynowej. Ocenia się, że zużycie faliste szyn zwiększa koszty utrzymania nawierzchni o 30% [24]. W torach kolejowych na podsypce następuje jej rozluźnianie powodujące szybkie narastanie nierówności pionowych, w torach zaś na konstrukcjach płytowych (w metrze) następstwem takich drgań jest częste pękanie łapek przytwierdzających szyny do podkładek.

3. Graniczne wartości falistego zużycia szyn

3.1. Oceniane atrybuty

W opracowanej metodzie podstawą oceny zużycia falistego szyn na określonym odcinku toru są następujące parametry:

- a) wymiary fal, tj. odchylenie standardowe ich amplitud i długość obliczeniowa,

- b) wrażliwość otoczenia toru na uciążliwości powodowane istnieniem zużycia falistego, tj. na hałas i wibracje.

Obszerny przegląd kryteriów stosowanych przy określaniu granicznego zużycia falistego szyn zawarto w pracach [3] i [4], podając w nich również własny wzór określający głębokość fali, który został wykorzystany w systemie wspomagania decyzji, znanym pod akronimem DOSZ³ [5]. Wzór ten ma postać

$$z_{\max} = \frac{1,8v_{\max}\lambda}{V}, \quad (1)$$

gdzie: v_{\max} — prędkość pionowego przemieszczania się koła na falistym zużyciu szyn, zalecana dla fal o długości 50-300 mm jako 0,05 m/s;
 λ — długość fali w mm;
 V — prędkość pociągu w km/h.

Na podstawie tego wzoru dla często spotykanych fal na liniach kolejowych w Polsce, tj. 50-80 mm i przy prędkości 160 km/h otrzymuje się odpowiednio $z_{\max} = 0,028$ i $0,045$ mm. Są to wartości podobne do stosowanych na kolejach zagranicznych. I tak np. w Niemczech na liniach magistralnych graniczna głębokość falistego zużycia szyn wynosi 0,05 mm. Taka sama wartość obowiązuje w Rosji, podobna zaś w Holandii [11]. Na innych kolejach kryterium szlifowania jest również oparte na maksymalnych głębokościach odnoszonych do określonych przedziałów fal.

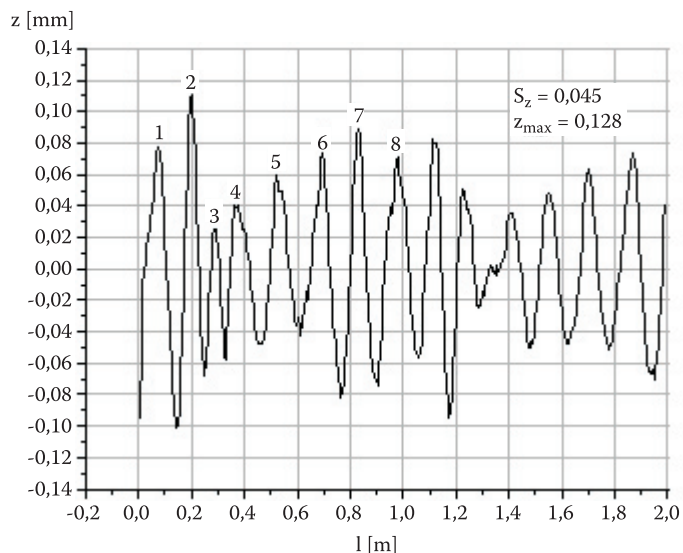
Kilkuletni okres obserwacji falistego zużycia szyn i ostatnie badania [8] wykazały, że zarówno posługiwanie się głębokością graniczną, jak i dokładne wiązanie jej z długością fali, mimo zasadności związku fizycznego, rodzi pewne trudności interpretacyjne. Na pierwszą taką trudność natrafiono już w roku 2004, wykonując porównania długości fal pomierzonych przyrządem ręcznym i dreżyną pomiarową SM 775 w 256 miejscach na czterech liniach kolejowych. Średnia długość fal mierzonych przyrządem ręcznym była w przybliżeniu 2 razy mniejsza niż dreżyną S 775. Bardzo małe były też współczynniki korelacji między pomiarami wykonanymi tymi dwoma sposobami (rzędu 0,1). Stwierdzenie tych różnic wymagało wprowadzenia zmian do systemu DOSZ [6].

Analizując wiele wyników pomiarów falistego zużycia szyn, stwierdzono, że pełniejszy obraz tego zjawiska uzyskuje się, podając odchylenie standardowe amplitud fal S_z . Graniczną wartość zużycia falistego dla poszczególnych przedziałów długości fal można więc wyrazić wartością odchylenia standardowego.

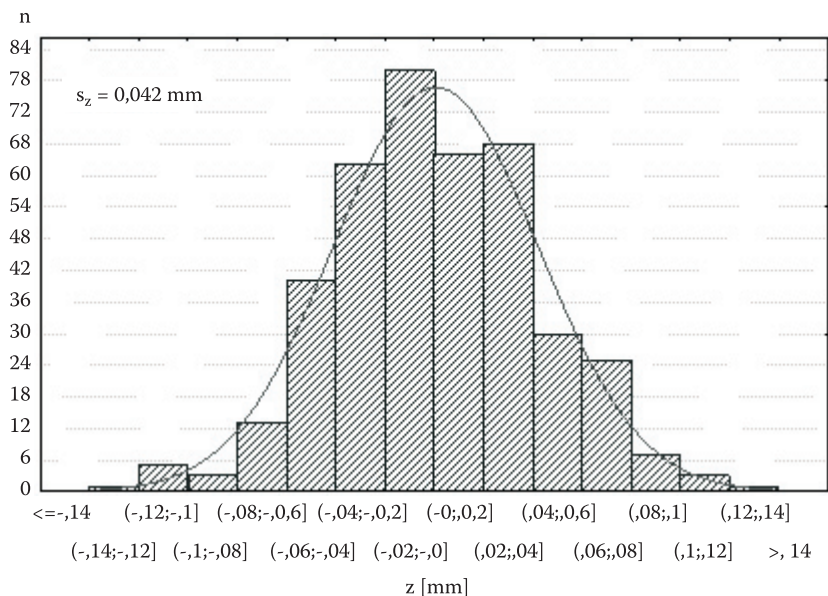
Obserwacje i pomiary falistego zużycia szyn na liniach kolejowych w Polsce i w Metrze Warszawskim [3], [8] wykazują, że najczęściej spotykanym przedziałem

³ Akronim od *Decyzje O Szlifowaniu Szyn*.

długości fal jest przedział 30-100 mm. Badania te wykazały również, że zarówno przy dużej, jak i małej falistości powierzchni szyn rozkład amplitud fal jest rozkładem normalnym, o czym mogą świadczyć rysunki 11 i 12.



Rys. 11. Bardzo duże zużycie faliste o falach krótkich



Rys. 12. Rozkład amplitud zużycia falistego przedstawione na rysunku 11

Długość fal, biorąc pod uwagę ich rozrzut, z wystarczającą dokładnością można oszacować na podstawie obserwacji lub wykonanych fotografii (w tym przypadku jako miarę przyjmuje się szerokość główki szyny równą 70 mm). Natomiast w zależności od typu urządzenia pomiarowego stosuje się jeden z następujących sposobów określania długości obliczeniowych fal:

- 1) bezpośredni odczyt wartości średniej,
- 2) zliczanie amplitud na długości 1 m (przykład na rysunku 11),
- 3) określanie długości na podstawie funkcji gęstości widmowej.

Dwa pierwsze sposoby nie wymagają wyjaśnień. Ich wadą w przypadku dużego zróżnicowania odległości między amplitudami jest niedoszacowanie wpływu fal krótszych, które wywołują większą częstotliwość drgań.

W celu wyznaczenia długości fali na podstawie funkcji gęstości widmowej konieczna jest znajomość próbkowania sygnału Δl . Oznaczając częstotliwość przez ω , otrzymujemy okres fali L ze wzoru

$$L = \frac{1}{\omega}. \quad (2)$$

Dominująca długość fali λ wynosi więc

$$\lambda = L\Delta l, \quad (3)$$

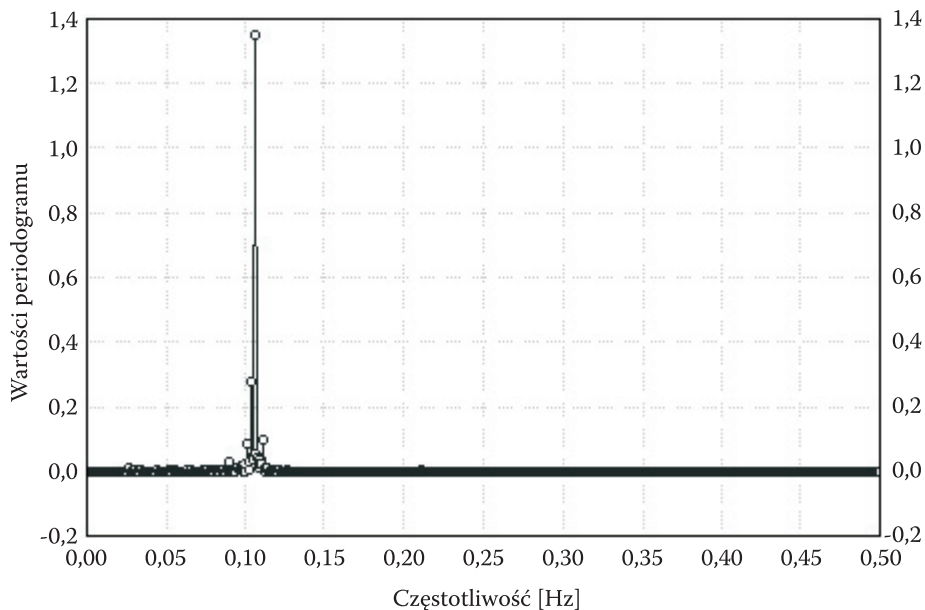
skąd po podstawieniu (2) do (3) otrzymuje się

$$\lambda = \frac{\Delta l}{\omega},$$

Interpretacja funkcji gęstości widmowej jest łatwa w przypadku dużego skupienia wartości szczytowych. Skrajnym przypadkiem jest tu rysunek 13 odzwierciedlający długość fal na odcinku toru pokazanym na rysunku 7. Wszystkie fale mają w tym przypadku długość 47 mm. Regularność ta jest bardzo niekorzystna, gdyż doprowadza do zjawisk rezonansowych.

Najczęściej jednak obraz funkcji jest podobny do przedstawionego na rysunku 14. W takim przypadku należy skupić uwagę na jednej z większych wartości z prawej strony. Wybór takiej wartości do obliczeń oznacza, że wyznaczone na tej podstawie odchyłki graniczne będą ostrzejsze, dzięki czemu nie powinno dojść do nadmiernego zużycia falistego. Na rysunku 14 maksymalna wartość amplitudy przypada na częstotliwość 0,13 Hz. W konkretnym przypadku dominującą długością fali, odpowiadającą częstotliwości 0,13 Hz jest

$$\lambda = \frac{0,005}{0,13} = 0,038 \text{ m} = 38 \text{ mm}.$$



Rys. 13. Funkcja gęstości widmowej zużycia szyn o falach skupionych wokół jednej długości ($\Delta l = 0,005$ m)

Warto zwrócić uwagę na bardzo duże różnice w wartościach obu periodogramów, na podstawie czego można się zorientować, że amplitudy zużycia falistego na odcinku toru, którego dotyczy rysunek 14 są dużo mniejsze niż na odcinku toru o falistości pokazanej na rysunku 7.

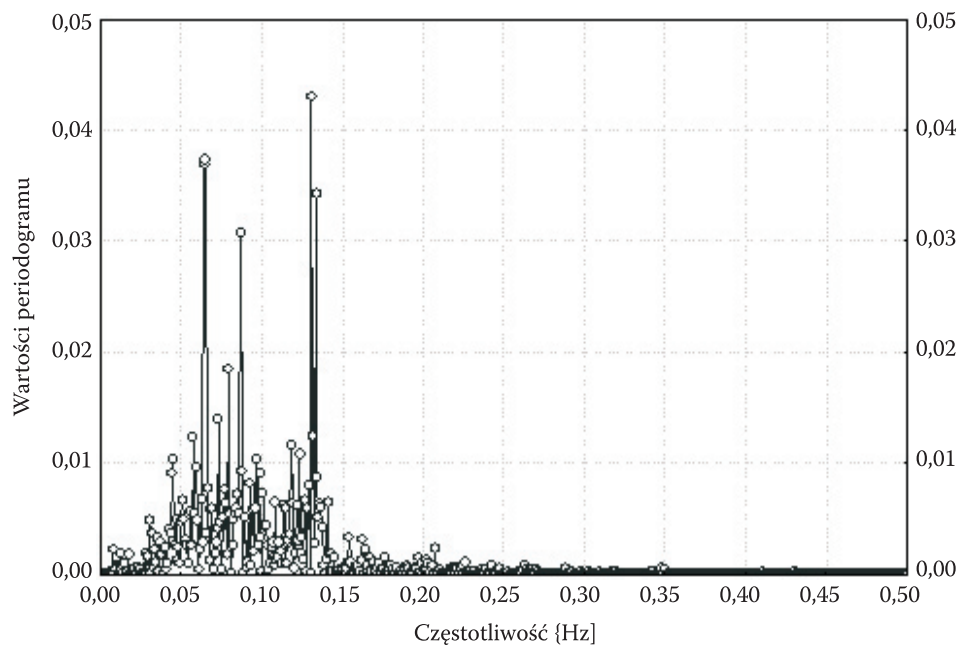
3.2. Kryterium graniczne

Na podstawie analiz kilkudziesięciu zbiorów pomiarów jako kryterium granicznego zużycia falistego szyn przyjęto odchylenie standardowe obliczane wg wzoru

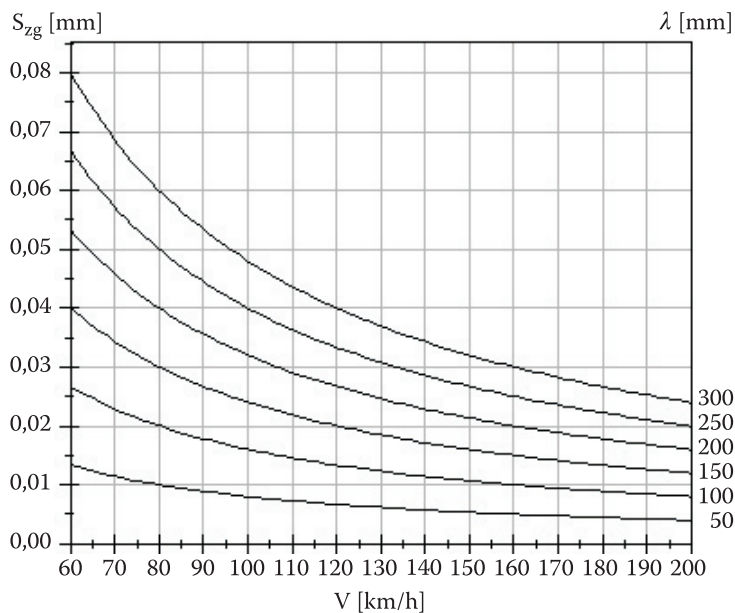
$$S_g = \frac{1,6 \cdot 10^{-2} \lambda \alpha_i}{V}, \quad (4)$$

gdzie α_i — współczynnik zależny od wrażliwości na drgania.

Z rysunku 15 przedstawiającego zależność (4) wynika, że przy często spotykanej długości fal 50 mm, w przedziale prędkości 160-200 km/h, funkcja ta jest wolno malejąca, z czego można wywnioskować, że graniczna wartość odchylenia standardowego 0,003 mm jest wystarczająca dla prędkości $V \geq 160$ km/h.



Rys. 14. Funkcja gęstości widmowej falistego zużycia szyn przy zróżnicowanej długości fal

Rys. 15. Graniczne wartości odchylenia standardowego przy $a_i = 1,0$

Zależnie od stopnia uciążliwości hałasu i drgań wywołwanego falistym zużyciem szyn, graniczną wartość odchylenia standardowego falistości modyfikuje się, mnożąc ją przez współczynniki a_i . W obecnej wersji systemu przyjęto następujące wartości tych współczynników:

- mała wrażliwość otoczenia na hałas i drgania $a_1 = 1,25$,
- przeciętna wrażliwość otoczenia na hałas i drgania $a_2 = 1,00$,
- duża wrażliwość otoczenia na hałas i drgania $a_3 = 0,90$.

3.3. Charakterystyka niektórych atrybutów zawartych w bazie wiedzy

Oprócz kryteriów liczbowych, w ocenie konieczności szlifowania szyn są uwzględniane cechy alternatywne, wśród których największe znaczenie mają uszkodzenia kontaktowo-zmęczeniowe oraz zużycie szyn. W tym celu wprowadzono 5 kategorii ocen tych uszkodzeń:

- 1) brak uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych,
- 2) widoczne rysy i nadpęknięcia (*head checks*) na zaokrągleniu główki szyny i powierzchni tocznej; brak bruzd i wykruszeń,
- 3) rysy i nadpęknięcia z widocznymi bruzdami, płytkie wykruszenia na zaokrągleniu główki szyny lub powierzchni tocznej o głębokości nie przekraczającej 1 mm,
- 4) głębokie wykruszenia na zaokrągleniu główki szyny lub powierzchni tocznej, bądź dłuższe ciemne zagłębienia o głębokości do 2,5 mm,
- 5) odłupania i zagłębienia na powierzchni tocznej lub shellingi na zaokrągleniu główki szyny o głębokości 3 mm i więcej.

Z kategoriami tymi są związane edytowane konkluzje słowne i tak np. przy stwierdzeniu kategorii 3. pojawi się tekst: *Usunięcie bruzd i płytkich wykruszeń wymaga zwykle 7-10 przejść pociągu szlifierskiego.*

4. Prognozowanie rozwoju zużycia falistego

Częstość badań szyn, określana w jednostkach obciążenia Q [Tg] lub czasu t [lat] różni się między poszczególnymi kolejami i jest ustalana empirycznie, np. co 20 Tg [16]. Na niektórych kolejach jest ona uzależniana od prędkości pociągów i tak np. w Rosji przy prędkościach 101-140 km/h ustalono normę 50 Tg, ponad zaś 140 km/h — 35 Tg [1]. Opracowana metoda ma zatem na celu określanie nie tylko potrzeb ewentualnego szlifowania w czasie, w którym jest zastosowana, lecz również prognozowanie tych potrzeb. Zawiera więc ona moduł analizowania intensywności zużycia w okresie oznaczonym kolejnym numerem i . Intensywność tę oblicza się ze wzoru

$$\delta_Q = \frac{S_{zi}}{Q} \quad (5)$$

lub

$$\delta = \frac{S_{zi}}{t} \quad (6)$$

gdzie: S_{zi} — odchylenie standardowe zużycia falistego w czasie t liczonym od chwili ułożenia szyn lub po przeniesieniu od tego czasu obciążenia $Q = qt$;
 q — natężenie przewozów [Tg/rok].

Czas lub obciążenie do spodziewanego osiągnięcia wartości granicznej S_g oblicza się ze wzoru

$$k = \frac{S_g - S_{zi}}{\delta} \quad (7)$$

Z wynikami uzyskiwanymi z tych wzorów łączą się również liczne konkluzje i tak np. przy $k < h_1$ [lat] oraz kategorii uszkodzeń 2-4 pojawia się tekst:

Jest to odpowiedni okres do zaplanowania szlifowania szyn, biorąc zwłaszcza pod uwagę występowanie uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych.

Przy zużyciu falistym mniejszym od wartości granicznej S_g , lecz większym niż cS_z oraz przy 1. kategorii uszkodzeń wysuwana jest konkluzja sugerująca rozważenie celowości zastosowania strategii szlifowania znanej pod nazwą *mniej lecz częściej*. Jej zastosowanie wymaga m.in. określenia liczby przejeżdżających pociągów szlifierskiego p , którą określa się ze wzoru

$$p = \frac{S_{zi}c}{d} + 1 \quad (8)$$

W obecnej wersji systemu współczynniki c oraz d wynoszą odpowiednio 6,0 i 0,1.

5. Podsumowanie

Zakres szlifowania szyn obejmujący obecnie w Polsce kilkaset kilometrów toru rocznie będzie w najbliższym czasie dość szybko wzrastał, zwłaszcza na liniach modernizowanych, na których prędkości pociągów osiągną 160 km/h i więcej. Racjonalne wykorzystanie przeznaczonych na ten cel zasobów wymaga systematycznego monitorowania falistego zużycia szyn oraz rozwijających się uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych i szczegółowego planowania na tej podstawie pracy pociągów do szlifowania szyn. Scharakteryzowana metoda i jej implementacja

komputerowa może nie tylko znacznie ułatwić prace planistyczne, lecz stać się również narzędziem oceny jakości wykonanych robót.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy Nr N 509 001 31/0045.

Artykuł wpłynął do redakcji 8.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] A. J. ABRASHITOV, *Profilnoe shlifovanie relsov*, Put' i Putevoe Hoziajstvo, 4, 14-20.
- [2] AKRUN, H. CYGAN, *Improving the detection of internal rail cracks by using random transform of BSCAN image*, Rail Engineering, London, 2004.
- [3] H. BAŁUCH, *System doradczy w ocenie celowości szlifowania szyn*, Problemy Kolejnictwa, 118, 1995, 12-30.
- [4] H. BAŁUCH, *Limiting values of rail corrugation wear*, The Archives of Transport, 4, 2001, 5-25.
- [5] H. BAŁUCH, *System wspomaganie decyzji o szlifowaniu szyn "DOSZ". Cz. 1. Założenia i algorytm*, Praca CNTK nr 3134/11, Warszawa, 2003.
- [6] H. BAŁUCH, *System wspomaganie decyzji o szlifowaniu szyn „DOSZ”. Zmiany w wersji 1.0*, Praca CNTK nr 2501/11, Warszawa, 2004.
- [7] H. BAŁUCH, M. BAŁUCH, *Odchyłki dopuszczalne nawierzchni Metra Warszawskiego. Etap rozszerzony*, Praca CNTK, nr 4067/11, Warszawa, 2006.
- [8] H. BAŁUCH, M. BAŁUCH, *Określenie stopnia degradacji szyn i przytwierdzeń w tunelu metra z podaniem przyczyn ich powstawania i metod zapobiegania*, Praca CNTK, nr 4278/11, 2007.
- [9] D. BATEMAN, *Rolling contact fatigue — the understanding process*, Railway Technical Review, 4, 2006, 38-40.
- [10] F. EGISEER, *Recording track and catenary geometry at 250 km/h*, Railway Gazette International, 8, 1995, 507-509.
- [11] C. ESVELD, *Izmerenie nerovnostej puti*, Zheleznye Dorogi Mira, 7, 1988, 57-61.
- [12] A. FRICK, O. P. LARSSON-KRAIK, *Rail grinding operation in Sweden*, European Railway Review, 1, 2007, 25-27.
- [13] H. FUNKE, *Rail grinding*, Transpress, Berlin, 1986.
- [14] J. JAISWAL, G. STOCKS, G. STANFORD, *Developing grinding strategies for light rail*, International Railway Journal, 7, 2007.
- [15] J. JAISWAL, *Railway must adopt a system approach*, International Railway Journal, 3, 2005, 21-23.
- [16] D. Y. JEOMANS, *Analytical modeling of rail defects and its applications to rail defect management*, UIC/WEC Joint Research Project on Rail Defect Management, Cambridge, Massachusetts, January 2003.
- [17] S. GRASSIE, J. STEPERT, *Roaring rails an enigma largely explained*, International Railway Journal, 7, 2007, 39-42.

- [18] A. I. KOZYREV, *Czto sposobsvuet obrazovaniju volnoobraznyh nerovnostej*, Put' i Putevoe Hoziajstvo, 10, 2007, 32-35.
- [19] D. MAIWALD i in., *Sistema diagnostiki relsov RAILCHECK*, Zheleznye Dorogi Mira, 9, 1999, 65-67.
- [20] K. MANABE, *Verification of wavelength-fixing mechanism for rail corrugation caused by multiple-wheel interaction*, Quarterly Report of RTRI, 3, 2007, 16-21.
- [21] A. MASSEL, *Linia dużych prędkości Wrocław/Poznań — Łódź-Warszawa*, Technika Transportu Szynowego, 12, 2005, 36-41.
- [22] V. V. MISHIN, V. D. PEVZNER, *Upravlenie tehničeskim sostojaniem puti*, Zheleznodorozhnyj Transport, 12, 1999, 66-68.
- [23] A. MOREAU, *Kontakt mezhdu kolesom i relsom*, Zheleznye Dorogi Mira 4, 1993, 45-50 (przedruk z Revue Generale des Chemins de Fer, 7, 1991).
- [24] K. H. OOSTERMEIJER, *Causation of rail corrugation and contributing factor*, WCRR, 2003.
- [25] V. L. POPOV et al., *Friction coefficient in "rail-wheel" contacts as a function of material and loading parameters*, Physical Mesomechanics, 3, 2002, 45-48.
- [26] A. RODAN, *Slaves to the grinding*, International Railway Journal, 7, 2007, 26-30.
- [27] W. SCHÖCH, *Grinding of rails on high-speed lines: a matter of great Importance*, Rail Engineering International, 1, 2007, 42-43.
- [28] H. TAKAI et al., *Track maintenance technique for 300 km/h class Shinkansen*, Quarterly Reports of RTRI, 2, 1993, 111-118.
- [29] M. TAUBERT, J. JAISWAL, *High speed rail grinding — the way forward*, Rail Engineering, London, 2004.
- [30] M. TAUBERT, *High speed grinding*, International Railway Journal, 12, 2005, 40-41.
- [31] V. B. VOROBIOV i in., *Perenosnye sredstva diagnostirovania golovki relsov*, Put' i Putevoe Hoziajstvo, 5, 2001, 18-21.
- [32] H. WU, K. SAWLEY, *New solution to familiar problems*, International Railway Journal, 12, 2003, 40-41.

H. BAŁUCH

Planning process of rail grinding of railway tracks

Abstract. The basic objective of the rail grinding is to eliminate rail defects, mainly corrugation and head checks, which are caused by fatigue on a contact between wheel and rail. Thus, the rail grinding is the process of removal of steel from the top of rail head through the use of abrasive material. Corrugation and other service defects represent a source of the wheel/rail excitation and corresponding impact loading which has the potential for significant damage not only the rail but also to the track structure and vehicles. It can be observed that head checks could be a source of rail cracks. The main advantage of grinding, which is used for more than 80 years, is that to replicate wear effect artificially and remove cracks from the rails. Probable reasons for the head checks and corrugation increase during last years are the rolling contact fatigue caused by boogies with higher wheel set jaw stiffness and wheel irregularities such as polygonization. Techniques for measuring and controlling the growth of fatigue defects are well established on most railways and constantly improving. Rail grinding must be used, however, carefully with a proper understanding of its benefits and limitations. So, the main condition in rail grinding today is to have a well managed grinding program, first of all, a proper method of its planning. The basic goal of the paper is to present the method proposed

for the grinding planning. This method is based on an analysis of the data collected by the author and his research team during several tests. Experiments were carried out using test train on tracks with different magnitudes of corrugation. The procedure of planning and tolerances of corrugation, depending on amplitude and wavelength were determined.

Keywords: railway track, rail grinding, corrugation, head checks

Universal Decimal Classification: 625.17