

ZARZĄDZANIE SZYNAMI Z WADAMI TYPU SQUAT

Michał Migdał

mgr inż. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Biuro Dróg Kolejowych, e-mail: michal.migdal@plk-sa.pl

Streszczenie. *W artykule omówiono mechanizm powstawania wad squat. Przedstawiono szacunki w zakresie skali problemu na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., jak również wskazano działania konieczne do podjęcia w celu zmniejszenia ilości wad.*

Słowa kluczowe: *utrzymanie szyn, diagnostyka, wady kontaktowo-zmęczeniowe, wada squat*

1. Wstęp

Wada typu squat ujęta jest w katalogu wad w szynach [22] pod numerem 227. Należy ona, podobnie jak wada head checks (2223), do rodziny wad kontaktowo-zmęczeniowych (RCF – ang. *Rolling Contact Fatigue*). Pierwsze udokumentowane przypadki wystąpienia tego rodzaju wad odnotowano w latach 50. ubiegłego wieku w Japonii oraz w latach 70. w Europie [1]. Wada squat z reguły tworzy się po przeniesieniu stosunkowo niewielkiego obciążenia, rzędu kilkudziesięciu teragramów. Dotychczas nie został wykazany wpływ prędkości pociągów na ich powstawanie. Wady tego rodzaju stanowią jeden z najistotniejszych problemów w zakresie utrzymania szyn kolejowych, a pęknięcia których są częstą przyczyną generują duże straty finansowe oraz utrudnienia w ruchu. Z uwagi na powyższe aspekty, w dalszej części referatu określono skalę problemu występowania wad squat na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., przedstawiono prawdopodobne mechanizmy tworzenia się tego rodzaju wady oraz wskazano czynniki eksploatacyjne ułatwiające jej rozwój. Ponadto w ostatniej części przedstawiono działania, których wdrożenie powinno spowodować ograniczenie liczby ich występowania.

2. Identyfikacja skali problemu - statystyka

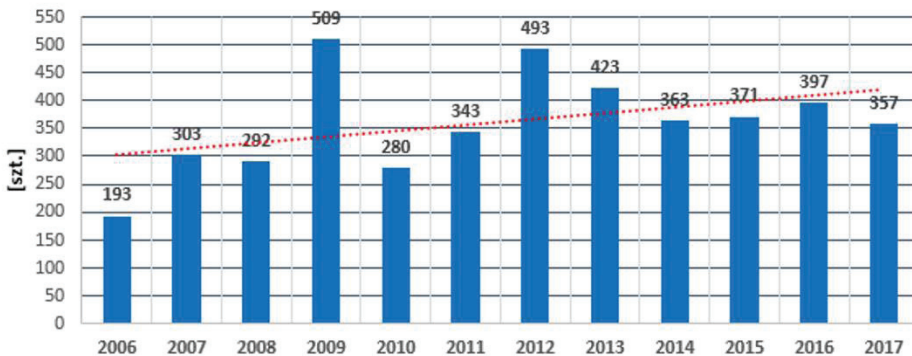
Na sieci kolejowej w 2017 roku, wg danych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A Centrum Diagnostyki, wystąpiło około 370 330 wad, przy czym najliczniejszą grupę stanowią:

- wybuksowania (225X): 195 608 szt. - 52,8%;
- wady kontaktowo-zmęczeniowe (RCF): 95 622 szt. - 25,8% - w tym:

- squat (227): 78 392 szt. - 21,2%,
- head check (2223): 17230 - 4,6%,
- wady spawalnicze (4xx): 20 010 - 5,4%.

Z pośród wyżej wymienionych, wada squat charakteryzuje się bardzo wysokim odsetkiem pęknięć, który w ostatnich 5 latach kształtuje się na poziomie 0,5% - co oznacza, że w każdym roku co dwusetna z występujących wad squat stanowi przyczynę pęknięcia lub złamania szyny¹. Wyższy odsetek pęknięć posiadają tylko wady spawalnicze, co jest zapewne spowodowane obecnością na sieci dużej liczby spoin wykonanych w technologii z bocznym podgrzewaniem „Amoterm”, która obecnie jest już niestosowana, wobec czego liczba tych wad, a tym samym liczba pęknięć nimi spowodowanych, każdego roku zmniejsza się.

W latach 2013-2017 wada squat była przyczyną blisko 2000 udokumentowanych pęknięć i złamań szyn (rys. 1). Liczba ta w ocenie autora nie oddaje pełnej skali problemu. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że pęknięcia spowodowane przez squat często są klasyfikowane jako spowodowane innego rodzaju wadą, np. 200 (złamanie bez widocznej przyczyny), 211 (pęknięcie poprzeczne postępujące), czy 224 (miejscowe wgniecenie powierzchni tocznej).



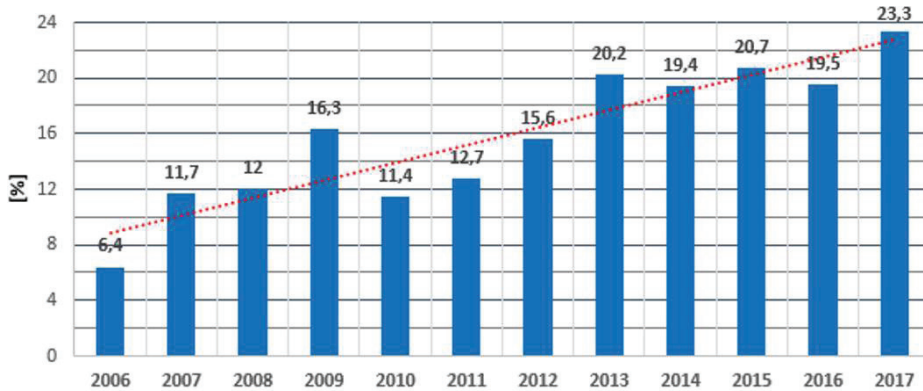
Rys. 1. Statystyka pękniętych i złamanych szyn spowodowanych wadami squat w latach 2006-2017

Ponadto udział wad squat w ogólnej liczbie pęknięć rośnie, i tak np. w roku 2006 wada ta była przyczyną 6,4% złamań, natomiast w roku 2017 udział ten wzrósł do poziomu 23,3% (rys. 2). Spośród obecnie występujących przyczyn pęknięć jest ona jedyną wadą, która nie ma trendu malejącego. Jest to tym bardziej niepokojące, że pomimo dużego zakresu prac inwestycyjnych prowadzonych w ostatnich latach, w ramach których dokonuje się co roku wymiany około 2000 km szyn, niezmiennie utrzymuje się on na wysokim poziomie.

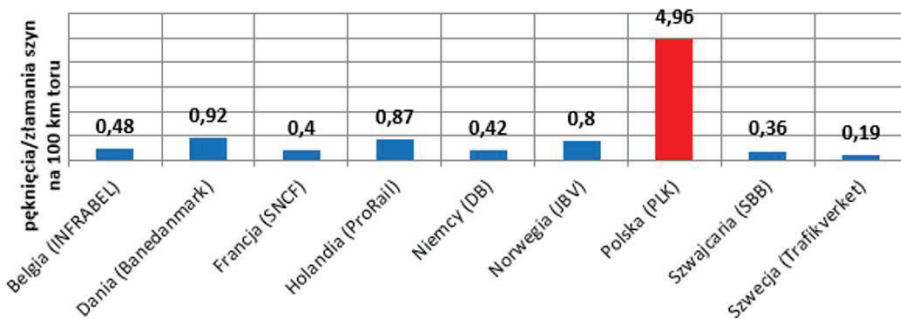
Wada squat ma istotny wpływ na współczynnik określający ogólną liczbę pęknięć przypadających w skali roku na 100 km torów, który to w roku 2015 na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. wynosił 4,96 - przy wartości średniej wśród pozostałych zarządców infrastruktury ujętych w zestawieniu - wynoszącej 0,55

¹ W dalszej części referatu pojęcia pęknięta i złamana szyna będą traktowane jako równoznaczne i będą stosowane zamiennie.

(rys. 3). Należy szacować, że ograniczenie liczby pęknięć i złamań spowodowanych wadą 227 pozwoliłoby zredukować ten współczynnik nawet o 20%.



Rys. 2. Procent pękniętych i złamanych szyn spowodowanych wadami squat w stosunku do wszystkich pęknięć i złamań szyn



Rys. 3. Statystyka ilości pękniętych i złamanych szyn w przeliczeniu na 100 km toru

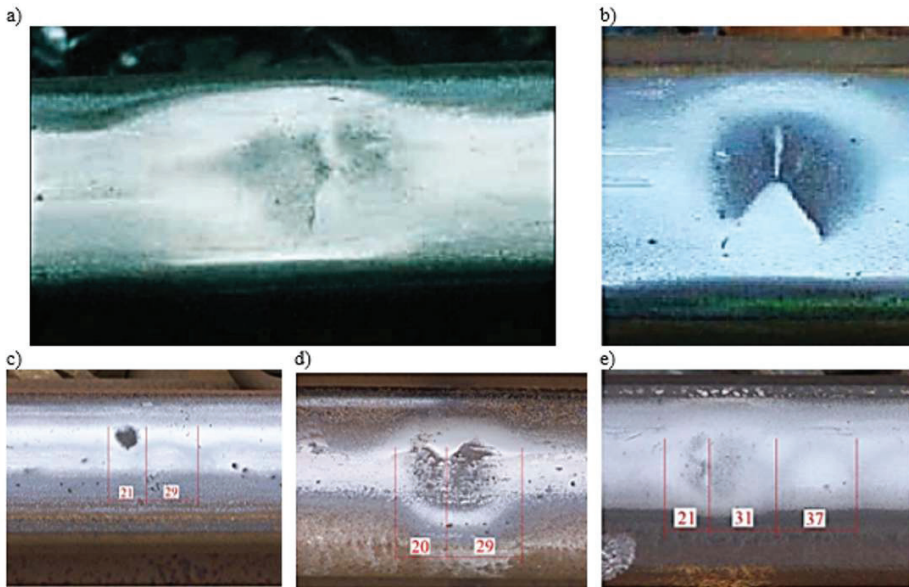
3. Charakterystyka wady squat

Zgodnie z katalogiem wad w szynach obowiązującym w PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., stanowiącym transpozycję karty UIC 712 [22], wada squat oznaczona jest numerem katalogowym 227, a jej pełna nazwa to „Pęknięcie i miejscowe zagłębienie powierzchni tocznej (squat)”. Przykładowe zdjęcia wady pokazano na rys. 4.

Wadę squat z uwagi, na fakt, że jest wadą powierzchniową, można rozpoznać wizualnie po następujących cechach:

- pojawia się na powierzchni tocznej w strefie styku koła z szyną,
- występuje wgłębienie na powierzchni tocznej,
- najczęściej towarzyszy jej miejscowe zaciemnienie powierzchni wzdłuż pęknięcia,

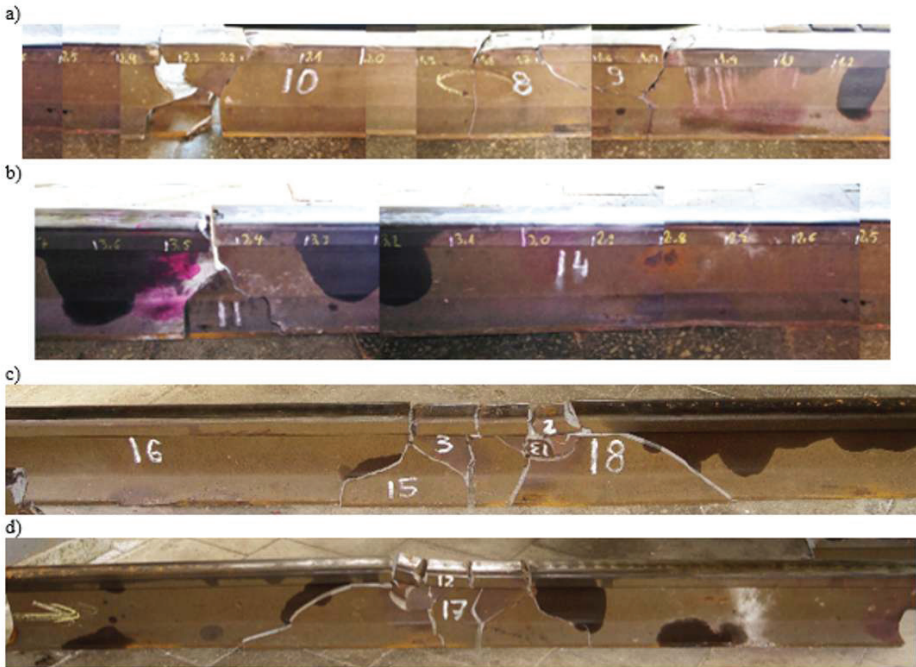
- występuje pęknięcie na powierzchni tocznej, typowo w kształcie litery V lub U, przy czym w przypadku defektów w zaawansowanym stadium rozwoju, pęknięcie może przybierać również inne kształty,
- w odróżnieniu od wybuksowań najczęściej występuje tylko na jednym toku szynowym.



Rys. 4. Przykłady wad squat o różnym stopniu rozwoju [1], [21]

W odróżnieniu od wielu innych rodzajów wad, squaty z uwagi na kontaktowo-zmęczeniowy charakter powstawania, stale zwiększają swój rozmiar (propagują), prowadząc ostatecznie do złamania szyny. Co istotne, wady te często występują w skupiskach (wady wielokrotne), wobec czego należy je uznać za powodujące szczególne duże ryzyko wystąpienia wielokrotnego złamania szyny. Przykład wielokrotnego złamania, jakie wystąpiło na jednej z linii magistralnych przedstawiono na rys. 5 – przykłady te pochodzą z odcinka toru, na którym wystąpiło pęknięcie wielokrotne szyny w 18 przekrojach, na łącznej długości 6 m.

Wady squat, z uwagi na bardzo dużą ich liczbę na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. oraz obserwowany wzrost ich udziału w ogólnej liczbie pęknięć i złamań szyn, a także tendencję do pojawiania się w skupiskach (złamania wielokrotne), stanowią istotny problem techniczny oraz ekonomiczny. Mając na uwadze powyższe, w dalszej części referatu przedstawiono czynniki jakie sprzyjają powstawaniu tego rodzaju wad, zaprezentowano nową propozycję ich klasyfikacji - skorelowaną z działaniami korekcyjnymi, mającymi zapewnić zmniejszenie liczby ich występowania, jak również przedstawiono działania prewencyjne, których celem jest ograniczenie pojawiania się nowych wad na sieci kolejowej.



Rys. 5 Wielokrotne złamanie szyny spowodowane występowaniem wielokrotnych squatów

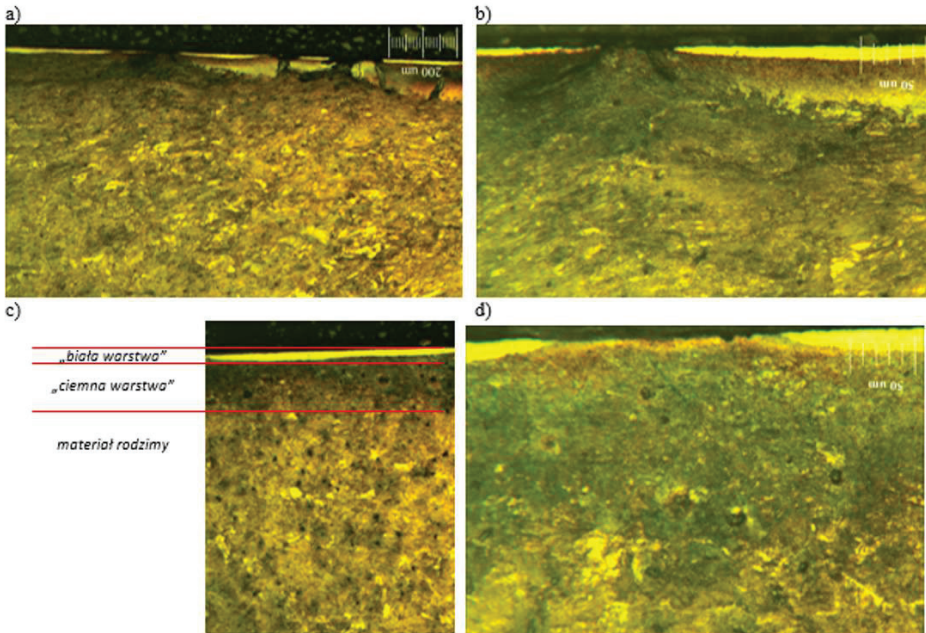
3.1. Mechanizm powstawania wady

Współczesne opracowania omawiające tematykę powstawania oraz rozwoju wad kontaktowo – zmęczeniowych m.in. [16,17], wskazują jako główną przyczynę inicjacji pęknięć - powstanie tzw. białej warstwy (*White Etching Layer* - WEL). Warstwa ta cechuje się dużą twardością oraz kruchością [18]. Z reguły jej grubość wynosi około kilkudziesięciu mikrometrów. Ponadto na przejściu białej warstwy w materiał rodzimy występuje struktura pośrednia o grubości zazwyczaj około $100\ \mu\text{m}$, która wykazuje właściwości anizotropowe – strukturę tą dla kontrastu, będziemy nazywać ciemną warstwą, rys. 6.

Dotychczas zidentyfikowano dwa zasadnicze procesy, których wystąpienie może prowadzić do powstania warstwy WEL. W pierwszym z nich czynnikiem dominującym jest temperatura, natomiast w drugim: siły generowane na styku koła z szyną. Dla potrzeb niniejszego referatu procesy te nazywać będziemy odpowiednio „procesem termicznym” oraz „procesem mechanicznym”.

WEL charakteryzuje się strukturą krystaliczną, zbliżoną do martenzytu, który powstaje z reguły w procesie szybkiego schładzania austenitu, do temperatury poniżej 727°C . „Proces termiczny” został schematycznie przedstawiony na wykresie CTP (czas-temperatura-przemiana) przy ciągłym chłodzeniu stali (rys. 7). Zasadniczo austenit poniżej temperatury 727°C rozpada się na mieszaninę ferrytu i perlitu (przy zawartości węgla do 0,77%) lub perlitu i cementytu (przy zawarto-

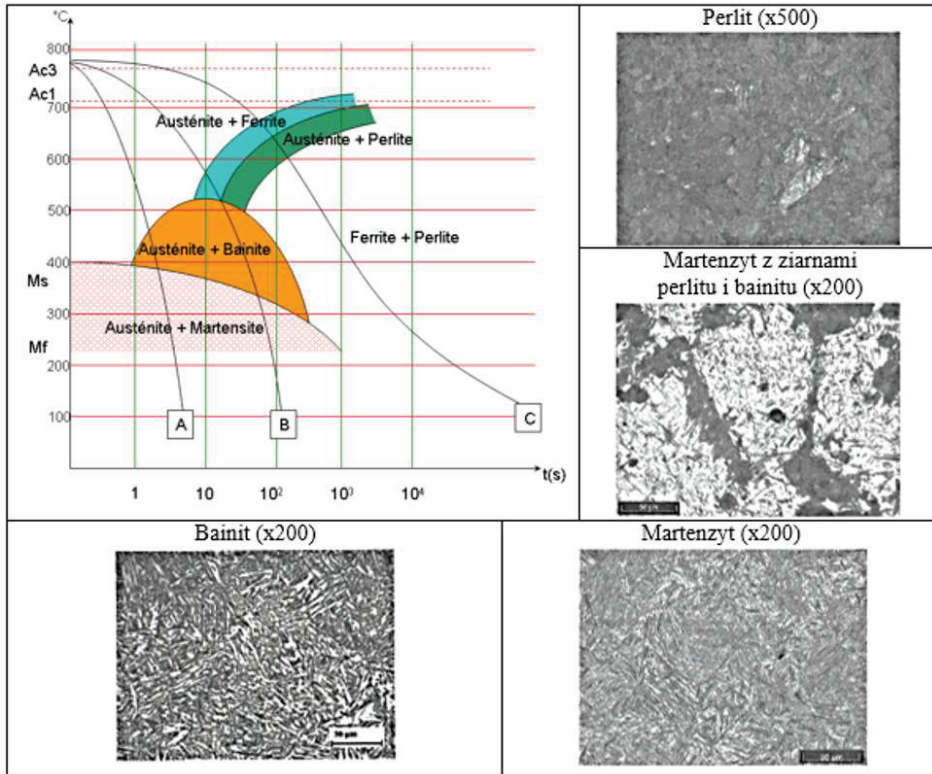
ści węgla większej od 0,77%), rys. 7 - pkt „C”. Natomiast w procesie szybkiego studzenia austenit może nie ulec rozpadowi na opisane wyżej mieszaniny, tylko przemienić się w martenzyt (rys. 7) - pkt „A”, „B”. Taki proces powstawania wad, może wystąpić np. w przypadku niewłaściwej obróbki szyn podczas reprofilacji, niemniej warstwa martenzytu utworzona w „procesie termicznym” jest stosunkowo cienka (max. 75 μm) i w przypadku szyn wyprodukowanych ze stali gatunku R260 z reguły ulega ona samoistnemu starciu podczas eksploatacji, zanim jeszcze stanie się ogniskiem rozwoju pęknięć [9]. Natomiast w przypadku stali R350HT jakość prowadzonych prac szlifierskich wymaga szczególnej staranności i ścisłego przestrzegania reżimów technologicznych w celu uniknięcia powstania warstwy WEL.



Rys. 6. Mikrostruktura stali R260 w obszarze powierzchni tocznej: a), c) powiększenie $\times 200$; b), d) powiększenie $\times 800$ w obszarze występowania wad [18]

Poza „procesem termicznym” warstwa WEL powstawać może również na skutek „procesów mechanicznych”, w ramach których generowane są duże naprężenia powierzchniowe na styku koła z szyną. Naprężenia te są skutkiem sił występujących podczas np. poślizgu kół, rozruchu, hamowania lub sił generowanych na skutek złych parametrów współpracy koło-szyna, np. wąskie pasmo współpracy lub dwupunktowy styk. Z uwagi na specyficzny sposób powstawania martenzytu w tym procesie, często jest on określany jako FIM (*ang.* Friction Induced Martensite). Powstawanie WEL w „procesie mechanicznym” ułatwia zastosowanie do produkcji szyn stali o wysokiej granicy plastyczności (wytrzymałość na rozciąganie stali R260 i R350HT to odpowiednio $R_{m,\min R260} = 880$ i $R_{m,\min R350HT} = 1175$ MPa). Duża wytrzymałość stali skutkuje bardzo małą powierzchnią styku koło-szyna, zbliżoną

do powierzchni monety o nominale 5 gr (0,0003 m²), dzięki czemu otrzymujemy jedną z największych zalet transportu kolejowego, tj. bardzo małe wartości oporów toczenia. Niestety powoduje to również występowanie bardzo dużych naprężeń, które mogą przekraczać nawet 1000 kN/mm² - wartość ta jest na tyle duża, że prowadzi do powstawania odkształceń plastycznych (*ang. plastic deformation*) szyny w obszarze jej styku z kołem [5].



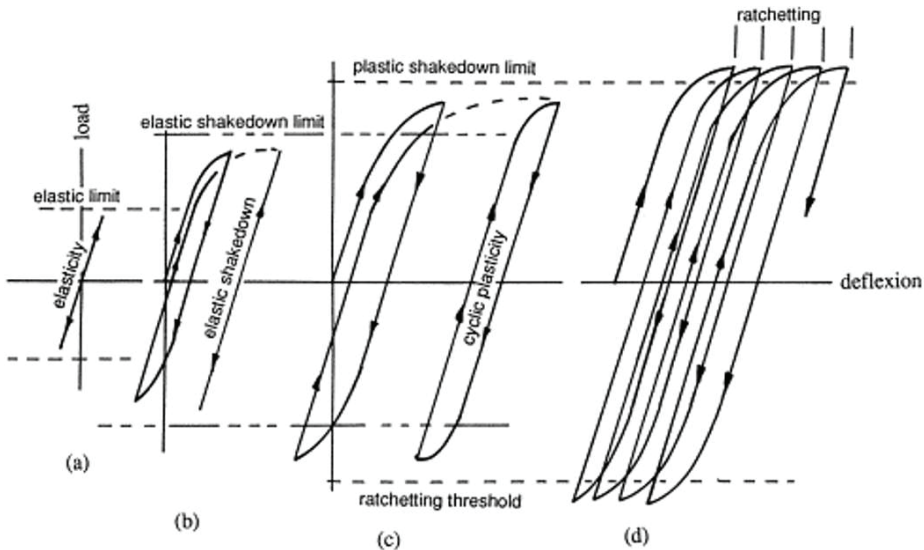
Rys. 7. Wykres CTP dla stali {źródło: http://www.wikiwand.com/pl/Wykres_CTP} oraz mikrostruktura {1}

W „procesie mechanicznym”, w wyniku kontaktu tocznego ciał poddawanych cyklicznym obciążeniom, powstają naprężenia, które po przekroczeniu pewnego poziomu granicznego powodują rozwój pęknięć, za które odpowiada zjawisko „ratchetting”, tj. akumulacji odkształceń plastycznych. Zjawisko „ratchettingu” wyjaśniono na rys. 8 – przy obciążeniu cyklicznym materiał może pracować w następujących zakresach [12]:

- sprężystym (*ang. elastic limit*) – występują odkształcenia sprężyste, tzn. po zdjęciu obciążenia, materiał wraca do swojego pierwotnego kształtu;
- przystosowanym do pracy w zakresie sprężystym (*ang. elastic shakedown limit*) - przy wzroście naprężeń zakres pracy wychodzi poza granicę sprężystości, w wyniku czego w pierwszej fazie występuje odkształcenie plastyczne

w postaci zgniotu, który widoczny jest w strukturze materiału jako „ciemna warstwa”, a następnie po kolejnych cyklach obciążenia materiał przystosowuje się (ang. *shakedown*) do pracy sprężystej;

- c) przystosowanym do pracy w zakresie plastycznym (ang. *plastic shakedown limit*) – wraz z dalszym wzrostem naprężeń, przyrasta również odkształcenie plastyczne, a po kolejnych cyklach obciążenia materiał przystosowuje się do pracy w zakresie plastycznym;
- d) rozwoju pęknięcia (ang. *ratchetting*) – w wyniku akumulacji odkształceń plastycznych, powstają pęknięcia plastyczne, które wraz z kolejnymi cyklami obciążenia powiększają swój rozmiar.



Rys. 8. Zakresy pracy stali poddanej cyklicznym obciążeniom, opracowano na podstawie [12]

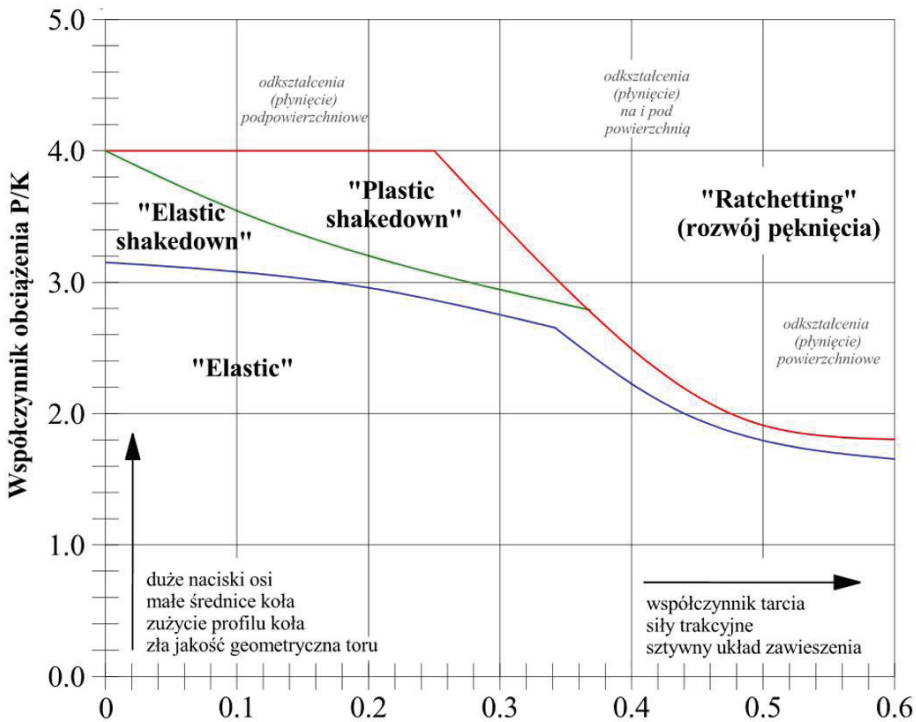
W warunkach rzeczywistych należy oczekiwać, że obydwa te procesy, tj. termiczny i mechaniczny współistnieją, tj. występowanie dużych naprężeń wpływa na przemiany fazowe w stali, jak również zjawiska termiczne wpływają na powstawanie odkształceń plastycznych. Przy czym z uwagi na znaczną grubość warstwy WEL generowaną w „procesie mechanicznym”, wynoszącą zazwyczaj około 500 μm [9], w porównaniu do „procesu termicznego”, jego rola w powstawaniu wad wydaje się być dominująca.

Podsumowując: proces powstawania wady squat można scharakteryzować w następujący sposób: lamelarna (warstwowa) mikrostruktura stali szynowej pod wpływem dużych naprężeń ulega odkształceniu plastycznemu w kierunku podłużnym, warstwa po warstwie. Odkształcenia te, przy każdym przejeździe pociągu, postępują do czasu, aż osiągną wielkość, przy której pojawia się pęknięcie. Początkowo pęknięcie to rozwija się pod małym kątem i przebiega blisko powierzchni tocznej, następnie na głębokości około 2-5 mm, z uwagi na występowanie na tej głębokości największej zmienności (gradientu) podłużnych naprężeń reszkowych,

zmianie ulega kierunek propagacji i dalej pęknięcie postępuje na granicy ziaren, praktycznie pionowo, zwiększając znacznie ryzyko wystąpienia złamania szyny lub powodując wykruszenia na powierzchni szyny.

3.2. Czynniki sprzyjające rozwojowi wady squat

W poprzednim rozdziale scharakteryzowany został mechanizm prowadzący do powstania wady squat, natomiast w niniejszym zostaną przedstawione czynniki, które sprzyjają jej powstaniu oraz ułatwiają jej dalszy rozwój.



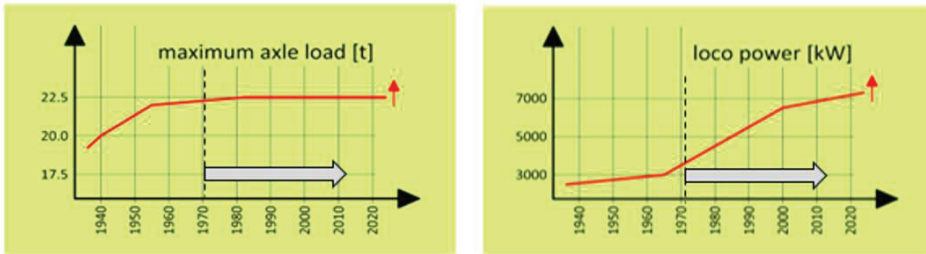
Rys. 9. Czynniki wpływające na zakres pracy materiału, opracowano na podstawie [5] [13]

Na rys. 9 przedstawiono czynniki determinujące zakres pracy materiału, przy czym czynniki te zostały przypisane do jednej z dwóch grupy reprezentowanych przez oś pionową i poziomą na wykresie:

- współczynnik obciążenia (oś pionowa) – którego wzrost jest powodowany przez duże obciążenia pionowe, złą jakość powierzchni tocznej szyny, eksploatację pojazdów z zużytym profilem koła lub z małymi średnicami kół. Współczynnik ten uzależniony jest również od rodzaju stali szynowej i wraz ze wzrostem jej wytrzymałości, jego wartość maleje [5];
- współczynnik przyczepności (oś pozioma) – zwiększa swoją wartość wraz ze wzrostem sił trakcyjnych, współczynnika tarcia oraz w wyniku ruchu pojazdów o dużej sztywności układu zawieszenia. Wzrost jego wartości (duże

siły styczne) jest równoznaczny z występowaniem większych naprężeń podłużnych w materiale, co prowadzi do wystąpienia zjawiska „ratchettingu” i w konsekwencji powstania pęknięć.

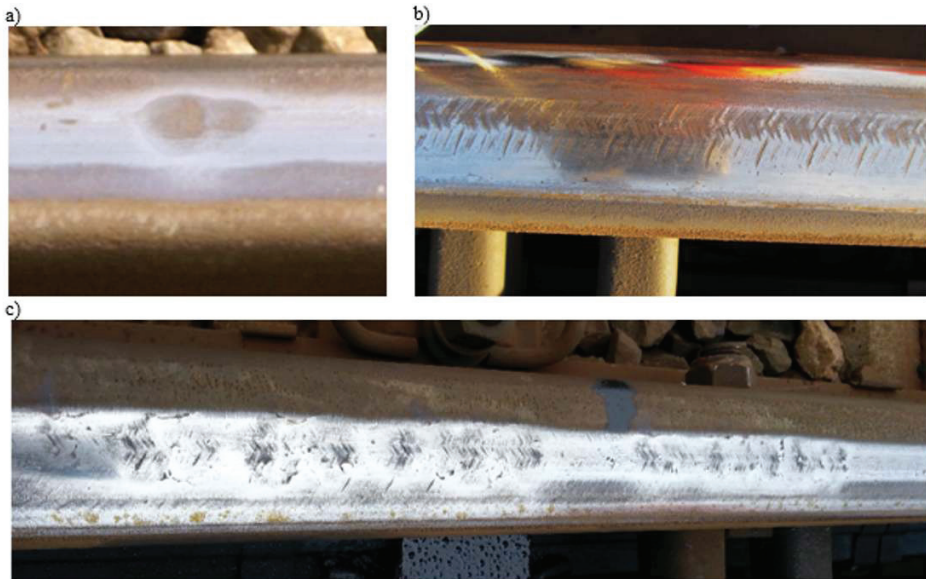
Pierwsze dwie cechy sprzyjające powstawaniu wad, tj. duże obciążenia pionowe oraz duże siły trakcyjne od przyspieszania i hamowania, związane są ściśle z rozwojem kolei - rys. 10, a więc zarządca infrastruktury chcąc zapewnić konkurencyjność względem innych gałęzi transportu nie ma możliwości ich ograniczenia. Co prawda poprzez odpowiednie uregulowania w zakresie kształtowania toru w płaszczyźnie pionowej, może w pewien sposób wpływać na zmniejszenie sił trakcyjnych, niemniej w praktyce przy istniejących układach geometrycznych oraz szeregu ograniczeń terenowych, czy też infrastrukturalnych, możliwości te są znacznie ograniczone. Zarządca infrastruktury nie ma również większego wpływu na budowę oraz eksploatację pojazdów kolejowych, wobec czego te czynniki również nie będą omawiane w dalszej części referatu.



Rys. 10. Wzrost nacisków osi oraz mocy pojazdów trakcyjnych na przestrzeni lat, linią przerywaną została zaznaczona data pierwszych obserwacji wady squat (opracowano na podstawie [5])

W dalszej części zostaną przybliżone tylko czynniki, na które zarządca infrastruktury może w pewien sposób wpływać. Zgodnie z raportem [1] wady squat bardzo często rozwijają się od niewielkich defektów występujących na powierzchni tocznej szyny, które to na skutek występujących w obszarze styku koło-szyna imperfekcji geometrycznych o krótkiej fali, generują wysoko-częstotliwościowe oddziaływania o znacznej amplitudzie. Wraz z postępującym rozwojem wady, ich amplituda zwiększa się, co przyspiesza wzrost wady jak i proces degradacji całej nawierzchni – powstaje pewnego rodzaju zamknięty, samonapędzający się mechanizm degradacji. Wg badań brytyjskich [14] prowadzonych w 2001 roku, szacuje się, że co najmniej 75% wszystkich wad typu squat, występujących na sieci zarządzanej przez Network Rail, zostało zapoczątkowanych przez innego rodzaju wady powierzchniowe oraz inne nieprawidłowości występujące na powierzchni tocznej szyny. W szczególności wady squat mogą rozwijać się od: skaleczeń i zagłębień powierzchni tocznej szyny – wady tego rodzaju mogą powstawać w różnych okolicznościach, m.in.: już na etapie budowy, w wyniku rozładunku tłucznia (stąd istotna rola reprofilacji początkowej), czy też w późniejszej eksploatacji: wybuksovania - rys. 11a, wgniatanie w szynę podczas przejazdu przedmiotów znajdujących się na jej powierzchni lub wynikające z uszkodzeń bieżni koła (np. nalepy).

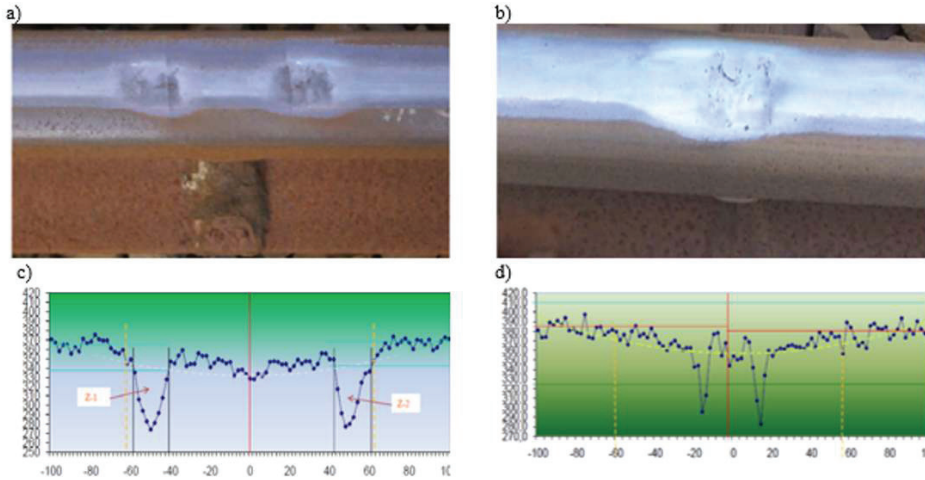
Przy czym ostatnie z wymienionych zjawisk ma najczęściej charakter cykliczny, skałeczenie występuje co obwód koła. Taki cykliczny charakter uszkodzenia mogą przybierać również wady powstałe w wyniku niewłaściwej obróbki podczas szlifowania - rys. 11b. W przypadku wystąpienia cyklicznych skałeczeń zachodzi ryzyko powstania w tych lokalizacjach wielokrotnych wad squat rys. 11c, które są szczególnie niebezpieczne z uwagi na możliwość wystąpienia wielokrotnego złamania szyny. Wobec czego, na wady cykliczne należy zwracać szczególną uwagę i eliminować je zanim zapoczątkują powstanie wad typu squat, co jest szczególnie istotne na szynach charakteryzujących się podwyższoną wytrzymałością np. R350HT.



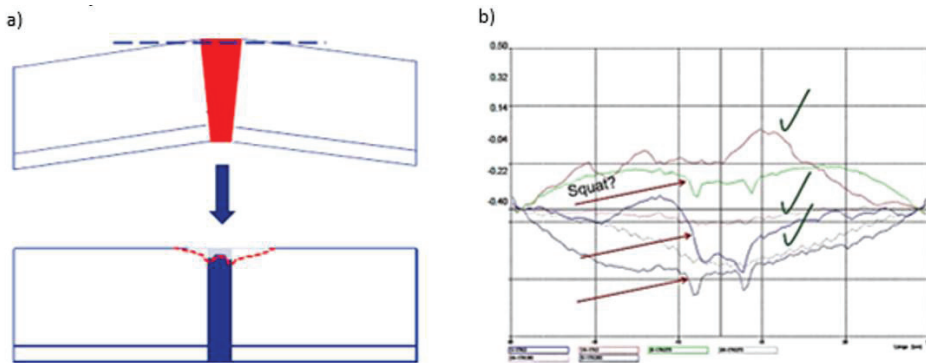
Rys. 11. Przykładowe wady squat: a) powstała w miejscu wybuchowania; b) cykliczne skałeczenia szyny powstałe w wyniku niewłaściwej obróbki szyny; c) wielokrotne wady squat będące następstwem niewłaściwej obróbki szyny

Spoiny/zgrzeiny – prawdopodobną przyczyną powstawania wad w obrębie połączeń szyn jest niejednorodność materiału występująca w strefie wpływu ciepła. Na rys. 12 pokazano powiązania pomiędzy zmianą twardości w strefie wpływu ciepła, a uszkodzeniami występującymi w obszarze spoin oraz zgrzein. Według obserwacji przeprowadzonych przez ProRail na holenderskiej sieci kolejowej około 10-15% przypadków wad typu squat występuje w obrębie spoin oraz zgrzein [1].

Wg doświadczeń SBB, jeżeli na powierzchni tocznej w obszarze spoiny lub zgrzeiny wystąpią nierówności geometryczne, znacznie zwiększa się prawdopodobieństwo powstania wady squat [18]. Nierówności takie zdecydowanie częściej występują w spoinach, w których to często w wyniku zbyt wczesnie przeprowadzonej obróbki końcowej (na zbyt gorącym materiale) razem z nadlewem usuwany jest również materiał rodzimy szyny, finalnie tworząc dwa niewielkie zagłębienia wokół spoiny (rys. 13).



Rys. 12. Złącze spawane (a) oraz zgrzewane (b) z widocznymi wadami squat oraz odpowiadające im rozkłady twardości (c) i (d) [11].



Rys. 13. a) Mechanizm powstawania nierówności w obszarze spoiny, b) przykładowe kształty powierzchni tocznej (pomiar liniałem elektronicznym) skorelowane z późniejszym wystąpieniem wad [18]

Zużycie faliste – najczęstszą formą zużycia falistego towarzyszącą wadzie squat są fale z zakresu 30-100 mm. Obserwacje przeprowadzone przez ProRail na holenderskiej sieci kolejowej wskazują, że w około 70% przypadków wadom squat towarzyszy zużycie faliste o ww. długości fali [1]. Fala ta jest również dominującą formą zużycia falistego na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Podobnie jak w przypadku skaleczeń, również tutaj mamy do czynienia z samonapędzającym się mechanizmem i tak zużycie faliste może stanowić przyczynę rozwoju wady squat, jak również wady tego rodzaju mogą przyczyniać się do wzrostu zużycia falistego.

Poza ww. czynnikami, wpływ na powstawanie wad ma również wytrzymałość stali szynowej. Stale o podwyższonej wytrzymałości (np. R350HT) cechują się większą odpornością na powstawanie wad, niż stal R260. Niemniej w przypadku wystąpienia uszkodzenia (np. skaleczenia), na szynie wykonanej ze stali o pod-

wyższej wytrzymałości, nie jest ono usuwane w procesie naturalnego ścierania, co zwiększa prawdopodobieństwo powstania wady squat. Porównanie dwóch najczęściej stosowanych na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. stali szynowych przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Porównanie stali szynowych

R260	R350HT
<ul style="list-style-type: none"> - większa podatność na powstawanie wad + pęknięcie z reguły postępuje wolniej niż zużycie szyny + profil szyny zmienia się stosunkowo szybko, optymalizując pasmo kontaktu koło-szyna co zapewnia większe pasmo współpracy koło-szyna, co powoduje mniejsze naprężenia oraz wolniejsze tempo propagacji wady 	<ul style="list-style-type: none"> + mniejsza podatność na powstawania wad - pęknięcie rośnie szybciej niż postępuje zużycie szyny - wąskie pasmo współpracy koło-szyna, profil szyny nie podlega deformacji co powoduje zwiększone naprężenia oraz wzrost tempa propagacji wad

Z informacji zawartych w tab. 1 można wysnuć wniosek, że w przypadku prawidłowego utrzymania powierzchni tocznej szyny, większą odpornością na powstawanie wad będą cechować się szyny z gatunku R350HT. Niemniej na szynach tych, z uwagi na ich wysoką odporność na ścieranie, utrudnione jest usunięcie powstałych wad powierzchniowych w procesie naturalnego zużycia, co może sprzyjać powstawaniu wad squat.

Poza omówionymi czynnikami pewną rolę w tworzeniu wad squat przypisuje się również takim czynnikom jak: rozstaw podkładów (sztywność rusztu torowego), właściwości systemu przytwierdzenia (sztywność przekładki), czy wielkość masy nieodsprężynowanej. Niemniej z uwagi na brak jednoznacznych dowodów w tym zakresie, nie będą one szerzej omawiane.

4. Zarządzanie szynami z wadami squat

W celu trwałego odwrócenia niekorzystnych statystyk przyrostu wad squat oraz liczby pęknięć i złamań szyn nimi spowodowanych, konieczne jest wdrożenie systemowych rozwiązań w obszarze utrzymania, w szczególności w zakresie diagnostyki oraz działań korekcyjnych, tj. prowadzących do zmniejszenia liczby wad istniejących, jak również działań prewencyjnych, mających na celu ograniczenie przyrostu wad nowopowstałych.

4.1. Diagnostyka (klasyfikacja)

Diagnostyka (szyn) jest procesem, który z definicji powinien dostarczać użyteczne informacje w zakresie dalszego postępowania z szyną, w której stwierdzono występowanie wad. W przypadku wady squat, rola diagnostyki jest tym bardziej istotna, z uwagi na jej postępujący wzrost (propagację), determinowanym przez

bardzo dużą liczbę czynników, z których wybrane zostały przedstawione w pierwszej części referatu.

Obecnie w PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. wady typu squat klasyfikowane są do jednej z następujących kategorii: „do obserwacji” (O), „do wymiany” (W), „do natychmiastowej wymiany” (N), „zamknięcie toru” (Z). Zasadniczą wadą przyjętej klasyfikacji jest słabe jej skorelowanie z konkretnymi działaniami, jakie należy podjąć w celu usunięcia wady, jak również brak wskazania jakichkolwiek terminów usunięcia wad zakwalifikowanych do kategorii „O”. W przypadku wady squat wiąże się to ze zmniejszeniem trwałości wielu elementów drogi kolejowej, będące następstwem generowania dużych oddziaływań dynamicznych podczas przejazdu po szynie z wadą. W szczególności pozostawienie wady powodować będzie: ciągły jej rozwój oraz możliwe powstanie zużycia falistego, pękanie podkładów, czy też powstawanie wychłapów. Ponadto pozostawienie w torze wad „O”, w większości przypadków nieuchronnie prowadzić będzie do konieczności zmiany jej klasyfikacji na „W”, „N” lub „Z”, co wiąże się z obniżeniem poziomu bezpieczeństwa, jak również większym kosztem oraz nakładem czasu pracy potrzebnym do jej usunięcia.

Mając na uwadze powyższe, zasadne jest opracowanie klasyfikacji, która będzie skorelowana z dostępnymi obecnie technologiami usuwania wad, jak również z technikami diagnostycznymi, jakimi dysponuje zarządca infrastruktury. Na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. do kontroli wad w szynach wykorzystywana jest diagnostyka wizualna (VT) oraz defektoskopia ultradźwiękowa (UT). Pierwsza z wymienionych metod pozwala na oszacowanie rozmiaru wady tylko na podstawie zmian zachodzących na powierzchni tocznej szyny, wobec czego zakres jej stosowania jest mocno ograniczony, tylko do wad, których widoczna na powierzchni część pozwala sądzić z dużą dozą pewności, że propagacja pęknięcia nie jest jeszcze zbyt głęboka. Natomiast mankamentem defektoskopii ultradźwiękowej jest jej słaba skuteczność wykrywania wad przypowierzchniowo, tj. występujących do głębokości 5-7 mm.

Biorąc pod uwagę powyższe ograniczenia oraz doświadczenia innych zarządców infrastruktury ujęte m.in. w [2], w tab. 2 przedstawiono propozycję klasyfikacji wad squat, w ramach której wady te zostały podzielone na 4 kategorie (U1, U2, U3, U4), wraz ze wskazaniem właściwej technologii naprawy szyn ze stwierdzoną wadą.

Przedstawiona klasyfikacja, jako podstawowe kryterium oceny, wykorzystuje głębokość wady, na podstawie której można precyzyjnie określić działania konieczne do podjęcia, w tym również tych znajdujących się w zaawansowanym stadium rozwoju (U3, U4). Dodatkowo dla pierwszych dwóch progów oceny (U1, U2) wskazano możliwość klasyfikacji poprzez ocenę wizualną, co ma przede wszystkim na celu ułatwić podjęcie decyzji jednostkom terenowym zarządcy infrastruktury w zakresie metody oraz terminu usunięcia wady, bez konieczności oczekiwania na kartę z badania defektoskopowego. Dodatkowo zasadne wydaje się rozważyć wyposażenie jednostek terenowych w ręczne defektoskopy ultradźwiękowe, które to przyspieszyłyby oraz znacząco ułatwiły proces klasyfikacji wad, jak również byłyby one doskonałym narzędziem do kontroli rozwoju wad istniejących oraz oceny poprawności usunięcia wad.

Tabela 2. Propozycja klasyfikacji wad squat

Klasyfikacja wady squat						
Działania		U1 (lekkie)	U2 (średnie)	U3 (ciężkie)	U4 (niebezpieczne)	
Metoda wykrycia	VT (długość)	L < 50 mm	L ≥ 50 mm	----		
	UT (głębokość)	brak wskazań	T ≤ 15 mm	T ≤ 25 mm	T > 25 mm	
Zabezpieczenie do czasu usunięcia wady		---	---	ściskacze do szyn ¹⁾	---	ściskacze do szyn ¹⁾ V ≤ 10 km/h
Termin usunięcia [dni]		---	90	90	30	30
Metoda naprawy	wady pojedyncze	napawanie HWR/THR	HWR/THR	HWR/THR szeroki luz	szeroki luz wstawka	
	wady wielokrotne ²⁾	wstawka				
1) ściskacze do szyn – ograniczenie prędkości wynika z dopuszczenia SMS-PW-17						
2) wady wielokrotne – wady występujące w skupisku większym od 5 szt. na długości 30 m						

4.2. Usuwanie wad istniejących (działania korekcyjne)

Na rynku dostępnych jest aktualnie kilka technologii, które pozwalają na skuteczne usuwanie wad powierzchniowych, w tym również wad typu squat, są to:

- Regeneracja przez napawanie łukowe w torze - zalecana jest do usuwania wad lekkich, zaklasyfikowanych do progu U1. Ograniczenie stosowania tej metody tylko do usuwania wad lekkich wynika ze stosunkowo dużej liczby błędów, jakie spawacz może popełnić w procesie napawania m.in.: podczas szlifowania (usuwanie wady), podgrzewania, czy nakładania napoiny. Ponadto wiąże się ona z narażeniem spawacza na oddziaływania wysokiej temperatury oraz dymu powstałego w procesie napawania. Z ww. powodów usuwanie wad kontaktowo-zmęczeniowych poprzez napawanie jest zabronione przez niektórych zarządców infrastruktury, np. Network Rail [4]. Zaletą tej metody jest przede wszystkim niska cena oraz duża konkurencja na rynku.
- Spawanie termitowe główki szyny metodą HWR (*Head Wash Repair Weld* – Railtech International) lub THR (*Thermit Head Repair* - Elektro-Thermit GmbH & Co. KG) – technologia ta dotychczas nie była stosowana w kraju. Polega ona na wycięciu wady za pomocą palnika umieszczonego w szablonie, który zapewnia odpowiednią geometrię cięcia (fragment okręgu) - rys. 14. Wady usuwane tą metodą mogą mieć maksymalnie głębokość do 25 mm, przy jednoczesnym zachowaniu odległości od dolnej krawędzi główki szyny wynoszącej minimum 8 mm. Natomiast maksymalna długość usuwanej wady, w zależności od technologii, może wynosić 75-90 mm. Przy czym istnieje możliwość usunięcia wad również o większej długości, poprzez nakładanie na siebie kolejnych spoin. Po wycięciu wady, brakujący materiał jest uzupełniany, poprzez wykonanie spoiny z właściwej dla technologii porcji termitu. Najistotniejsze zalety omówionej metody to: znacznie ograniczona liczba błędów możliwych do popełnienia przez spawacza (w stosunku do napawania), niezawodne połączenia materiału rodzimego

z mieszanką termitową, brak konieczności wykonania regulacji naprężeń po robotach, czas wykonania, oraz niska cena (w porównaniu do wstawki szynowej). Wdrożenie na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. technologii HWR/THR nie powinno nastrożać większych trudności, ponieważ bazuje ona na osprzęcie spawalniczym, jaki posiadają działające na rynku firmy spawalnicze.



Rys. 14. Wycinanie wady w technologii THR (5)

Metoda ta jest preferowana do usuwania wad w bardzo szerokim zakresie, tj. zaklasyfikowanych do progów U1, U2, U3. Ponadto może być również z powodzeniem stosowana do usuwania innego rodzaju wad powierzchniowych, np. wybuksowań.

- c) Spawanie termitowe z szerokim luzem – zasadniczo technologia ta powinna być stosowana jako uzupełniająca, kiedy nie jest możliwe zastosowanie technologii HWR/THR, a więc dedykowana jest ona do usuwania wad głębokich, zaklasyfikowanych do progu U3 lub U4. Podstawową wadą tej metody, w stosunku do HWR/THR, jest konieczność zastosowania naprężaczy szynowych oraz ograniczenie jej stosowania do wad o długości nie większej od 60-70 mm.
- d) Wstawka szynowa – metoda dedykowana do usuwania przede wszystkim wad wielokrotnych oraz wad, których rozmiar uniemożliwia zastosowanie innych alternatywnych metod. Metoda ta charakteryzuje się zdecydowanie największą pracochłonnością, jak również najwyższą ceną.

Szacunkowe koszty usunięcia pojedynczej wady, w zależności od zastosowanej technologii wskazano w tab. 3 i 4.

Tabela 3

Koszty napraw punktowej	
- napawania - długość do 250 mm	600,00 zł
- spawanie termitowe - HWR	1 200,00 zł
- spawanie termitowe - "szeroki luz"	1 600,00 zł

Tabela 4

Koszty wykonania wstawki szynowej 30 m	
- wymiana [-]	4 000,00 zł
- naprężacze [4 godz/wstawka]	320,00 zł
- szyna 60E1 [30 m]	6 955,00 zł
- szyna 49E1 [30 m]	5 705,00 zł
- spoina [2 szt.]	2 400,00 zł
koszt jednostkowy - 60E1:	13 675,00 zł
koszt jednostkowy - 49E1:	12 425,00 zł

4.2.1. Szacowane koszty usunięcia istniejących wad

Statystyki wskazane w rozdziale 1 wskazują, że na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. występuje 78 392 wad typu squat, które występują w 29 709 lokalizacjach, przy czym dla potrzeb referatu terminem „lokalizacja” będziemy określać pojedynczy tok szynowy o długości 30 m. Na podstawie powyższych informacji można zauważyć, że wady te mają tendencję do pojawiania się w skupiskach, co potwierdzają również bardziej szczegółowe analizy. Obecnie na sieci kolejowej zarządzanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. występuje blisko 500 lokalizacji, na których występują skupiska wad squat przekraczające 20 szt. Niemniej na sieci występuje również około 18 060 lokalizacji, na których obserwuje się wady pojedyncze. Ta zmienna intensywność występowania wad ma istotne znaczenie w doborze właściwej technologii ich usunięcia, która to powinna być racjonalna zarówno pod względem technicznym jak i ekonomicznym.

W celu ustalenia doboru właściwej technologii przeprowadzono szczegółową analizę szacowanych kosztów związanych z usunięciem wszystkich wad występujących na sieci kolejowej, przy następujących założeniach:

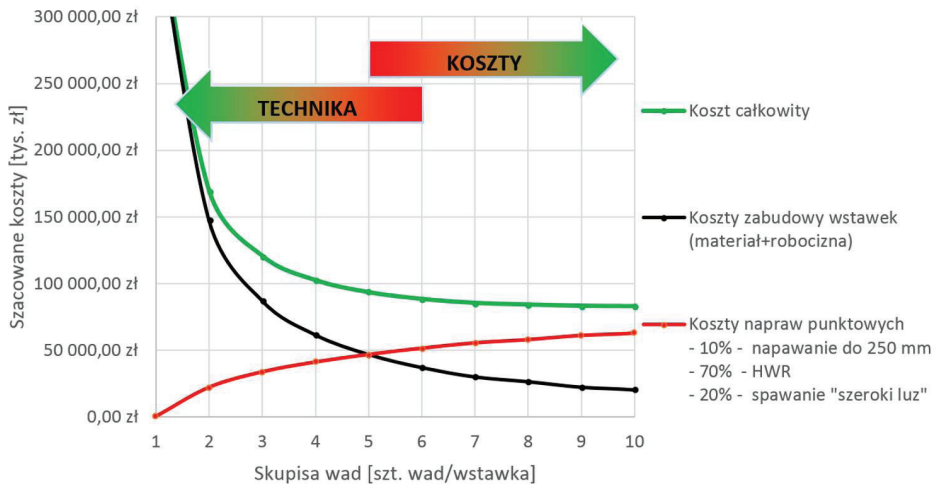
- jako zmienną przyjęto w analizie ilość wad występujących w skupisku w ramach pojedynczej lokalizacji;
- wady w skupiskach będą usuwane poprzez wymianę wstawki szynowej, natomiast wady punktowe będą usuwane metodami: HWR/THR, spoiną na szeroki luz oraz przez napawania, przy czym procentowy udział poszczególnych technologii jest stały i wynosi odpowiednio 70%, 20%, 10%;
- ceny jednostkowe technologii wykorzystywanych do napraw, przyjęto zgodnie z tab. 3 i 4;
- wszystkie wady występują w torze bezстыkowym;
- symulację wykonano zwiększając stopniowo liczbę wad w skupiskach od 1 (tj. usunięcie wad w każdej lokalizacji nastąpi poprzez wymianę wstawki) do 20 (tj. wstawki będą zastosowane tylko w lokalizacjach, gdzie na odcinku 30 m występuje 20 i więcej wad, natomiast w pozostałych lokalizacjach nastąpi usunięcie wad metodą punktową).

Fragment otrzymanych wyników analizy (skupiska wad w liczbie od 1 do 8 szt.) przedstawiono w tab. 5, w której to dla każdego rozpatrywanego wariantu wskazano:

- sumaryczną długość szyn potrzebną do wykonania wstawek szynowych oraz liczbę napawań punktowych,
- szacunkowe koszty zabudowy wstawek szynowych oraz wykonania napraw punktowych,
- koszt całkowity usunięcia wad.

Tabela 5. Analiza szacowanych kosztów związanych z usunięciem wad squat

Ilość wad w skupisku		[szt.]	1	2	3	4	5	6	7	8
usunięcie wad - wstawki szynowe	Szacowane koszty zabudowy wstawek (materiał + robocizna)	[tys. zł]	375 328,70 zł	147 421,15 zł	86 976,62 zł	61 343,07 zł	46 617,46 zł	36 791,08 zł	29 793,73 zł	26 205,12 zł
	Długość szyn [km]	[km]	891,27	349,47	205,89	145,02	110,13	86,88	70,35	61,89
	Potencjalna liczba usuniętych wad (tylko wstawki szynowe)	[szt.]	78392	60332	50760	44673	40021	36146	32840	30866
	Usunięto wad - tylko wstawki	[%]	100%	77%	65%	57%	51%	46%	42%	39%
usunięcie wad - punktowo	Pozostałe do usunięcia liczba wad	[szt.]	0	18060	27632	33719	38371	42246	45552	47526
	Koszty napraw punktowych - 10% - napawanie do 250 mm - 70% - HWR - 20% - spawanie "szeroki luz"	[tys. zł]	0,00 zł	22 038,20 zł	33 711,04 zł	41 137,18 zł	46 812,62 zł	51 540,12 zł	55 573,44 zł	57 981,72 zł
	Usunięto wad - tylko punktowo	[%]	0%	23%	35%	43%	49%	54%	58%	61%
	Koszt całkowity	[tys. zł]	375 328,70 zł	169 454,35 zł	120 687,66 zł	102 480,25 zł	93 430,08 zł	88 331,20 zł	85 367,17 zł	84 186,84 zł
Koszt usunięcia jednej wady		[zł/wad]	4 787,84 zł	2 161,63 zł	1 539,54 zł	1 307,28 zł	1 191,83 zł	1 126,79 zł	1 088,98 zł	1 073,92 zł



Rys. 15. Analiza kosztów usunięcia wad squat

Informacje zawarte w tab. 5 przedstawiono również w sposób graficzny na wykresie (rys. 15). Jak łatwo zauważyć, wraz ze zmniejszeniem liczby koniecznych do wykonania wstawek szynowych, koszt całkowity napraw maleje, wobec czego zasadne jest ograniczenie ich liczby do niezbędnego minimum. Na podstawie rys. 15 można również stwierdzić, że dla skupisk do 5 wad, najistotniejszym kosztem składowym jest koszt zabudowy wstawek szynowych. Natomiast dla większej liczby

wad w jednym skupisku, koszt napraw punktowych staje się kosztem dominującym. Koszt napraw punktowych charakteryzuje się również mniejszą dynamiką zmian, wobec czego będzie on mniej podatny na odchylenia związane z wahaniami cen, czy też ostatecznej liczby wad zakwalifikowanych do usunięcia. Wybierając optymalną metodę usunięcia wad należy mieć również na uwadze, że stosowanie napraw punktowych w lokalizacjach, w których występuje duża liczba wad nie jest racjonalne z uwagi na czas potrzebny na wykonanie prac jak również późniejszą jakość toru. Wobec powyższego przyjęcie wartości 5 szt. w skupisku, jako granicy pomiędzy naprawą punktową a wstawką szynową, jest zasadne zarówno pod względem ekonomicznym jak i technicznym.

4.2.2. Program likwidacji skupisk wad SQUAT

Na podstawie powyższej analizy PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. planuje w 2019 r. uruchomić program wymiany szyn, wstawek długości 30 m, ukierunkowany na wyeliminowanie największych skupisk wad squat. Dla potrzeb programu opracowano listę priorytetów, która to posłuży do wyboru lokalizacji, w których zostaną przeprowadzone wymiany:

1. lokalizacje z wielokrotnymi wadami kontaktowo-zmęczeniowymi typu squat;
2. lokalizacje z liniowymi wadami kontaktowo-zmęczeniowymi typu head-check;
3. lokalizacje z szynami z dużą liczbą wad skupionych:
 - 3.1. lokalizacje, na których wśród wad występują wady kontaktowo-zmęczeniowe (227, 2223),
 - 3.2. lokalizacje, na których występują inne wady, mogące prowadzić do powstania wad kontaktowo-zmęczeniowych, w szczególności wybuksowania wielokrotne (2252),
 - 3.3 wady, którym przypisano różne kody wg. katalogu wad w szynach [22];
4. ponadto w sytuacjach wyjątkowych – dopuszcza się zgłoszenie lokalizacji z wadami zaklasyfikowanymi w ramach badań defektoskopowych do natychmiastowej wymiany (N) lub wymiany (W).

Za lokalizację z wadami wielokrotnymi, zgodnie z wyżej przedstawionym założeniami, uznaje się pojedynczy tok szynowy o długości 30 m, na którym występuje więcej niż 5 wad. Dla pozostałych lokalizacji wydano zalecenia usuwania wad jedną z dostępnych metod punktowych.

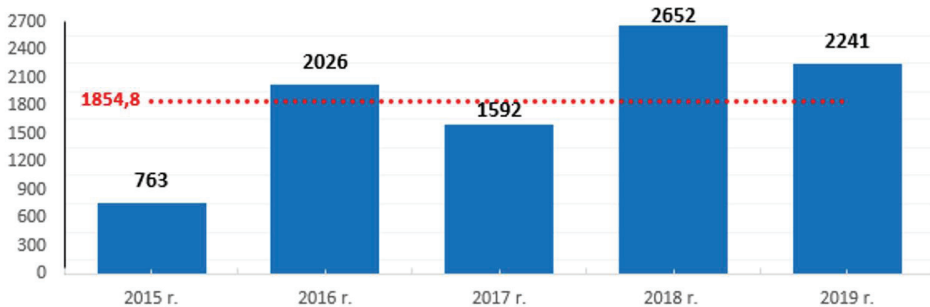
Po zakończeniu programu zostanie wykonana analiza, na podstawie której zostanie oceniona efektywność zrealizowanych prac, wstępnie szacuje się, że przeprowadzenia wymian szyn pozwoli na wyeliminowanie około 40% występujących w torach wad typu squat.

4.3. Zapobieganie powstawaniu wad (działania prewencyjne)

Najskuteczniejszą znaną obecnie metodą walki z wadami squat są działania profilaktyczne, mające na celu niedopuszczenie do ich powstawania, w szczególności jest to:

- stosowanie modyfikatorów tarcia (smarownic) – które zmniejszają wartość współczynnika tarcia występującego pomiędzy kołem a szyną, co w konsekwencji powoduje mniejsze siły ścinające w punkcie kontaktu - rys. 9. Wymagania odnośnie lokalizacji, w których zasadne jest stosowanie modyfikatorów tarcia, zostaną wprowadzone w ramach kolejnej nowelizacji *Standardów Technicznych – szczegółowych warunków technicznych dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem) – TOM I „Droga Szynowa*;
- wdrożenie cyklicznej strategii reprofilacji szyn, prowadzonej w trybie prewencyjnym, która jest zdecydowanie najskuteczniejszą i najbardziej zasadną ekonomicznie metodą zapobiegania powstawaniu wad typu squat. Z uwagi na powyższe zostanie ona szerzej omówiona.

Zadaniem reprofilacji, prowadzonej w trybie prewencyjnym, jest usunięcie drobnych nierówności oraz uszkodzeń występujących do głębokości około 0,5 mm, które to sprzyjają powstawaniu wad squat, jak również usunięcie warstwy WEL, w której zapoczątkowywane są pęknięcia. Wdrożenie cyklicznego szlifowania szyn, wg doświadczeń innych zarządców infrastruktury [3], zmniejsza koszty związane z utrzymaniem szyn nawet o 50%, podobne efekty wskazują również prace [6] i [9].



Rys. 16. Ilość kilometrów toru planowana do reprofilacji w latach 2015-2019

W pracy [9] została przedstawiona koncepcja wdrożenia strategii cyklicznej reprofilacji szyn na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., w ramach której zapotrzebowanie na szlifowania prowadzone w trybie prewencyjnym oszacowano na około 2600 km/rok. Na podstawie powyższych danych oraz ilości prac planowanych do wykonania w latach 2015-2019 (rys. 16), można oszacować, że w celu wdrożenia proponowanej strategii należałoby zwiększyć liczbę prac o około 745 km w skali roku, co wymagałoby poniesienia dodatkowych kosztów wysokości około 15 mln zł/rok. Niemniej, biorąc pod uwagę koszty oraz pracochłonność usuwania wad już powstałych, jak również dodatkowe korzyści reprofilacji, takie jak: usunięcie zużycia falistego, zapewnienie właściwego profilu poprzecznego szyny oraz usunięcie lub zmniejszenie innych wad występujących na powierzchni tocznej, wydaje się zasadne wdrożenie proponowanej strategii cyklicznej reprofilacji.

Jednocześnie należy wskazać, że przed wdrożeniem takiej strategii konieczne jest podniesienie wiedzy pracowników Spółki w zakresie tematyki reprofiliacji szyn, w szczególności uwypuklenia konieczności prowadzenia prac w sposób cykliczny, oraz poprawnej kwalifikacji odcinków do prac, tj. jeszcze przed pojawieniem się wad squat, lub po wcześniejszym usunięciu wad za pomocą technologii wskazanych w rozdziale 3.2. Mając na uwadze powyższe PKP Polskie Linie Kolejowych S.A. Biuro Dróg Kolejowych uruchomiło program szkoleń, w ramach którego omawiane są m.in. ww. zagadnienia.

5. Wnioski

Z uwagi na wciąż rosnącą liczbę wad squat, jak również rosnącą liczbę pęknięć i złamań szyn, których są one przyczyną, problem ten staje się coraz bardziej dostrzegalny. Ograniczenie liczby wad występujących na sieci kolejowej PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. jest wyzwaniem z jakim w najbliższych latach przyjdzie się zmierzyć zarządcy infrastruktury. Mając na uwadze powyższe, w referacie przedstawiono w sposób kompleksowy, działania konieczne do podjęcia w celu odwrócenia tego niekorzystnego trendu wraz z oszacowaniem kosztów związanych z ich wdrożeniem.

Bibliografia

- [1] Innotrack project no. TIP5-CT-2006-031415 D4.2.4 – Improved model for loading and subsequent deterioration due to squats and corrugation, 2009.
- [2] Innotrack project no. TIP5-CT-2006-031415 D4.2.6 – Recommendation of, and scientific basis for, minimum action rules and maintenance limits, 2009.
- [3] Innotrack project no. TIP5-CT-2006-031415 D4.5.3 – Fields of improvement in grinding practices as input for LCC evaluations, 2009.
- [4] Johnson R. , et al.: Understanding rails & rail welding, Permanent Way Institution, 2017, ISBN 978-0-903489-13-3.
- [5] Junghähnel W-D., Technologie spawania THERMIT® - prezentacja, V Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Spawalnictwo Dróg Szynowych”, Kraków 2013.
- [6] Grassie S., Rolling contact fatigue on the British railway system: treatment, *Wear* 258, 1310-1318, 2005.
- [7] Haubmann U., Rail Grinding – Integral part of technically and economically efficient maintenance - prezentacja, Karlsruhe 2013 (materiał niepublikowany).

- [8] Lichtberger B., Track Compendium, Eurail Press, 2011, ISBN 978-3-7771-0421-8.
- [9] Migdal M., Istotne czynniki warunkujące wybór strategii szlifowania szyn, VI Konferencji Naukowo-Technicznej: „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym – INFRASZYN 2013”, Zakopane 2013.
- [10] Neumayer J., Martensite/White Etching Layer - prezentacja, Meyrin 2018.
- [11] Negowski Z., Badania laboratoryjne próbek złączy szynowych, z gatunku stali R350HT- prezentacja, V Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Spawalnictwo Dróg Szynowych, Kraków 2013.
- [12] Pal S., et al., Surface damage on new AS60 rail caused by wheel slip, Engineering Failure Analysis, 22, 152-165, 2012.
- [13] Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M., Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation, Wear 284-285, 30-42, 2012.
- [14] Rail Damages, the Blue Book of RailTrack, 2001.
- [15] Railtech UK Limited, Proces Manual - Railtech PLA Including HWR, Startwell & Gasbox, ISSUE No. 5.3._Vers.1, 2013.
- [16] Steenbergen M., Dollevoet R., On the mechanism of squat formation on train rails – Part I: Origination, International Journal of Fatigue 47, 361-372, 2013.
- [17] Steenbergen M., Dollevoet R., On the mechanism of squat formation on train rails – Part II: Growth, International Journal of Fatigue 47, 373-381, 2013.
- [18] Strauch A., UIC 712 Rail Defect Meeting – prezentacja, Darmstadt, 2016 (materiał niepublikowany).
- [19] Sprawozdanie z badań laboratoryjnych Nr 17/L/2018, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Centrum Diagnostyki (materiał niepublikowany).
- [20] Tasak E., Ziewiec A., Parzych S., Wpływ wybranych czynników na pękanie rozjazdów kolejowych, IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Spawalnictwo Dróg Szynowych, Bochnia 2010.
- [21] Zili Li, Zhao X., et al., An investigation into the causes of squats – Correlation analysis and numerical modeling, Wear 265, 1349-1355, 2008.
- [22] UIC 712: Rail defects, International Union of Railway (UIC), Paris 2002.