

Kryteria obiektywnej oceny prognozowanych stanów osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych

W artykule przedstawiono kryteria obiektywnej oceny prognozowanych stanów osi zestawów kołowych trakcyjnych oraz tocznych. Jednym z kryteriów jest obserwacja propagacji pęknięcia w ustalonych okresach kontrolnych. Przedstawiono rolę badań ultradźwiękowych w całej metodzie prognozowania stanu osi zestawu kołowego. Przedstawiono stanowisko, dotyczące ograniczenia wieku eksploatacji osi zestawów kołowych jako środka zwiększającego niezawodność i bezpieczeństwo. Artykuł został opracowany w ramach projektu badawczo-rozwojowego Nr R 10 004806/2009 pt. „Mikroprocesorowy system diagnostyczny głównych systemów trakcyjnego pojazdu szynowego uwzględniający ocenę bieżącą i prognozowanie stanów”, finansowanego z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

1. Wstęp

Oś zestawu kołowego jest jednym z newralgicznych elementów pojazdu szynowego, decydującym o bezpieczeństwie eksploatacyjnym pojazdu szynowego. Osie zestawów kołowych mają 150 letnią historię i są przedmiotem stałego rozwoju konstruktorów, inżynierów zajmujących się obliczeniami wytrzymałościowymi oraz fachowców zajmujących się inżynierią materiałową. Element ten jest uznawany jako najbardziej obciążony w eksploatowanym pojeździe kolejowym. Problematyka wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawu kołowego została poruszona w opracowaniu OR-9666 [13]. Pomimo, że istnieje poważny postęp w zakresie metod obliczeniowych, które są przedstawione w normach europejskich PN-EN 13104:2009 (osie napędne) [10] oraz PN-EN 13103:2009 (osie toczne) [9] oraz znaczący postęp technologiczny wytwarzania osi i ich odbiorów, które są przedstawione w normie PN-EN 13261:2009 [11] elementy te są narażone na pęknięcie zmęczeniowe, co jest niejednokrotnie przyczyną poważnych katastrof kolejowych, powodujących znaczne straty materialne oraz wypadki śmiertelne. Po ostatniej katastrofie kolejowej w Viareggio we Włoszech pojawiają się głosy o ustanowienie maksymalnego wieku osi zestawów kołowych, po upływie którego oś należy wycofać z eksploatacji i złomować. Pogląd ten jest kompletnie błędny i nie jest uzasadniony z technicznego punktu widzenia, gdyż:

- oś jest zaprojektowana na zmęczenie wysokocykliczne, co oznacza że oś może pracować z nieograniczoną wytrzymałością zmęczeniową; jak wynika z obecnych doświadczeń eksploatacyjnych podczas 30 letniej eksplo-

atacji osie mogą być poddawane 10^9 cykli obciążeń

- o faktycznej wytrzymałości osi decyduje jej stan techniczny, a więc „bezwadliwość” w zakresie określonym przez PN-EN 13261:2009 [11]
- oś nowa jest w takim samym stopniu narażona na pęknięcia zmęczeniowe jak oś eksploatowana, co automatycznie podważa sens określania maksymalnego wieku eksploatacji osi.

Jak wykazuje praktyka eksploatacyjna wypadki kolejowe były spowodowane również pęknięciem osi w stanie nowym. Wynika to głównie z istnienia w każdym materiale defektów struktury krystalicznej jak dyslokacje, które są odpowiedzialne za odkształcenia plastyczne materiałów oraz mikropęknięcia i inne nieciągłości materiałów, które są miejscem inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Pęknięcia powstają w materiale już na etapie jego wytwarzania. Miejscami powstawania pęknięć są wszelkie nieciągłości struktury materiałowej. Na tej podstawie można wyciągnąć wnioski, że jednym z ważnych sposobów zapobiegania zniszczenia konstrukcji poprzez pęknięcie zmęczeniowe jest między innymi jest prawidłowe posługiwanie się metodami badań nieniszczących, których stosowanie pozwala na bezpieczną eksploatację. Skuteczność badań nieniszczących jest związana między innymi na precyzyjnym określeniu okresów kontrolnych osi zestawów kołowych.

2. Ustalenie okresów kontrolnych osi zestawów kołowych na podstawie symulacji komputerowej

2.1. Podstawy zagadnienia

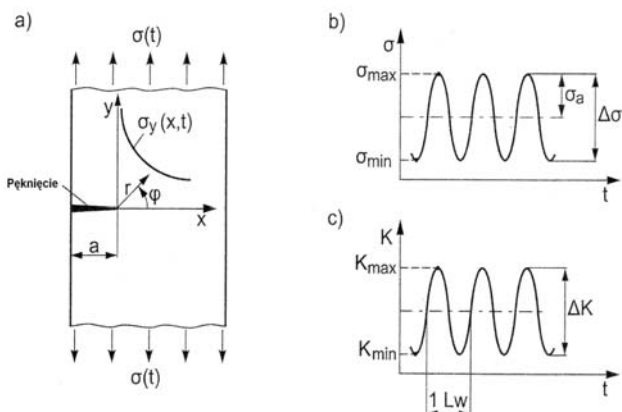
Podstawą do opracowania zagadnienia związanego z ustaleniem okresów kontrolnych dla metod badań nieniszczących osi zestawów kołowych były poważne szkody, jakie spowodowała katastrofa kolejowa, związana uszkodzeniem osi zestawu kołowego dalekobieżnego zespołu trakcyjnego przystosowanego do wysokich prędkości ICE, która miała miejsce na moście „Hohenzollernbrücke” w Kolonii (9.07.2008) [4]. Zdarzenie to zainspirowało do ustalenia kryteriów dla okresów kontrolnych dla badań osi zestawów kołowych. Jeśli weźmie się pod uwagę czas od początku eksploatacji dla osi nie wykazującej wad, to wówczas żywotność do pojawienia się pęknięcia (rysy) jest zasadniczą częścią całkowitej żywotności osi zestawu kołowego. Ta pierwsza faza eksploatacji osi zestawu kołowego może ulec skróceniu poprzez występowanie małych błędów, które pojawiły się na etapie wytwarzania i nie zostały wykryte lub powstały wskutek uszkodzeń podczas eksploatacji wywołanymi przez korozję lub uderzenia mechaniczne, które przyczyniają się do powstawania pęknięć zmęczeniowych. Jednak takie zjawiska nie mogą być przeszkodą do ustalenia okresów między-naprawczych. Istotny problem techniczny stanowi to, jakie pęknięcia lub rysy (wymiar i ich lokalizacja) mogą być pewnie wykryte za pomocą badań nieniszczących.

2.2. Przyczyny propagacji pęknięć

Przy pęknięciu zmęczeniowym każdego elementu konstrukcyjnego całkowita wytrzymałość zmęczeniowa składa się z dwóch części:

- ⇒ żywotności, wynikającej z inicjacji pęknięcia zmęczeniowego
- ⇒ żywotności, wynikającej z propagacji (rozwoju) pęknięcia zmęczeniowego.

Przy okresowo zmiennych obciążeniach osi jako elementu konstrukcyjnego w otoczeniu pęknięcia (rysy) zmęczeniowego powstaje pole naprężeń $\sigma_y(x,t)$, które może być scharakteryzowane przez czasowo zmienną intensywność naprężeń $K(t)$, co jest pokazane na rys.1. Cykliczna intensywność zmiany naprężeń ΔK jest decydującym parametrem dla propagacji pęknięcia przy obciążeniu zmęczeniowym.



Legenda:

- a) część konstrukcyjna z pęknięciem (rysa) o długości „a” przy czasowo zmiennym obciążeniu, określonej przy pomocy współrzędnych biegunowych „r” i „φ” na wierzchołku rysy i naprężeniem $\sigma_y(x,t)$ w otoczeniu rysy
- b) obciążenie części $\sigma(t)$ z amplitudą σ_a względnie $\Delta\sigma$ lub σ_{MAX} i σ_{MIN}
- c) współczynnik intensywności naprężeń $K(t)$ z cykliczną intensywnością naprężeń ΔK jak również maksymalnym współczynnikiem intensywności K_{MAX} i minimalnym współczynnikiem intensywności naprężeń K_{MIN}

Rys.1. Związek pomiędzy obciążeniem części i cyklicznym czynnikiem intensywności naprężeń ΔK

Pomiędzy cykliczną rozpiętością naprężeń $\Delta\sigma$ i aktualną długością pęknięcia (rysy) jak również współczynnikiem geometrycznym $Y_a(a)$ i współczynnikiem intensywności naprężeń ΔK obowiązuje zależność:

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y(a) = 2\sigma_a \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y(a) \quad (1)$$

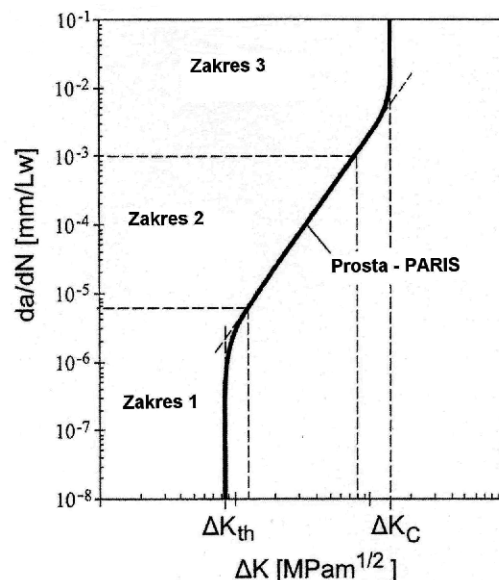
Wpływ na propagację pęknięć zmęczeniowych ma również współczynnik asymetrii cyklu R dla obciążeń okresowo zmiennych, który definiuje się zależnością:

$$R = \frac{\sigma_{MIN}}{\sigma_{MAX}} \quad (2)$$

gdzie:

- σ_{MIN} - minimalne naprężenia podczas cyklu zmęczeniowego
- σ_{MAX} - maksymalne naprężenia podczas cyklu zmęczeniowego.

Przy procesie propagacji pęknięcia zwiększa się długość rysy wraz ze zwiększającą się ilością cykli, przez co zwiększa się również cykliczny współczynnik intensywności naprężeń. Prędkość powstawania pęknięcia (rysy) jest zależna od materiału i musi być ustalona na drodze eksperymentalnej. Wraz ze wzrostem rysy na próbkach normalnych otrzymuje się tzw. krzywą prędkości powstawania rysy, która się zbliża asymptotycznie do dwóch granic, które są przedstawione na rys.2.



Legenda:

I zakres- małej prędkości pęknięcia od $0 \div 10^{-5}$ mm/cykl

II zakres-średniej prędkości pęknięcia od $10^{-5} \div 10^{-3}$ mm/cykl

III zakres- dużej prędkości pęknięcia od 10^{-3} mm/cykl.

Rys.2. Przedstawienie zależności pomiędzy prędkością powstawania pęknięcia i cyklicznym współczynnikiem intensywności naprężeń ΔK za pomocą krzywej da/dN

Prędkość propagacji pęknięcia (rysy) można wyznaczyć z zależności:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (3)$$

gdzie:

da - przyrost długości pęknięcia zmęczeniowego

dN - przyrost ilości cykli obciążeń zmęczeniowych.

Dolna granica wartości pulsującej przedstawia cykliczną intensywność naprężeń ΔK_{th} . Jeśli cykliczna intensywność ΔK znajduje się poniżej wartości tętniącej to pęknięcie (rysa zmęczeniowa), z punktu widzenia klasycznej teorii mechaniki pęknięcia nie jest zdolne do propagacji. Druga granica przedstawia obciążenie pęknięcia, od którego propagacja pęknięcia (rysy) nie jest już stabilna. Warunkiem, który obowiązuje jest to, że K_{MAX} osiągnie wartość K_C względnie:

$$\Delta K = \Delta K_C = (1 - R) \cdot K_C \quad (4)$$

gdzie:

K_C - wielkość krytyczna współczynnika intensywności naprężeń w przypadku, kiedy pęknięcie osiągnie długość krytyczną l_{KR} i wystąpi naprężenie krytyczne σ_{kr} ; współczynnik ten nazywany jest *odpornością na pęknięcie*.

Przebieg krzywej propagacji pęknięcia jest zależny od następujących czynników:

- ⇒ współczynnika asymetrii cyklu R
- ⇒ materiału osi
- ⇒ temperatury
- ⇒ mediów, znajdujących się w otoczeniu.

Wpływ tych czynników jest różny na zakresy oddziaływania tzn. **na zakres 1** z małą prędkością propagacji, **na zakres 2** ze średnią prędkością propagacji oraz **na zakres 3** z dużą prędkością propagacji pęknięcia. Ww. przedziały mają charakter umowny. Przykładowo wzrost współczynnika asymetrii cyklu R wywołuje większą prędkość propagacji pęknięcia da/dN w 1 i 3 zakresie aniżeli w zakresie 2. Aby można było przeprowadzić **prognozowanie żywotności** konieczny jest opis krzywej prędkości propagacji wg następującej zależności:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (5)$$

W tym przypadku występuje wiele koncepcji propagacji pęknięć. Tzw. prawo Parisa opisuje tylko i wyłącznie średni zakres (zakres 2), gdzie prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego można ustalić tylko i wyłącznie w średnim zakresie krzywej

prędkości propagacji pęknięcia zmęczeniowego. Ww. prędkość propagacji można wyznaczyć ze wzoru P.Parisa:

$$\frac{da}{dN} = C_p \cdot K^{m_p} \quad (6)$$

Zarówno C_p jak również m_p są współczynnikami doświadczalnymi, zależnymi od rodzaju materiału, z którego zbudowany jest element konstrukcyjny. Ponieważ prawa tego nie można zastosować dla dolnego zakresu prędkości propagacji pęknięcia zmęczeniowego, nie można go również stosować do prognozowania żywotności, ponieważ ogólnie biorąc prowadzi to do bardzo zachowawczych obliczeń żywotności. Wzór Parisa uznaje się za pierwszą zależność, w której uwzględniono wielkości z mechaniki pęknięcia. W przeciwieństwie do prawa Parisa wzór wg Formana-Mettu opisuje krzywą propagacji pęknięcia w zależności od współczynnika asymetrii cyklu zmęczeniowego R :

$$\frac{da}{dN} = C_{FM} \left[\frac{(1 - \gamma)}{(1 - R)} \cdot \Delta K \right]^{n_{FM}} \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{MAX}}{K_C} \right)} \quad (7)$$

Parametry ΔK_{th} (zakres progowego współczynnika intensywności naprężeń), K_C , C_{FM} , n_{FM} , p oraz q są zależne od gatunku materiału i można je ustalić na drodze doświadczalnej krzywej da/dN . Za wielkość K_{th} należy uważać taką wielkość K_{MAX} , dla której pęknięcie nie rozwija się w okresie odpowiadającym 10^6 cyklom, a której zwiększenie o 3% powoduje rozwój pęknięcia z prędkością nie większą od $3 \cdot 10^{-7}$ mm/cykl. Szczałkową (resztkową) wytrzymałość zmęczeniową elementu konstrukcyjnego aż do pęknięcia, można ustalić wychodząc z głębokości początkowej pęknięcia a_A poprzez całkowanie równania propagacji prędkości tworzenia się rysy. Przekształcając równanie (5) otrzymuje się zależność:

$$dN = \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (8)$$

Stąd można wyliczyć resztkową (szczałkową) wytrzymałość zmęczeniową N_B aż do wystąpienia pęknięcia (krytyczna głębokość pęknięcia a_C):

$$N_B = \int_{a_A}^{a_C} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (9)$$

2.3. Analityczne i numeryczne badania propagacji pęknięć zmęczeniowych

Do obliczeń wstępnych propagacji części i konstrukcji są do dyspozycji programy obliczeniowe, które zawierają rozwiązania analityczne dla określonych przypadków tworzenia się rys zmęczeniowych. Z drugiej strony występują programy za pomocą których można symulować metodą numeryczną propagację pęknięcia.

Dla prac studialnych nad parametrami propagacji rysy w częściach konstrukcyjnych z relatywnie prostą geometrią szczególnie przydatne są programy *Nasgro* oraz *Esacrack*. Program *Nasgro*, który wcześniej był opracowany przez NASA (ang. „National Aeronautics und Space Administration”) posiada duże zastosowanie dla pojazdów lotniczych i kosmicznych. Nie mniej jednak można go stosować w wielu innych dziedzinach techniki. Główny moduł *Nasfla* umożliwia między innymi badania propagacji pęknięcia w elementach i konstrukcjach przy cyklicznym obciążeniu. Struktura tego programu jest przedstawiona w tabeli 1.

Istotne moduły programu *Nasgro* do badań propagacji pęknięcia w elementach konstrukcyjnych Tabela 1

NASGRO		
NASFLA	Badania propagacji pęknięć zmęczeniowych	NASMAT
	Obliczenie krytycznej długości pęknięcia	Bank danych dotyczących materiału
	Obliczenie współczynnika intensywności naprężeń	

Program składa się z biblioteki konfiguracji geometrycznych i pęknięć (rys) zmęczeniowych z odpowiednimi rozwiązaniami współczynników intensywności wzrostu naprężeń. Konstruując na tych konfiguracjach pęknięć (rys) można przeprowadzić symulację propagacji dla stałych i zmiennych amplitud obciążenia. Ponieważ program *Nasgro* sprawdził się w zastosowaniach praktycznych, można go zastosować w propagacji pęknięć zmęczeniowych zestawów kołowych.

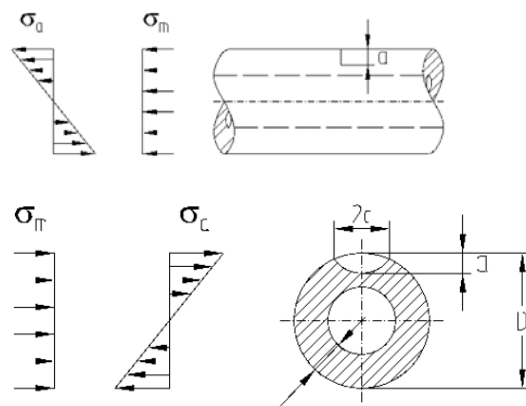
2.4. Czynniki wpływające na propagację uszkodzeń w osiach zestawów kołowych

Aby przeprowadzić symulację propagacji pęknięć w osiach zestawów kołowych, stosuje się wyżej omówiony program *Nasgro*. Za pomocą obliczeń wariacyjnych powinno się pokazać jakie poszczególne czynniki działają na propagację pęknięcia zmęczeniowego:

- wielkość zespołu (kombinacji) obciążeń
- naprężenia montażowe (naprężenia średnie)
- dane materiałowe z uwagi na mechanikę pęknięcia
- głębokość / długość wykrytego pęknięcia zmęczeniowego
- efekty sekwencyjne.

Symulacje propagacji pęknięcia dla osi zestawów kołowych dostarczają wytycznych dla ustalenia okresów kontrolnych za pomocą badań nieniszczących. Do symulacji dla osi zespołów trakcyjnych ICE przystosowanych do wysokich prędkości stosuje się model SC05 wg programu SC05. Model składa się z osi drążonej z półeliptycznym pęknięciem, znajdującym się

na powierzchni o głębokości „a” oraz długości „2c” (rys.3).



Legenda:

a) naprężenie maksymalne: $\sigma_0 = \sigma_m + \sigma_a$

b) naprężenie średnie: σ_m

Rys.3. Model pęknięcia SC05 wg programu *Nasgro*

Niniejszy model przedstawia rzeczywiste pęknięcie, który występuje w osi zestawu kołowego w pobliżu miejsca na osadzenie. W tym modelu pęknięcia jest możliwe, aby dokonać superpozycji stałego naprężenia i naprężenia zginającego. W obliczeniach osi zestawów kołowych naprężenie zginające odpowiada kombinacji amplitud w płaszczyźnie pęknięcia. Naprężenie o wartości stałej przedstawia naprężenie normalne, które występuje w pobliżu osadzania koła (podpasia) i jest ono wywołane przez siły montażu koła na osi zestawu kołowego. Dla obliczeń propagacji pęknięcia wielkościami zmiennymi są amplituda naprężenia, naprężenie średnie i geometria początkowego pęknięcia. Górną wartość naprężenia σ_0 można wyznaczyć z zależności:

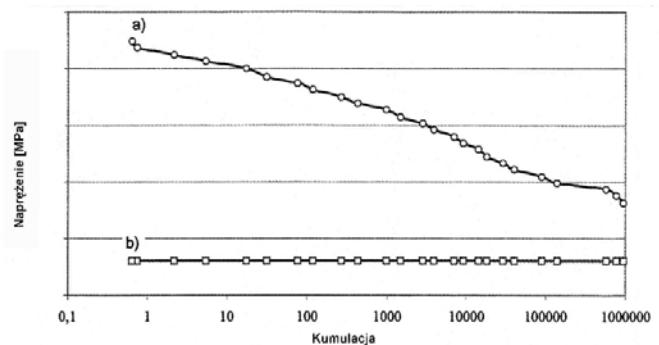
$$\sigma_0 = \sigma_m + \sigma_a \quad (10)$$

gdzie:

σ_m - naprężenie średnie

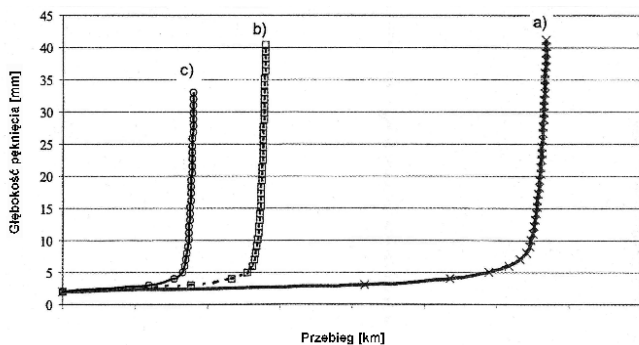
σ_a - amplituda naprężenia.

Kumulacja naprężeń dla badanych osi zestawów kołowych jest przedstawiona na rys. 4.

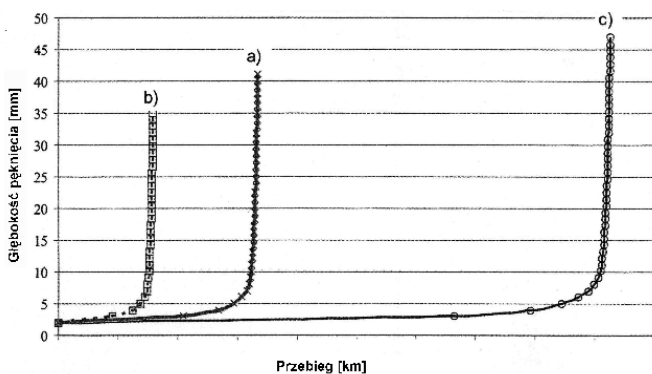


Rys.4. Kumulacja obciążeń dla badanych osi zestawów kołowych

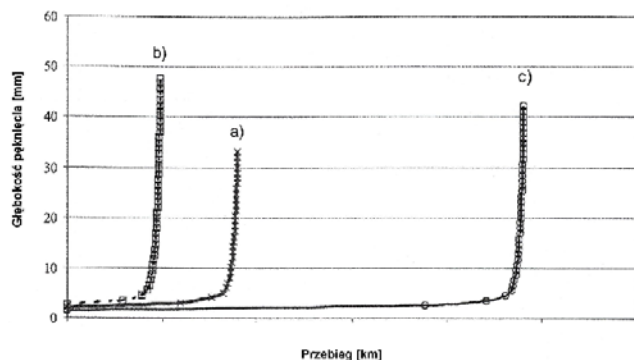
Za pomocą programu *Nasgro* można obliczyć kształt pęknięcia dla każdego cyklu. Kształt pęknięcia półeliptycznego o głębokości „a” oraz długości pęknięcia „2c” jest punktem wyjścia dla propagacji pęknięcia. Symulację przeprowadza się tak długo, aż współczynnik intensywności naprężeń K_{MAX} osiągnie wartość K_C . Z otrzymanych wartości można wyznaczyć głębokość pęknięcia w zależności od przebiegu kilometrowego, co jest pokazane na rys. 5, 6 i 7.



Rys.5. Zależność głębokości pęknięcia od przebiegu pojazdu w kilometrach; wpływ wielkości wyęczenia materiału na propagację pęknięć w osiach zespołów trakcyjnych ICE a) zespół amplitud wyprowadzony z jazd próbnych b) zespół amplitud zwiększony o 10% c) zespół amplitud zmniejszony o 10



Rys.6. Zależność głębokości pęknięcia od przebiegu pojazdu w kilometrach; wpływ średniego naprężenia na przebieg osi zestawu kołowego z pęknięciem a) zespół amplitud wyznaczony z jazd próbnych b) zespół z naprężeniem średnim 20,5 MPa c) zespół z naprężeniem średnim 30,5 MPa



Rys.7. Wpływ głębokości początkowej pęknięcia na przebieg osi zestawu kołowego; a) głębokość pęknięcia początkowego $a_A=2,0$ mm b) głębokość pęknięcia początkowego $a_A=2,5$ mm c) głębokość pęknięcia początkowego $a_A=1,5$ mm

Badania symulacyjne dostarczają wytycznych do ustalenia okresów kontrolnych dla badań nieniszczących osi zestawów kołowych. Należy zwrócić przy tym uwagę, że symulacje komputerowe można przeprowadzać dla osi zestawów kołowych przy uwzględnieniu wszystkich czynników. Jak wykazały przeprowadzone prace studialne znaczący wpływ na przebieg osi mają już małe zmiany tych czynników.

3. Ustalenie okresów kontrolnych osi zestawów kołowych na przykładzie zespołów trakcyjnych metra

3.1. Uwagi ogólne

Zagadnienie wytrzymałości zestawów kołowych uznano jako bardzo ważne z punktu widzenia dyspozycyjności i bezpieczeństwa eksploatacyjnego pojazdów trakcyjnych metra firmy Hamburger Hochbahn AG. Częstotliwość kontroli stanu osi zestawów kołowych podczas eksploatacji jest wprawdzie zdefiniowana przez producenta w instrukcji obsługi i konserwacji, ale ostatecznie przyjęto założenie że to użytkownik musi opracować program kontroli stanu osi zestawów kołowych, gdyż zna rzeczywiste warunki eksploatacji i dysponuje odpowiednim doświadczeniem. Jako bazę do późniejszych rozważań na ww. temat przyjęto badania ultradźwiękowe. Czynniki wpływające na ograniczenie wytrzymałości zmęczeniowej można podzielić na trzy grupy:

- błędy powstające na etapie produkcji (konstrukcja, produkcja i obróbka wykańczająca)
- błędy eksploatacyjne (nieodpowiednia eksploatacja, błędy popełnione podczas procesów kontrolno-naprawczych)
- nadzwyczajne wydarzenia podczas eksploatacji (obciążenia nadzwyczajne, działanie czynników obcych, wypadki kolejowe).

Opracowując nowe instrukcje kontroli należy wziąć pod uwagę, aby wykryć lub uniknąć występowania ww. błędów, które w istotny sposób zmniejszają wytrzymałość zmęczeniową osi. Jako granicę żywotności osi zestawu kołowego uznaje się wystąpienie przełomu zmęczeniowego lub wystąpienie pęknięcia. Aby uniknąć pęknięć osi zestawu kołowego bierze się za podstawę koncepcję „safe-life”, natomiast w celu uniknięcia przełomów zmęczeniowych bierze się za podstawę koncepcję „fail-safe”. Dotychczasowa eksploatacja zestawów kołowych bazowała na koncepcji „safe-life” i wychodziła z metody projektowania polegającej na przyjęciu kryterium bezpieczeństwa jakim jest granica wytrzymałości zmęczeniowej. Wadą takiego projektowania osi zestawów kołowych jest to, że nie jest określona żadna wartość graniczna, przy której oś może być jeszcze eksploatowana. Osie zestawów kołowych pojazdów kolejowych, które są eksploatowane w warunkach ruchu miejskiego osiągają 2×10^9 cykli i znajdują się w warunkach wysokocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej (ang.

„high-cycle-fatigue”), która nie została jeszcze dokładnie zbadana. Jak wynika z praktyki eksploatacyjnej osie zestawów kołowych mogą być eksploatowane przez bardzo długi czas, wynikający z przebiegu pojazdu szynowego. Jeśli określi się graniczny przebieg w kilometrach, to ryzyko eksploatacyjne jest bardzo małe, ponieważ okresy kontrolne stanu osi zestawów kołowych ograniczają się do potwierdzenia prawidłowości przyjętych obciążeń podczas projektowania. Największe ryzyko eksploatacyjne występuje wtedy, gdy zostanie osiągnięta faza eksploatacji, kiedy należy się liczyć z wystąpieniem pęknięć zmęczeniowych. W tym przypadku należy skorzystać z koncepcji „fail-safe”, która uwzględnia nałożenie się wielu niekorzystnych zdarzeń. W takiej fazie eksploatacji należałoby zabezpieczyć przebieg eksploatacyjny po wystąpieniu pęknięcia. Kontrole, które obecnie muszą wynikać z propagacji pęknięcia, służą wykryciu rysy. Pomiedzy dwoma ekstremami występuje faza przejściowa, w której nie można z całkowitą pewnością wykluczyć powstania pojedynczych pęknięć, ale zasadniczo nie są one oczekiwane. Prawdopodobieństwo wystąpienia pojedynczych pęknięć zmęczeniowych jest wyraźnie małe. W takiej fazie eksploatacyjnej okresy kontrolne wynikają z propagacji pęknięć. Biorąc pod uwagę koncepcję bezpieczeństwa, należy wyjść z założenia się wielu niekorzystnych zdarzeń. Tak więc należy wyjść z założenia, że występują trzy zadania przy określaniu koncepcji okresów kontrolnych stanów osi zestawów kołowych:

- określenie granicznych przebiegów na bazie doświadczeń eksploatacyjnych przy uwzględnieniu koncepcji bezpieczeństwa wynikającej z granicy zmęczenia i niezawodności eksploatacji
- określenie szcztakowego (resztkowego) przebiegu po przyjęciu pęknięcia, biorąc pod uwagę aspekt mechaniki pęknięcia w zakresie liniowym, jeśli chodzi o mechanikę pęknięcia
- opracowanie zabiegów technicznych dla przejściowej fazy eksploatacyjnej.

3.2. Obciążenia osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych metra

W celu zagwarantowania większej wiarygodności jeśli chodzi o wytrzymałość zmęczeniową jest konieczne, aby ustalić rzeczywiste obciążenia działające na osi zestawu kołowego. Obciążenia te wyznaczono dla starych osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych typu DT3 metra (rys.8) oraz nowych osi zestawów kołowych dla pojazdów trakcyjnych typu DT4 (rys.9).

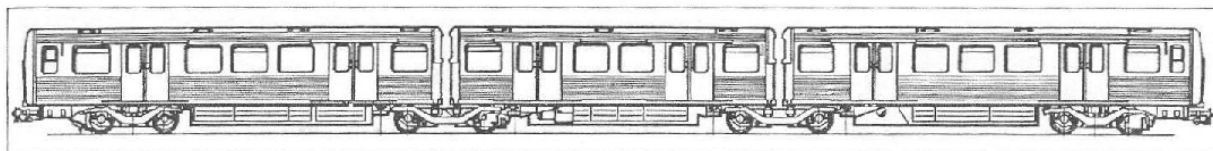
Odpowiednie dane dotyczące zestawów kołowych są przedstawione w tabeli 2.

Na całej sieci Hamburger Hochbahn zostały pomierzone obciążenia eksploatacyjne dla osi tocznych oraz napędnych dla trzech pojazdów trakcyjnych. Jak wykazały przeprowadzone pomiary wysokość obciążenia zależy znacząco od następujących warunków eksploatacyjnych:

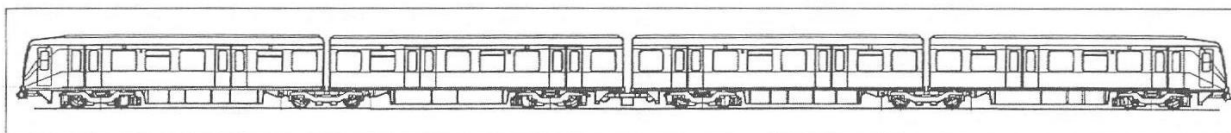
- stopnia obsadzenia przez podróżnych, przy czym główne oddziaływanie skierowane jest na obciążenie statyczne koła
- usytuowania osi zestawu kołowego w wózku (zestaw kołowy nabiegający lub swobodny)
- przejazd przez łuk toru (ekstremalny przypadek eksploatacyjny z uwagi na obciążenia)
- zastosowanie rozruchu i hamowania jako dodatkowej superpozycji obciążeń.

Wartości pomiarowe, wynikające z jazdy w łuku zostały przeanalizowane bardzo dokładnie. Przeanalizowano łącznie 2000 jazd przez łuk, które wywołują wysokie obciążenia podczas przejazdu dla osi tocznych i napędnych w przypadku zestawu kołowego nabiegającego. Poza tym stwierdzono:

- bardzo wyraźną zależność obciążenia osi od promienia łuku toru
- bardzo mały wpływ zarówno niezrównoważonego przyspieszenia poprzecznego jak również błędów ułożenia toru w ramach tolerancji eksploatacyjnych
- bardzo mały poziom obciążenia spowodowany momentem skręcającym.



Rys.8. Zespół trakcyjny typu DT3 metra Hamburger Hochbahn AG [2]

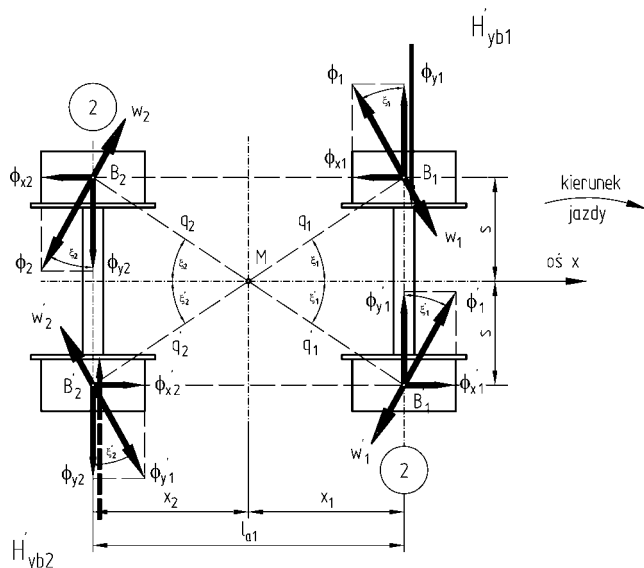


Rys.9. Zespół trakcyjny typu DT4 metra Hamburger Hochbahn AG [2]

Tabela 2

Rok budowy	Zespół trakcyjny typu DT3	Zespół trakcyjny typu DT4	DT4, seria 5-6
Rok budowy	1969÷1971	1989÷2000	2002÷2005
Ilość zestawów kołowych	544	1032	480
Konstrukcja	wg DB Blatt Fw28.02.8	ORE-Bericht B136/Rp11 [12]	PN-EN 13104 [10]
Przebieg	3,4 miliona kilometrów	2,0 miliona kilometrów	0,7 miliona kilometrów
Wyniki po kontroli UT	Po wystąpieniu pęknięcia zmęczeniowego po 2,5 milionie cykli	Brak pęknięcia	Brak pęknięcia
Średnica podpiaścia	140 mm	142 mm	142 mm
Materiał	34CrMo4	25CrMo4	25CrMo4

Ponieważ wyników pomiarów nie można było odnieść do normy PN-EN 13104:2009 [10] zbudowano dla tych pojazdów model obliczeniowy wg metody Heumanna, który uwzględnia opory tarcia przy obrocie kompletnego wózka na odcinkach prostych toru (rys.10).



Rys.10. Siły działające na wózek podczas przejazdu przez łuk toru wg metody Heumanna

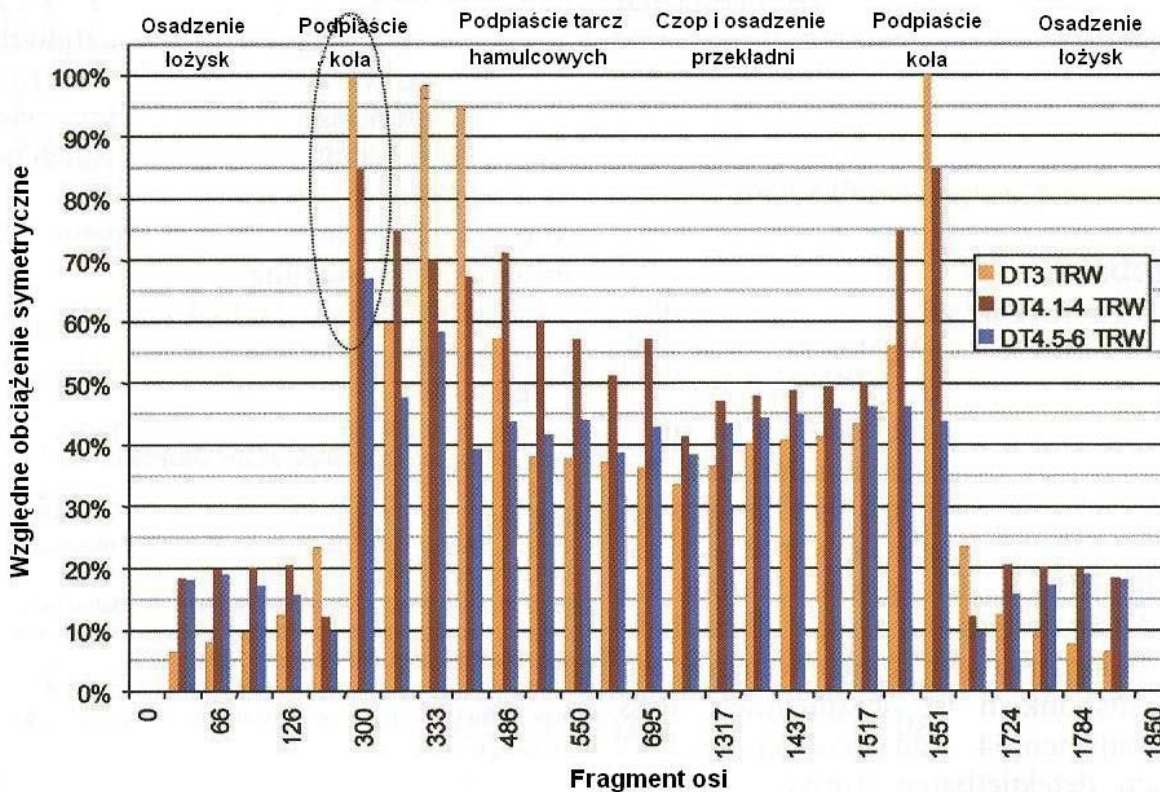
Uwzględniono, że przy wysokich obciążeniach podczas przejazdu przez małe promienie łuku toru ($R < 80$ m), należy wziąć pod uwagę bardzo wysokie współczynniki przyczepności wynoszące $\mu = 0,6$. Ponieważ warunki eksploatacyjne wpływają na rzeczywiste obciążenia osi zestawów kołowych, konieczne jest odwołanie rzeczywistego „tła eksploatacyjnego”. Rzeczywiste warunki eksploatacyjne wynikają z tabeli 3.

Stopień obsadzenia podróznymi zespołów trakcyjnych metra Hamburger Hochbahn AG [2] Tabela 3

Stopień obsadzenia pojazdu	0+25%	25+50%	50+75%	75+100%
Ilość pasażerów	0÷138	139÷277	278÷415	416÷554
Nacisk zestawu kołowego na tor	63÷72 kN	72÷81 kN	81÷90 kN	90÷100 kN
Udział na trasie	77,5%	21,2%	1,28%	0,02%

3.3. Określenie przebiegu eksploatacyjnego bez wystąpienia pęknięć

Określenie przebiegu bez występowania pęknięć można było przeprowadzić tylko dla osi zespołów trakcyjnych DT4 na bazie doświadczeń eksploatacyjnych zebranych z osi zestawów kołowych zespołów trakcyjnych typu DT3, które posiadały większy przebieg kilometrowy. Przyjęto założenie, że można uwzględniać tylko pozytywne doświadczenia eksploatacyjne, ale zdobyte tylko z rzeczywistymi obciążeniami eksploatacyjnymi, a nie z obciążeniami przyjętymi na etapie projektowania i zaczerpniętymi z odpowiednich przepisów. W przypadku osi zestawu kołowego zespołu trakcyjnego typu DT3 wykryto pęknięcie po przebiegu wynoszącym 2,5 miliona kilometrów. Pęknięcie to znajdowało się na podpiaściu pod piastą koła. Nie wykryto dalszych pęknięć podczas regularnych badań ultradźwiękowych, pomimo że zespoły trakcyjne przejechały dalsze 900 000 km. Doświadczenia eksploatacyjne zostały odpowiednio udokumentowane i przestudiowane. Porównanie cyklicznego obciążenia trzech konstrukcji zestawów kołowych zespołów trakcyjnych DT3 i DT4 w poszczególnych przekrojach osi przedstawiono na rys.11.



Rys.11. Porównanie względnych obciążeń osi zestawów kołowych w poszczególnych przekrojach dla zespołów trakcyjnych typu DT3, DT4.1-4 oraz DT4.5-6 [2]

Jak wynika z porównania graficznego najbardziej wyteżonym fragmentem osi zestawu kołowego jest wewnętrzna krawędź osadzenia (podpiaścia) koła i można go uznać jako „miejsce krytyczne”. Przyjmując wyteżenie materiału w tym miejscu dla osi zestawu kołowego 100%, okazuje się, że miejsce to jest obciążone 85% dla osi zestawu kołowego zespołu trakcyjnego typu DT4.1-4 oraz 67% dla osi zestawu kołowego zespołu trakcyjnego typu DT4.5-6. Koncepcja zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacyjnego polega na określeniu sumy uszkodzeń D , którą można ustalić z hipotezy kumulacji uszkodzeń na podstawie krzywej Wöhlera. Korzystne jest to, że można włączyć wszystkie działające obciążenia zewnętrzne do „działania powodującego uszkodzenia”. Wadą jest duży wpływ przebiegu krzywej Wöhlera danego elementu konstrukcyjnego na wybór hipotezy kumulacji uszkodzeń, co powoduje że obliczenie wytrzymałości eksploatacyjnej bez przeprowadzenia równoległych badań nie może dostarczyć absolutnie pewnych wyników. Bardzo przydatne są obliczenia wytrzymałości eksploatacyjnej za pomocą fikcyjnych krzywych Wöhlera do oceny rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Na bazie zaproponowanej metody do ustalenia ekwiwalentnej amplitudy wywołującej uszkodzenia należy określić sumę uszkodzeń dla poszczególnych osi zestawów kołowych, wskutek czego można porównać wzajemnie przebiegi eksploatacyjne bez pęknięcia. Obliczenia cyklicznych naprężeń wykazały, że wewnętrzna krawędź podpiaścia (osadzenia) koła jest

najbardziej wyteżonym przekrojem osi. Określenie sumy uszkodzeń odbyło się na bazie mieszanego zespołu obciążeń, stosownie do różnych przebiegów eksploatacyjnych pojazdów. Aby określić sumę uszkodzeń wyznacza się fikcyjną krzywą Wöhlera za pomocą dwóch różnych metod. Obydwie metody odpowiadają modyfikacji hipotezy uszkodzeń wg Minera zgodnie ze wzorem:

$$n_i = n_D \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^k \quad (11)$$

Obydwie metody 1 i 2 różnią się wzajemnie parametrami, co jest przedstawione w tabeli 4.

Parametry fikcyjnych krzywych Wöhlera wg metody 1 i 2
Tabela 4

Określenie	Metoda 1	Metoda 2
Punkt załamania krzywej Wöhlera	10^6	10^7
Współczynnik pochylenia krzywej Wöhlera przed punktem załamania $k=k_1$	7	5
Współczynnik pochylenia krzywej Wöhlera przed punktem załamania $k=k_2$	$k_2=2k_1-1$	$k_2=2k_1-2$
Suma uszkodzeń do określenia naprężenia na punkcie załamania D krzywej Wöhlera	0,3	0,5

Sumę uszkodzeń tworzy się z udziałów uszkodzeń „n” klas naprężeń wg następującej zależności:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad (12)$$

Doświadczenia eksploatacyjne wykazały, że nie powstało żadne pęknięcie osi zestawu kołowego napędzonego zespołu trakcyjnego typu DT3 po osiągnięciu przebiegu wynoszącego 2,5 miliona kilometrów. W wyniku obliczeń granicy zmęczenia dla osadzenia koła dla zespołów trakcyjnych typu DT4.1-4 oraz DT4.5-6 okazało się, że jest ona odpowiednio o 26% oraz 18% większa niż dla zespołu trakcyjnego DT3, co wykazują następujące zależności:

$$\sigma_D \cdot (DT4.1-4) = 1,26 \cdot \sigma_D (DT3) \quad (13)$$

$$\sigma_D \cdot (DT4.5-6) = 1,18 \cdot \sigma_D (DT3) \quad (14)$$

Sumę uszkodzeń D dla poszczególnych osi zestawów kołowych przedstawiono w tabeli 5.

Suma uszkodzeń D dla poszczególnych osi zestawów kołowych zespołów trakcyjnych DT3 i DT4 Hamburger Hochbahn AG wg [2]
Tabela 5

Suma uszkodzeń	Metoda 1	Metoda 2
Zespół trakcyjny typu DT3	0,03	0,5
Zespół trakcyjny typu DT4.1-4	0,05	0,18
Zespół trakcyjny typu DT4.5-6	0,002	0,027

3.4. Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań oraz analiz

Tak więc przedsiębiorstwo Hamburger Hochbahn AG dysponuje 35-cio letnimi doświadczeniami w zakresie eksploatacji osi zestawów kołowych zespołu trakcyjnego typu DT3. Doświadczenia te odnoszą się do przebiegu wynoszącego maksymalnie 3 400 000 km. Po przebiegu 2 500 000 kilometrów wykryto pęknięcie w jednej osi zestawu kołowego. W wyniku przeprowadzonej kontroli za pomocą badań ultradźwiękowych okazało się, że pozostałe 543 zespołów trakcyjnych typu DT3 osie nie wykazały żadnych pęknięć. Biorąc pod uwagę, że sieć kolejowa metra jest zamknięta, sposób eksploatacji w przedsiębiorstwie przewozowym, jak również baza danych jest określona przez pomiary, obciążenia są wyznaczane wystarczająco dokładnie. Dane te mogą służyć jako baza referencyjna. Poprzez obliczenia z uwzględnieniem obciążeń, przyjętych z rzeczywistej eksploatacji można udowodnić na podstawie koncepcji bezpieczeństwa opartej o kryteria wytrzymałości zmęczeniowej oraz eksploatacyjnej można udowodnić, że zarówno względne cykliczne obciążenia jak również względne kumulacje uszkodzeń dla osi zestawów kołowych zespołu trakcyjnego typu DT4 wypadają korzystniej aniżeli dla zespołu trakcyjnego typu DT3. Można stwierdzić, że dla osi zestawów kołowych zespołów

trakcyjnych typu DT4 występuje duży zapas bezpieczeństwa, który gwarantuje przebieg wynoszący 2 500 000 kilometrów bez wystąpienia pęknięcia, pod warunkiem że nie ma oddziaływań żadnych nadzwyczajnych obciążeń.

4. Znaczenie badań nieniszczących

4.1. Uwagi ogólne

Aby zapewnić prawidłowy przebieg procesu prognozowania stanu osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych konieczne **jest prawidłowe przeprowadzenie badań nieniszczących**. One umożliwiają rozstrzygnięcie, czy badana część konstrukcyjna lub badany podzespół w zależności od ustalonych przepisów naprawczych może być dalej eksploatowana lub wymontowana względnie naprawiana. Z przeprowadzonej analizy wynika, że badania nieniszczące muszą być wykonane w sposób niezawodny, gwarantujący odpowiedni poziom jakości.

Badania nieniszczące można zaliczyć do procesów specjalnych tj. procesów, które z uwagi na ich dużą subiektywność ocen, powodują że ich wiarygodność zależy od wielu różnorodnych czynników i działań, wymagających odpowiednich kwalifikacji oraz przeprowadzenia walidacji/kwalifikacji ich zdolności do określonego celu oraz potwierdzenia określonych kompetencji. Do takich czynników i działań można zaliczyć te przedstawione poniżej i które można połączyć w tzw. łańcuch zapewnienia jakości jaki powinien być zastosowany celem spełnienia i akceptacji określonych wymagań oraz potwierdzenia określonych kompetencji:

1. Badania naukowe i rozwój badań nieniszczących
2. Normalizacja w dziedzinie badań nieniszczących
 - normy wyboru i badań
 - specyfikacje techniczne
 - przepisy techniczne
3. Procedury/instrukcje badawcze badań nieniszczących
 - walidacja i kwalifikacja procedur/ instrukcji badawczych
 - niepewność pomiaru /badania
4. Wyposażenie pomiarowe i badawcze (WP i B)
 - wzorcowania/ kontrola/ charakterystyka/nadzór nad WP i B
 - walidacja i kwalifikacja WP i B
 - szkolenia w zakresie wykorzystania WP i B
5. Personel przeprowadzający badania nieniszczące
 - szkolenie i certyfikacja personelu badań nieniszczących
 - certyfikacja personelu badań nieniszczących
 - upoważnienie i nadzór nad personelem
 - czynnik ludzki- cechy i czynniki psychofizyczne
6. Środowisko przeprowadzenia badań
7. Audity

Spełnianie przedstawionych zależności może być uzyskane w przypadku, jeżeli:

- każdy z wymienionych elementów będzie oddziaływał w sposób skuteczny na inne
- pod warunkiem spełnienia odpowiednich wymagań i kryteriów akceptacji lub kwalifikacji (np. spełnienia odpowiednich wymagań, kryteriów akceptacji lub kwalifikacji metody)
- sam element będzie „mocny” np. stanem dotyczących swego udokumentowania (normami, specyfikacjami lub wytycznymi) lub zapewnieniem odpowiednich instrukcji stosowania lub określonych uznanych zasad kwalifikacji personelu przeprowadzającego odpowiednie badania.

Zasadniczym warunkiem zapewnienia jakości badań nieniszczących jest ustanowienie odpowiedniego systemu zarządzania jakością w celu sterowania wszystkimi działaniami, które dotyczą jakości świadczonych usług badawczych. System jakości producenta, jednostki badawczej lub laboratorium badawczego prowadzącego badania nieniszczące powinien uwzględniać w „jednolity i uporządkowany sposób”, a przede wszystkim w skuteczny sposób przedstawione wyżej elementy łańcucha zapewnienia jakości w celu wykazania, że wszystkie zostały przewidziane i istnieją między nimi zależności i relacje.

4.2. Status badań nieniszczących zgodnie z kartą UIC 960 [8]

Zgodnie z kartą UIC 960 [8] przez badania nieniszczące definiuje się jako metody, które przeprowadza się bez uszkodzenia części pojazdu lub podzespołów i które służą wykryciu możliwych pęknięć (rys) lub innych uszkodzeń spowodowanych w eksploatacji podczas napraw.

W zapewnieniu prawidłowej jakości badań nieniszczących istotnym czynnikiem jest kwalifikacja i certyfikacja personelu do badań, co jest szczegółowo przedstawione w karcie UIC 960 [8]. Zgodnie z niniejszą kartą:

- **kwalifikacja pracownika** polega na uznaniu jego zawodowej wiedzy, jego zdolności, doświadczenia i przydatności fizycznej, wskutek czego jest w stanie, aby wykonać powierzone mu zadania w zakresie badań nieniszczących. W przypadku certyfikacji chodzi o metodę, w wyniku której niezależna instytucja udziela pisemnego zapewnienia co do tego, że sprawdzający metodami nieniszczącymi posiada niezbędne kompetencje w zgodności z ustalonymi warunkami ramowymi w normie europejskiej EN 473 [5]. Powyższa norma zawiera przepisy na temat udzielania certyfikatu dla kwalifikowanych pracowników.

- **autoryzacja badawcza** polega na uznaniu kompetencji i wystawieniu wykwalifikowanemu pracownikowi zgodnie z EN 473 [5] pisemnej autoryzacji badawczej przez przełożonych przy uwzględnieniu szczególnych wiadomości i przydatności do pracy jak również znajomości przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy, które należy przestrzegać.
- **niezależna instytucja certyfikująca** administruje metodami certyfikacji personelu do badań nieniszczących w zgodności z normą europejską EN 473 [5] i wymaganiami normy europejskiej EN 45013 [6]. W większości krajów Unii Europejskiej działają niezależne instytucje, które są akredytowane przez instancje krajowe.
- **autoryzowana instytucja certyfikująca** jest całkowicie niezależna i jest autoryzowana przez niezależną instytucję, aby przygotować i przeprowadzać badania kwalifikacyjne personelu do badań nieniszczących. W przypadku kwalifikacji i certyfikacji przedstawionej w niniejszej karcie chodzi o Komitet Certyfikacyjny Kolejnictwa do Napraw, który był autoryzowany przez niezależną, krajową instytucję do przeprowadzenia certyfikacji w zakresie napraw krajowych.
- **centrum badawcze** jest dopuszczone bezpośrednio przez niezależną instytucję lub przez autoryzowaną instytucję, w której odbywają się badania kwalifikacyjne. W tym przypadku chodzi o centrum, które dysponuje odpowiednimi kompetencjami, urządzeniami i pomieszczeniami do badań w jednym z obszarów zastosowań napraw kolejowych:
 1. zestawy kołowe (koła, pełne osie i osie drążone, układy biegowe)
 2. wózki i połączenia (ramy wózków, wahacze, prowadniki, pojedyncze części jak również części usprężynowania urządzenia ciągnowozderżnego).

Wykaz instytucji certyfikujących oraz instytucji akredytujących jest przedstawiony w tabeli 6.

a. ZFP: badania nieniszczące

Instytucje certyfikujące

DGZFP-DPZ- Niemieckie Towarzystwo dla Badań Nieniszczących-Ośrodek Certyfikujący Personel

BANT- Belgijskie Stowarzyszenie Badań Nieniszczących

COFREND- Francuskie Stowarzyszenie Badań Nieniszczących

PCN- Ośrodek Certyfikacji Personelu dla Badań Nieniszczących

CIC-PND- Włoski Ośrodek Badań Nieniszczących

Kraj Unii Europejskiej	Instytucja certyfikująca personel dla ZFP ^a	Akredytacja		Autoryzowana instytucja kolejowa lub równorzędna
		Data	Krajowa instytucja	
Niemcy	DGZfP	1.3.1994	TGA	DGZfP(DGZ)
Belgia	BANT	(procedura w toku)	BELCERT	(procedura w toku)
Francja	CONFRED	(procedura w toku)	BELCERT	(procedura w toku)
Wielka Brytania	PCN	04.1993	NACCB	Railways Sektor
Włochy	CIC-PND	25.01.1994	SINCERT	CIC-PND
Holandia	SKO	25.06.95	Road Voor de certificate	Zintegrowany Sektor kolejowy w zakresie przedsiębiorstwa

SKO- Szwajcarska Organizacja Kadrowa

Instytucje akredytujące

TGA- Stowarzyszenie d.s. Akredytacji Sp. z o.o.

BELCERT- Belgijskie Stowarzyszenie Akredytacji

COFRAC- Francuski Komitet Akredytacji dla Certyfikowanych Pojazdów

NACCB- Rada Narodowa Akredytacji dla Certyfikowanych Pojazdów

SICERT- Narodowy Urząd ds. Akredytacji dla Certyfikowanych Pojazdów

Karta UIC 960 [8] uwzględnia trzy stopnie kwalifikacji dla pracowników, wykonujących badania nieniszczące:

- **pracownik stopnia 1**, który posiada kwalifikacje do przeprowadzenia badań nieniszczących według pisemnych wskazań, w których jest ustalony sposób postępowania dla badań oraz regulacje, które należy przeprowadzić jak również kryteria klasyfikacyjne wyrażone w sposób jak przy podaniu danych o nieregularnościach zastosowanej metody
- **pracownik stopnia 2**, który jest wykwalifikowany do przeprowadzenia badań i kontroli tych prac, które zostały powierzone pracownikowi stopnia 1 i któremu on świadczy pomoc w problemach interpretacyjnych otrzymanych wyników badań; pracownik ten musi posiadać kwalifikacje do przygotowania i opracowania pisemnych instrukcji w zależności od poleceń, które zostały mu wydane
- **pracownik stopnia 3**, który jest wykwalifikowany do określenia metody i do ustalenia metod zastosowania jak również metod badawczych, które należy zastosować w zależności od przepisów naprawczych i rzeczywistych warunków pracy; pracownik musi dalej wykazywać zdolności do weryfikacji przygotowanych instrukcji przez pracowników stopnia 2 i do kontroli ich

właściwego zastosowania. Pracownik stopnia 3 może być powołany do kontroli badań kwalifikacyjnych w centrum badawczym.

Badania kwalifikacyjne odbywają się w centrum badawczym, które może być dopuszczone przez niezależną instytucję certyfikującą lub autoryzowany komitet sektora kolejowego. Badania kwalifikacyjne są prowadzone przez pracowników stopnia 3, którzy są wyznaczani przez ww. instytucje. Badania te przeprowadza się zgodnie z przepisami normy europejskiej EN 473 [5] wg sporządzonego na piśmie porządku metodologicznego, który został dopuszczony przez ww. wymienioną niezależną instytucję.

Kandydaci do kwalifikowania muszą być przeszkoleni w zasadniczych podstawach stosowanych metod pomiarowych jak również metod zastosowania w odpowiednim zakresie częściowym przy wprowadzeniu do techniki kolejowej, przy czym czas szkolenia pozostawia się do uznania przedsiębiorstwu kolejowemu. Dla pracowników stopnia 1 i 2 wymagane czasy szkolenia dla różnych metod badawczych są przedstawione w tabeli 7.

Dla pracowników stopnia 3, którzy dysponują fachową wiedzą naukową i inżynierską ustala się dodatkowe wykształcenie do przeprowadzenia badań nieniszczących i wytycznych normy europejskiej EN-473 [5]. Badania kwalifikacyjne dla pracowników stopnia 1 i 2 składają się z trzech części:

- ogólnej ankiety do podstawowych zasad odpowiedniej metody badawczej
- specjalnej ankiety do metody badawczej oraz odpowiednio zastosowanych zakresów częściowych kolejnictwa
- praktycznej kontroli o wybranej metodzie badawczej, która jest reprezentatywna dla metod i badań, które są rzeczywiście praktykowane w odpowiednim zakresie częściowym kolejnictwa i odbywa się na podstawie bezbłędnych, wzorcowanych części lub podzespołów.

Minimalne czasy szkolenia dla pracowników stopnia 1 i 2 w godzinach wg karty UIC 960 [8] Tabela 7

Metoda badań nieniszczących	Stopień 1 szkolenia	Stopień 2 szkolenia	
		Jako dołączenie do szkolenia stopnia 1	Bezpośrednie przystąpienie do szkolenia
badań ultradźwiękowych (UT)	80	80	160
badań magnetycznych (MT)	24	24	48
badań prądami wirowymi (ET)	40	14	80
badań penetracyjnych (PT)	16	24	40
badań optycznych (VT)	czas zastrzeżony	czas zastrzeżony	

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że dla osi zestawów kołowych tocznych oraz trakcyjnych można prognozować ich stan techniczny. Do tego celu służą postawy teoretyczne, do której można zaliczyć mechanikę pęknięcia oraz metody doświadczalne. Z opisanych metod teoretyczno-doświadczalnych wynika, że określanie wieku zestawów kołowych jako kryterium kwalifikacji jest pozbawione sensu technicznego. Bardziej obiecujące są techniki prognozowania oparte na ustaleniu rzeczywistej granicy zmęczenia opartej o realne siły występujące w eksploatacji [1]. Jednym z kryteriów kwalifikacji osi może być przebieg kilometrowy, który w przypadku pojazdów trakcyjnych musi być powiązany z rzeczywistym zespołem obciążeń, działającym na oś zestawu kołowego. Stąd wynika konieczność „rejestracji rzeczywistego widma obciążeń”, o które powinien zabiegać właściciel pojazdu oraz infrastruktury. Jednym z istotnych parametrów decydującym o kwalifikacji osi zestawów kołowych do eksploatacji jest stosowanie badań nieniszczących. Ważna jest częstotliwość wykonywanych badań kontrolnych, aby można było zawczasu wykryć pęknięcie zmęczeniowe w osi zestawu kołowego. Poważnym wsparciem dla zwiększenia żywotności osi zestawów kołowych jest norma europejska PN-EN 13261:2009 [11]. Przepisy tej normy w zakresie wytwarzania, procesów kontrolnych i odbiorczych stanowią istotny postęp w stosunku do dotychczas obowiązującej karty UIC 811-1 [7]. Podniesienie jakości wyprodukowanych zestawów kołowych, a w szczególności poprawienie zabezpieczenia przed korozją przez zastosowanie odpowiedniej jakości powłok malarskich przyczynia się niewątpliwie do zwiększenia żywotności osi zestawów kołowych [3]. Zgodnie z obecnymi oczekiwaniami ze strony użytkowników taboru kolejowego producent powłok malarskich powinien udzielić gwarancji na okres 5 do 8-miu lat. Wynika to z dotychczasowych negatywnych doświadczeń z eksploatacji, gdzie stwierdzono że skuteczność powłoki malarskiej jest szacowana na okres co najwyżej 2 do 3 lat.

Literatura

- [1] Hasslinger H.: *Lastannahmen für Radsatzwellen-Bestandsanalyse. Eisenbahntechnische Rundschau. Nr 12, 12.2009.*
- [2] Liedgens K.: *Inspektionskonzept für Radsatzwellen bei der Hamburger Hochbahn. Eisenbahningenieur. Nr 3/2010.*
- [3] Murawa F., Winkler M.: *Randschichtbehandelte Radsatzwellen. Eisenbahningenieur Nr.7 /2007.*
- [4] Richard A., Sander M., Wirxel M., Lebehahn J.: *Ermittlung von Inspektionsintervallen mittels Risswachstumsuntersuchungen. Eisenbahningenieur. Luty 2010.*
- [5] EN 473: *Kwalifikacja i certyfikacja personelu do badań nieniszczących. Ogólne zasady. Marzec 1993.*
- [6] EN 45013: *Ogólne wymagania dotyczące opinii i akredytacji placówek certyfikujących (ISO/IEC Tom 61:1996).1998.*
- [7] Karta UIC 811-1: *Warunki techniczne na dostawę osi zestawów kołowych dla pojazdów trakcyjnych i wagonów*
- [8] Karta UIC 960: *Kwalifikacja i certyfikacja personelu odpowiedzialnego za prowadzenie badań nieniszczących elementów zespołów pojazdów szynowych w procesie ich utrzymania.2-gie wydanie z grudnia 2001.*
- [9] PN-EN 13103:2009: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych tocznych. Zasady konstrukcji.*
- [10] PN-EN 13104:2009: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych napędnych. Zasady konstrukcji.*
- [11] PN-EN 13261:2009: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [12] Raport ORE/ERRI B136/Rp.11/D. *Zestawy kołowe z nasadzonymi łożyskami tocznymi. Konstrukcja, utrzymanie i standaryzacja. Obliczenie osi zestawów kołowych dla wagonów towarowych i osobowych. Utrecht, kwiecień 1979.*
- [13] OR-9666: *„Diagnostyka układów biegowych pojazdów tocznych i trakcyjnych.” Wrzesień 2010.*