

Przedsięwzięcia zwiększające prognozowaną żywotność osi zestawów kołowych w skali Unii europejskiej

W artykule przedstawiono metody zwiększenia bezpieczeństwa i niezawodności osi zestawów kołowych na przykładzie wagonów towarowych. Poruszono istotne problemy związane z projektowaniem osi zestawów kołowych zespołów trakcyjnych dalekobieżnych, gdzie zaproponowano bardziej ostrożne podejście do przyjmowania naprężeń dopuszczalnych, wynikających z bardzo dużego przebiegu kilometrowego. 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.

Projekt badawczy własny nr N N509 pt. „Prognozowanie stanu technicznego głównych systemów pojazdu szynowego na podstawie analizy zmian wartości charakterystycznych parametrów podzespołów”.

1. WSTĘP

Problematyka związana z rozwojem technologii wytwarzania osi zestawów kołowych została przedstawiona w opracowaniach [4,8,12]. Bardzo duża rolę odgrywa wprowadzenie normy europejskiej PN-EN 13261+A1:2011 [19], która zastąpiła dotychczas obowiązującą kartę UIC 811-1 [15] oraz PN-93/K-91045 [20]. Zwiększa się również rola diagnostyki w niezawodnej eksploatacji zestawów kołowych [6,7,9,10,11,13,14,16,19,22]. Niezależnie od wzrastającego nacisku położonego na jakość technologii wytwarzania po katastrofie kolejowej pociągu towarowego, ciągnącego wagony towarowe-cysterny w Viareggio (Włochy) podjęto w Europie szeroko zakrojoną akcję prewencyjną, mającą na celu zapobieżenie podobnym wypadkom oraz mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji osi zestawów kołowych. Ww. akcję uzasadniano również faktem zwiększającej się liczby wypadków wagonów towarowych w skali europejskiej, wynikających ze źle utrzymanych zestawów kołowych. Współpraca w tym temacie została podjęta roku przez Europejską Agencję Kolejową (niem. „Europäische Eisenbahngesellschaft” - ERA), krajowe urzędy transportu kolejowego, odpowiedzialne za bezpieczeństwo ruchu kolejowego oraz przedsiębiorstwa kolejowe (koleje państwowe oraz prywatne, właściciele wagonów oraz producenci, zrzeszone w UIP). Ww. grupa Joint Sektor Group opracowała program roboczy, mający na celu zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji wagonów towarowych i został on zatwierdzony przez Unię Europejską i krajowe urzędy transportu kolejowego. Celem programu rozwiniętego przez JSG jest eliminacja zagrożeń eksploatacyjnych na podstawie przeprowadzonej kontroli

wizualnej i dalsza optymalizacja opanowania możliwości ryzyka w eksploatacji zestawów kołowych w eksploatacji zestawów kołowych europejskich wagonów towarowych, których łączny przebieg kilometrowy wynosi ok. 50 miliardów kilometrów w ciągu roku.

Grupa JSG skupiała członków następujących organizacji kolejowych:

- ⇒ Związku Kolei Europejskich - CER
- ⇒ Związku Prywatnych Przedsiębiorstw Przewozowych Ładunków - EFRA
- ⇒ Związku Prywatnych Właścicieli Wagonów Towarowych - UIP
- ⇒ Związku Operatorów Transportu Kombiowanego - UIRR
- ⇒ Związku Producentów Zestawów Kołowych - UNIFE.

2. OPIS PROGRAMU OPRACOWANEGO PRZEZ JSG

Program roboczy składa się z trzech zakresów działań.

Zakres I. Opracowanie Katalogu Wizualnej Kontroli Uszkodzeń Osi Zestawów Kołowych tzw. EVIC-Katalog (ang. European Visual Inspection Catalogue), opisuje lub przedstawia przykładowe referencyjne uszkodzenia mechaniczne lub uszkodzenia spowodowane procesami korozji osi zestawów kołowych. Kontrola wizualna osi jest przewidziana w naprawach lub przeglądach wagonów towarowych w warsztacie, jeśli wagon znajduje się na kanale lub jest podniesiony. Zestawy kołowe, które wykazują wady niedopuszczalne, należy wyłączyć z eksploatacji i przeprowa-

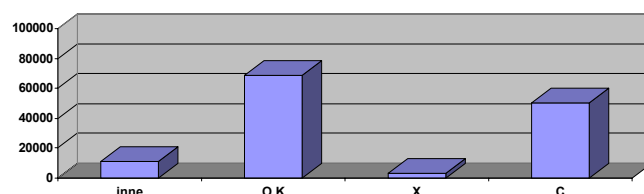
dzić naprawę przy użyciu badań nieniszczących. Skatalogowane kryteria uszkodzeń **EVIC** są obligatoryjne od 1.04.2010. Okres trwania programu jest ograniczony tzn.:

- standardowe wagony towarowe muszą być sprawdzone co 6 lat
- wagony przewożące ładunki niebezpieczne, które są eksploatowane w agresywnym środowisku muszą być sprawdzone w co 4 lata.

Katalog uszkodzeń **EVIC** musi być przekazany warsztatom naprawczym przez właścicieli, zlecającym przeglądy osi zestawów kołowych i są one zobowiązane do przekazywania informacji o wykonanych przeglądach. Joint Sektor Group opracował specjalny dokument z danymi, które podlegają kontroli. W celu wdrożenia i kontroli programu wyznaczono w poszczególnych krajach krajowe gremia **Joint EVIC Bodies**, do których zadań należało przetłumaczenie katalogu **EVIC** na język danego kraju oraz organizacja szkoleń dla zainteresowanych organizacji kolejowych, właścicieli i warsztatów naprawczych. Katalog **EVIC** został przetłumaczony na 11 języków krajów, zrzeszonych w Unii Europejskiej. Przeprowadzono około 50 kursów szkoleniowych z udziałem 750 uczestników. Od czasu startu programu zostało przebadanych 180 000 osi wagonów towarowych w krajach członkowskich Unii Europejskiej. Struktura kontroli w poszczególnych krajach Unii Europejskiej jest przedstawiona w tabeli 1.

Z danych przedstawionych w tabeli 1 widoczna jest wiodąca rola kolei niemieckich we wdrażaniu nowego systemu kontrolnego. Łącznie zostało przebadanych 93 607 osi zestawów kołowych wagonów towarowych, co stanowi 70% łącznej ilości przebadanej w ramach kolei krajów członkowskich Unii Europejskiej. Zaskakujący jest przy tym fakt pozytywnie zwerifikowanych osi zestawów kołowych, wynoszących 44126, co stanowi zaledwie 33% łącznej ilości przebadanej w ramach kolei krajów członkowskich Unii Europejskiej. Znacznie lepszy wyniki takiej kontroli mogą odnotować przewoźnicy, których koleją podstawiającą są koleje francuskie, przy zastrzeżeniu że kontroli poddano znacznie mniejszą ilość osi zestawów kołowych.

Struktura wyników kontrolowanych osi zestawów kołowych wagonów towarowych 86 właścicieli w 12 krajach Unii Europejskiej jest przedstawiona na rys.1.



- inne) osie wykluczone z eksploatacji z innych powodów
 OK) wynik badań nieniszczących pozytywny
 X) natychmiastowe wykluczenie osi z eksploatacji
 C) wynik badań pozytywny, osie dopuszczone do dalszej eksploatacji.

Rys.1. Wyniki kontrolowanych osi zestawów kołowych wagonów towarowych w krajach Unii Europejskiej

Struktura kontroli osi zestawów kołowych 86 właścicieli wagonów towarowych w 12-tu krajach Unii Europejskiej w ujęciu ilościowym wg [1]

Tabela 1

L.p.	Kraj	Ilość sprawdzanych wagonów	Osie zestawów kołowych	Inne ¹⁾	Wynik pozytywny „OK.” ²⁾	Wynik negatywny „X” ³⁾	Dalsza eksploatacja do następnej kontroli „C” ⁴⁾
1.	Unia Europejska	34 356	133 184	11033	68983	3082	50176
2.	Austria	980	3713	1582	1301	264	566
3.	Belgia	459	1873		1871	2	0
4.	Szwajcaria	1976	6639	293	2706	192	3348
5.	Czechy	19	76		76	0	0
6.	Niemcy	23 632	93607	7200	44126	2140	40141
7.	Estonia	66	161	0	90	12	59
8.	Francja	3372	12396	1820	9522	110	944
9.	Węgry	271	989	2	580	2	405
10.	Włochy	1768	6780	82	3971	309	2418
11.	Polska	829	3253	35	2723	44	451
12.	Słowacja	966	3645	10	1893	5	1737
13.	Słowenia	18	52	9	34	2	7

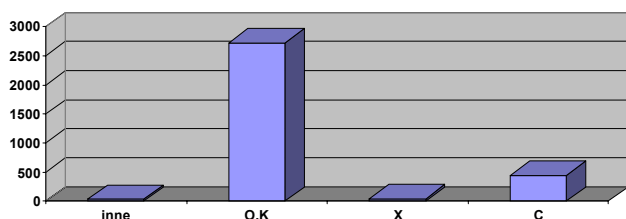
¹⁾ wykluczone z eksploatacji z innych powodów

²⁾ wynik badań nieniszczących pozytywny, dalsza eksploatacja

³⁾ natychmiastowe wykluczenie z eksploatacji

⁴⁾ dalsza eksploatacja aż do następnej kontroli wg katalogu EVIC

Struktura wyników kontrolowanych osi zestawów kołowych wagonów towarowych w Polsce jest przedstawiona na rys.2.



- inne) osie wykluczone z eksploatacji z innych powodów
 OK) wynik badań nieniszczących pozytywny
 X) natychmiastowe wykluczenie osi z eksploatacji
 C) wynik badań pozytywny, osie dopuszczone do dalszej eksploatacji.

Rys.2. Wyniki kontrolowanych osi zestawów kołowych wagonów towarowych w Polsce w ramach Unii Europejskiej

Na uwagę zasługują dobre wyniki, kontroli przeprowadzonej w Polsce. Porównując bardzo podobne ilości przebadanych zestawów kołowych w Austrii, Słowacji oraz w kraju wg tych samych kryteriów najczęściej zestawów kołowych zostało zakwalifikowanych do dalszej eksploatacji po stwierdzeniu pozytywnego wyniku badań ultradźwiękowych.

Zakres II: Zakres ten programu opracowanego przez JSG jest dostarczenie dowodu, że wizualna inspekcja osi zestawów kołowych eliminuje w sposób niezawodny możliwe ryzyko eksploatacyjne. Z wszystkich czterech zakresów kwalifikacyjnych (oznaczonych „X”, „OK.”, „inne” oraz „C”) wytypowano 24 000 osi zestawów kołowych wagonów towarowych, które przeszły z wynikiem pozytywnym lub nie zostały zakwalifikowane na zgodność z kryteriami EVIC do

bardzo szczegółowych badań nieniszczących np. badań ultradźwiękowych. Na bazie porównań i ocen grupa JSG zobowiązała się do wdrażania dalszych przedsięwzięć technicznych. Realizacja programu jest przewidziana na 12 miesięcy i będzie koordynowana w ramach danego państwa i wdrażana, przy czym odpowiednie należy zebrać odpowiednie pliki danych i przekazać dalej po 6-ciu miesiącach. Program jest uzgadniany zarówno przez Unię Europejską jak również krajowe urzędy i rozpoczął się w czerwcu 2010 roku.

Zakres III: Opiera się na propozycji opracowania danych do przeprowadzenia przeglądów zestawów kołowych. Propozycja ta została zgłoszona na posiedzeniu Europejskiej Agencji Kolejnictwa (ERA) w dniu 22.06.2010. Za pomocą odpowiedniej metodyki można dokonać szybkiej identyfikacji wad materiałowych i ułatwić ustalenia przyczyn wypadków kolejowych. Łącznie należy zarejestrować 47 parametrów dla różnych części składowych zestawów kołowych. Dalej należy zdefiniować badania nieniszczące, które należy wykonać na zestawie kołowym w zależności od sytuacji. System został wprowadzony od sierpnia 2010 roku. Licząc od tej daty muszą być wszystkie dane rejestrowane i wtedy niniejsze dane muszą być rejestrowane na bieżąco we wszystkich w krajach Unii Europejskiej. Od 01.01.2012 dane muszą być rejestrowane w elektronicznym systemie przetwarzania danych.

3. NOWOCZESNE ZASADY PROJEKTOWANIA ZESTAWÓW KOŁOWYCH

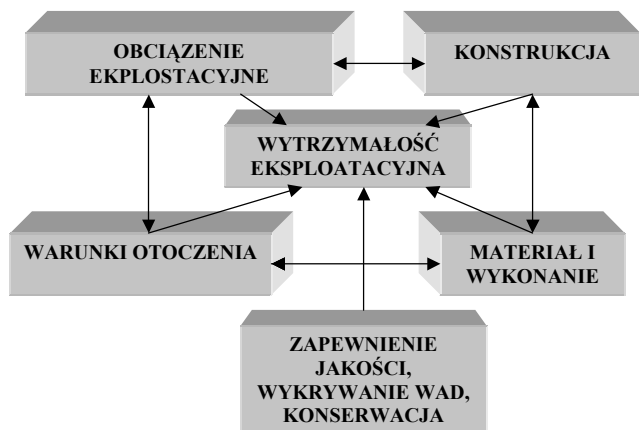
Struktura kontroli osi zestawów kołowych 86 właścicieli w 12-tu krajach Unii Europejskiej w ujęciu procentowym wg [1]
Tabela 2

L.p.	Kraj	Ilość sprawdzanych wagonów	Osie zestawów kołowych	Inne ¹⁾	Wynik pozytywny „OK.” ²⁾	Wynik negatywny „X” ³⁾	Dalsza eksploatacja do następnej kontroli „C” ⁴⁾
				[%]			
1.	Unia Europejska	34 356	133 184	8,28	51,72	2,31	37,67
2.	Austria	980	3713	42,6	35,03	7,11	15,24
3.	Belgia	459	1873	0	99,89	0,106	0
4.	Szwajcaria	1976	6639	4,41	40,75	2,89	50,42
5.	Czechy	19	76	0	100	0	0
6.	Niemcy	23 632	93607	8,61	47,13	2,28	42,88
7.	Estonia	66	161	0	55,90	7,45	36,64
8.	Francja	3372	12396	14,68	76,81	0,88	7,61
9.	Węgry	271	989	2,02	58,64	0,20	40,95
10.	Włochy	1768	6780	1,20	58,56	4,55	35,66
11.	Polska	829	3253	0,99	77,24	1,24	12,80
12.	Słowacja	966	3645	0,27	51,93	0,13	47,65
13.	Słowenia	18	52	17,3	65,38	3,84	13,46

¹⁾ osie wykluczone z eksploatacji z innych powodów
²⁾ wynik badań nieniszczących pozytywny

³⁾ natychmiastowe wykluczenie osi z eksploatacji
⁴⁾ wynik badań pozytywny, osie dopuszczone do dalszej eksploatacji.

Doświadczenia eksploatacyjne zespołów trakcyjnych, przystosowanych do wysokich prędkości, zwłaszcza ICE w DB AG dostarczyły nowego materiału bazowego do analiz osi pod względem wytrzymałościowym. Przebieg kilometrowy zespołów trakcyjnych dalekobieżnych wynosi około 500 000 km w skali rocznej (ok. 1370 km w przeliczeniu na dzień, ok. 57 km w przeliczeniu na jedną godzinę).. Dla porównania przebieg zespołów trakcyjnych ruchu lokalnego wynosi około 100 000 km w skali rocznej. Jak okazuje się z praktyki eksploatacyjnej przy takim intensywnym przebiegu już podczas 21 dni jest osiągnięta bazowa wartość cykli 10^7 cykli. Zakładając średnią średnicę toczną koła 0,900 m, wynika że oś jest obciążona 350 cyklami w przebiegu przeliczeniowym na jeden kilometr, co daje 484 000 cykli obciążeń na jeden dzień. Z takich przeliczeń wynika, że zakładając 30-letnią żywotność otrzymuje się łączny przebieg, wynoszący 15 milionów kilometrów, co odpowiada 10^9 cykli obciążeń (100×10^7 cykli obciążeń). Z tego wynika, że zakładana wartość 10^7 cykli obciążeń jest w praktyce wielokrotnie przekraczana (nawet 100 razy). W związku z tym wytrzymałość eksploatacyjna takich elementów jak osie nabiera szczególnego znaczenia i zależy od wielu czynników, które są wymienione na rys.3.



Rys.3. Schemat blokowy czynników mających wpływ na wytrzymałość eksploatacyjną osi zestawów kołowych wraz z ich wzajemnymi powiązaniami

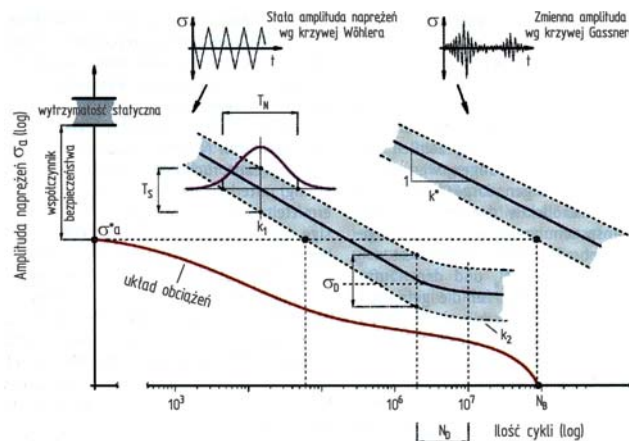
Z przeprowadzonych badań naukowych i doświadczeń praktycznych znane są ograniczenia prostego opisu wytrzymałości zmęczeniowej. Jako istotne ograniczenia należy wymienić:

- ⇒ najczęściej występujące obciążenia eksploatacyjne nie posiadają charakteru sinusoidalnego, lecz są to obciążenia o zmiennym przebiegu, a wskutek tego występuje mechanizm kumulacji uszkodzeń o odmiennym charakterze
- ⇒ na częściach występujących w eksploatacji nie można mówić o wytrzymałości zmęczeniowej w tradycyjnym ujęciu, wskutek czego po 10^6 lub 10^7 cykli obciążeń odnotowuje się dalszy spa-

dek wytrzymałości co wyznacza krzywa o pochyleniu k_2 , szczególnie to odczuwa się przy połączeniach wtlaczanych (na odsadzeniach kół, łożysk, kół przekładni i tarcz hamulcowych) i przy występowaniu korozji

⇒ warunek wytrzymałości zmęczeniowej dla osi jest spełniony, jeśli współczynnik bezpieczeństwa S, definiowany jako stosunek pomiędzy naprężeniem dopuszczalnym oraz naprężeniem rzeczywistym, wynikającym z eksploatacji jest większy od 1.; w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych stosunek ten może być mniejszy w wyniku działania ekstremalnego naprężenia, spowodowanego wystąpienia maksymalnej siły podczas przejazdu przez łuk toru.

Żywotność przy zmiennej amplitudzie naprężeń i wynikającym z tego układu naprężeń jest opisana przez krzywą Gassnera, która została zastosowana w budowie części pojazdów szynowych w latach 80-tych. Krzywa Gassnera jest przedstawiona na rys.4.



Rys. 4. Określenie amplitudy naprężenia σ_a wg hipotezy ekwiwalentnych uszkodzeń wg [3]

Została ona opracowana już w latach trzydziestych XX wieku i wykorzystana w projektowaniu lekkich konstrukcji w przemyśle lotniczym, a następnie wykorzystana również w budowie pojazdów. Również krzywa Gassnera została opisana przez rozproszenie i pochylenie k^* . Krzywa Gassnera może być zastosowana do charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej przy określonych warunkach brzegowych oraz do oceny wytrzymałości eksploatacyjnej i żywotności przy znanym obciążeniu eksploatacyjnym. Przy przedłożeniu reprezentatywnego układu obciążeń jako układu do konstrukcji dla przewidywanej żywotności wywodzi się naprężenie ekwiwalentne dla uszkodzenia (rys.5).

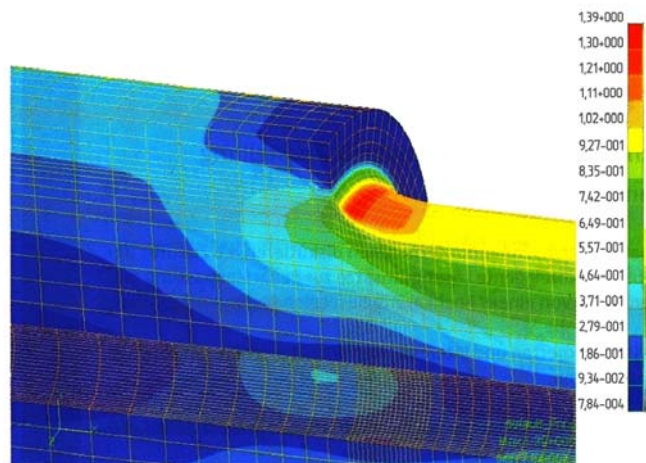
współczynnik wynoszący 2 przy współczynniku pochylenia krzywej $k^*=6$. Zwiększenie naprężenia o 10% może być spowodowane zmniejszeniem średnicy przekroju osi o około 3%. Obliczenia osi tocznych oraz trakcyjnych zespołu trakcyjnego dalekobieżnego ICE TD zostały wykonane w oparciu odpowiednio o PN-EN 13103:2009 [17] oraz PN-EN 13104:2009 [18]. Osie toczne były wykonane z materiału normalizowanego cieplnie EA1N (24CrMo4), natomiast osie trakcyjne z materiału ulepszanego cieplnie EA4T (34CrNiMo6). Naprężenia dopuszczalne przyjęto na podstawie ww. norm europejskich. Obydwa typy spełniały więc wymagania wytrzymałości zmęczeniowej we wszystkich strefach ze współczynnikami bezpieczeństwa $S=\sigma_{a,zul}/\sigma_{a,betr}\geq 1$ wg ww. norm. Oszacowanie żywotności wg metodyki projektowania wg widma z eksploatacji, przy założeniu przebiegu wynoszącego 15 milionów kilometrów prowadzi jednak do zupełnie innych rezultatów. Ponadto z pomiarów eksploatacyjnych ustalono, że uwzględnia się około 20% większe naprężenie w stosunku do obliczeń wg normy. Jeśli przyjąć, że dotychczasowy przebieg kilometrowy L_x wynosił 3 miliony kilometrów (aż do ujawnionego pęknięcia w najbardziej wytężonym miejscu w łuku przejściowym), a wymagany wynosi $L_B=15$ milionów kilometrów to wówczas stosunek obydwu przebiegów wynosi $L_B/L_x=5$. Jeśli przyjąć, że $n=3$ (dla osi) oraz $k=6$ to wówczas zgodnie z zależnością (2):

$$d_x = d_0 \cdot 5^{(1/3 \times 6)} = 1.09 \cdot d_0 \quad (4)$$

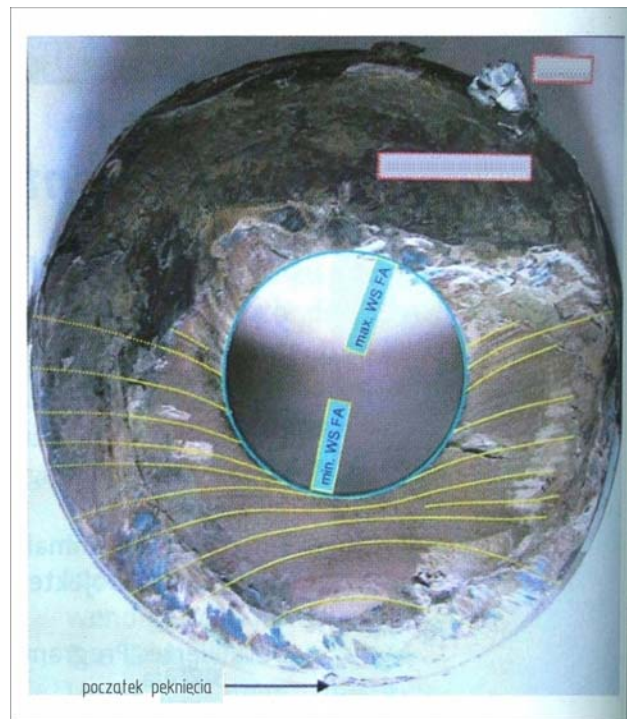
Oznacza to, że w krytycznych miejscach osi średnica powinna wzrosnąć o 9%, aby spełnić wymaganie żywotności $L_B=15$ milionów kilometrów. Niniejszy wniosek dotyczył osi napędnej, co przełożyło się na zmianę średnicy osadzenia ze 179 mm z łukiem przejściowym 160 mm, na średnicę osadzenia 195 mm z łukiem przejściowym 174 mm. Z obliczeń wytrzymałościowych za pomocą metody elementów skończonych wynika, że największa koncentracja naprężeń występuje w strefie oznaczonej kolorem czerwonym, która jest przedstawiona na rys.7 (lewa strona). Na rys.8 jest przedstawiony przełom zmęczeniowy osi zespołu trakcyjnego ICE 3, który wystąpił po przebiegu 3 milionów kilometrów i po 7,7 latach eksploatacji (średni przebieg roczny ok. 390 000 km).

W wyniku analizy pęknięcia osi, które wystąpiło w 2008 roku uznano, że jego przyczyną były zanieczyszczenia materiałowe, wynikające z procesu wytwarzania o długości ok. 0,9 mm, które przekroczyły dopuszczalną wartość.

Pęknięcie osi trakcyjnej innego zespołu trakcyjnego dalekobieżnego typu ICE 3 wystąpiło na trasie Nürnberg-Chemnitz w dniu 2.12.2002 po rocznej eksploatacji i przebiegu wynoszącym około 350 000 km, który doprowadził do wykolejenia, nie powodując



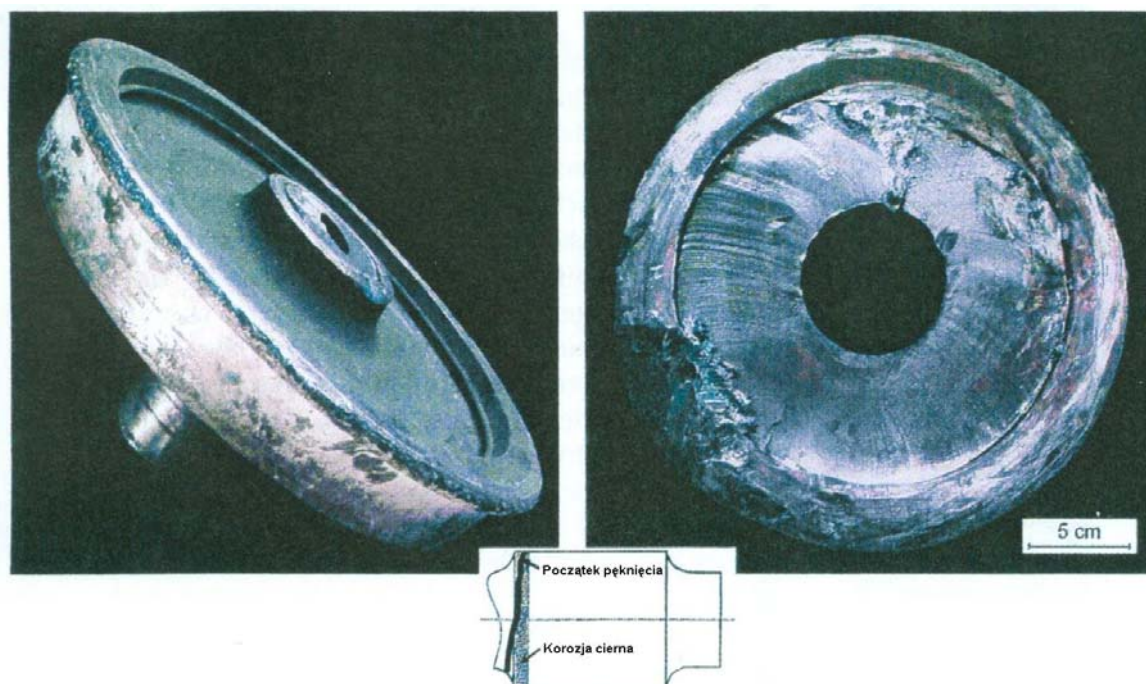
Rys.7. Usytuowanie pęknięcia zmęczeniowego w łuku osi napędnej zespołu trakcyjnego ICE 3, które wystąpiło po 7,7 latach eksploatacji i przebiegu 3 milionów kilometrów (analiza wytrzymałościowa metodą elementów skończonych)



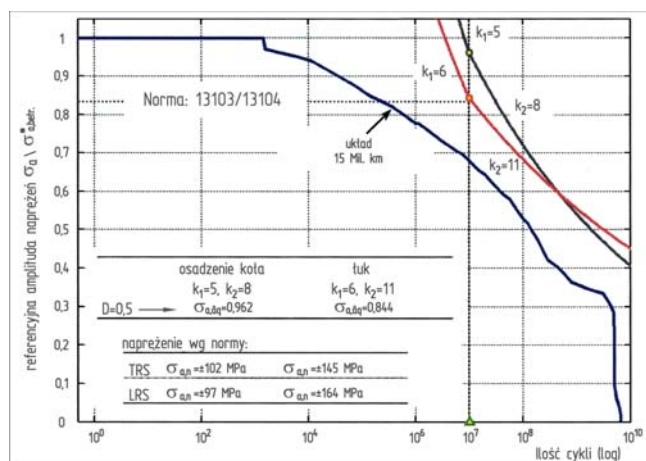
Rys.8. Przełom zmęczeniowy osi napędnej zespołu trakcyjnego dalekobieżnego ICE 3, który wystąpił po 7,7 latach eksploatacji i przebiegu 3 milionów kilometrów

ofiar wśród pasażerów. Przełom zmęczeniowy osi w strefie osadzenia koła został spowodowany korozją cierną w tym rejonie i jest przedstawiony na rys.9 i powstało w tym samym miejscu jak na rys.7.

Graficzne przedstawienie wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych wg obliczeń zgodnie z normą PN-EN 13103 (osie toczne) [17] oraz PN-EN 13104 (osie trakcyjne) [18] w zależności od ilości cykli obciążeń znajduje się na rys.10.



Rys.9. Przelom zmęczeniowy osi napędnej zestawu kołowego zespołu trakcyjnego dalekobieżnego ICE po rocznym przebiegu 350 000 km



Legenda:

TRS - zestaw kołowy napędny (niem. Treibradsatzwelle)
 LRS - zestaw kołowy toczny (niem. Laufradsatzwelle)

Rys.10. Oszacowanie wytrzymałości zmęczeniowej osi zespołu trakcyjnego ICE (osadzenie koła na osi) w zależności od ilości cykli obciążeń

Jak wynika z przebiegu krzywej zmęczenia, naprężenia pomierzone są o ok. 30% wyższe aniżeli przedstawione w normie PN-EN13104:2009 [18]. Okazuje się, że w takim przypadku projektowanie zestawów kołowych wg normy musi prowadzić bezwzględnie do uszkodzeń, ponieważ wychodzi się z fałszywych założeń. Po przejściowym zatrzymaniu 19-tu zespołów trakcyjnych typu ICE-3 dokonano wymiany wszystkich osi. Nowe osie posiadały nieznaczną modyfikację geometryczną i były pokryte molibdenem. W wyniku dokonanych zabiegów konstrukcyjnych można było osiągnąć tylko 10 letnią żywotność. W związku z powyższym proponuje się:

- ⇒ projektowanie obliczeniowe (konstrukcja) na podstawie obciążeń i danych obliczeniowych
- ⇒ sprawdzenie wytrzymałości za pomocą prób
- ⇒ sprawdzenie obciążeń na podstawie pomiarów na trasie
- ⇒ ostateczne ustalenie projektowanej konstrukcji, włączenie z planem przeglądów oraz kontroli międzynaprawczych.

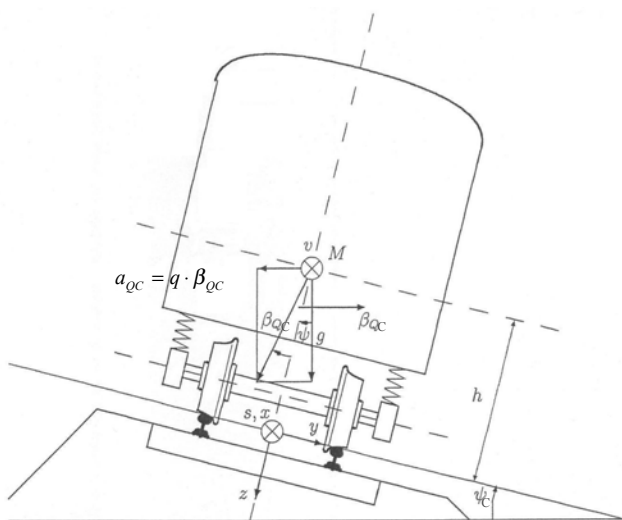
Jako dodatkowy środek zaradczy, zwiększający niezawodność kursujących dalekobieżnych pojazdów trakcyjnych, przystosowanych do wysokich prędkości należy uznać kontrolę za pomocą sensorów właściwości eksploatacyjnych, między innymi kół i osi. Ten nowoczesny i kontrowersyjny pogląd na odmienne podejście do projektowania osi jest oparty na przekonaniu, że każdy doświadczony inżynier powinien mieć świadomość, że normy obowiązujące w kolejnictwie odpowiadają najniższemu poziomowi technicznemu, który jest uzgodniony przez fachowców i odbiegają mocno aktualnego stanu technicznego. Metodyka obliczeń osi dla takich przypadków powinna być porównana z innymi metodykami, które choćby są stosowane w innych działach techniki, do których zalicza się budowę samolotów lub samochodów. W wyniku przedstawionego rozumowania zaleca się, aby na instalować odpowiednie sensory w nowoczesnych pojazdach szynowych, aby dokonywać kontroli własności dynamicznych układów biegowych, a w szczególności osi i kół zestawów kołowych. Dodatkowym wsparciem dla nowego podejścia do projektowania zestawów kołowych jest wielkość niezrównoważonego przyspieszenia w zależności od zastosowanej przechyłki na łukach toru. Wyniki te są zebrane w tabeli 3.

Wielkości nierównoważonego przyspieszenia w kierunku poprzecznym w zależności od przechyłki toru dla osi napędnych i tocznych wg [5]

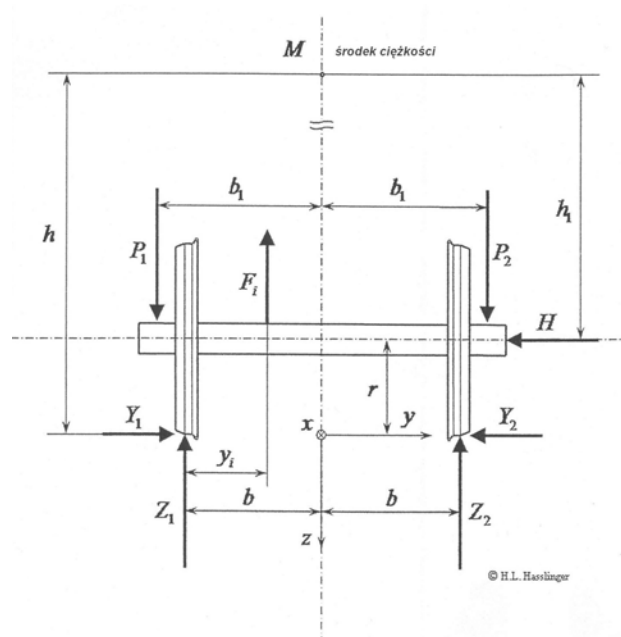
Tabela 3

Niedostateczność przechyłki	Kąt Frouda	Nierównoważone przyspieszenie odśrodkowe	Współczynnik dynamiczny dla zestawu kołowego napędowego oraz prowadzącego zestawu kołowego tocznego	Współczynnik dynamiczny dla nieprowadzącego zestawu kołowego tocznego
I	β_{qc}	a_{qc}	f_y	f_y
[mm]	[rad]	[m/s ²]	[-]	[-]
100	0,0667	0,65378	2,625	2,250
130	0,0867	0,84991	2,019	1,731
150	0,1000	0,98067	1,750	1,500
153	0,1020	1,00028	1,716	1,471
160	0,1067	1,04604	1,641	1,406
168	0,1120	1,09834	1,563	1,339
180	0,1200	1,17680	1,458	1,250
183	0,1220	1,19641	1,434	1,230
240	0,1600	1,56906	1,094	0,938
275	0,1833	1,79789	0,955	0,818
300	0,2000	1,96133	0,875	0,750
306	0,2040	2,00056	0,858	0,735

Pojazd na przechyłce łuku toru jest przedstawiony na rys.11



Rys.11. Pojazd na przechyłce toru



Rys.12. Schemat obciążenia zestawu kołowego siłami pionowymi oraz poprzecznymi

Pudło pojazdu wraz z ładunkiem, znajdujące się na przechyłce łuku toru jest poddane obciążeniu odśrodkowemu $a_{QC} = g\beta_{QC}$. Poprzeczną siłę łożyskową można wyznaczyć ze wzoru:

$$H = f_y \cdot a_{QC} \cdot m_1 \quad (5)$$

gdzie:

f_y - współczynnik Frouda

a_{qc} - niezrównoważone przyspieszenie w kierunku poprzecznym

m_1 - masa przypadająca na czopy zestawu kołowego (włącznie z masą łożysk i korpusem maźnicy).

Po wstawieniu $a_{QC} = g\beta_{QC}$ do wzoru (5) otrzymuje się:

$$H = f_y \cdot g \cdot \beta_{QC} \cdot m_1 \quad (6)$$

Siłę pionową P_1 działającą na lewy czop osi zestawu kołowego wyznacza się z zależności:

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(f_z + \frac{h_1}{b_1} \cdot f_y \cdot \beta_{QC} \right) \cdot g \cdot m_1 \quad (7)$$

Siłę pionową P_2 działającą na prawy czop osi zestawu kołowego wyznacza się z zależności:

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(f_z - \frac{h_1}{b_1} \cdot f_y \cdot \beta_{QC} \right) \cdot g \cdot m_1 \quad (8)$$

Analizując niezrównoważone przyspieszenia a_{qc} w zależności od przechyłki toru, w raporcie ORE/ERRI B136/Rp.11/D [21] oraz PN-EN 13103:2009 [17] przyjęto wartość przyspieszenia poprzecznego dla osi tocznych $\beta=0,15g=1,47 \text{ m/s}^2$ natomiast w przypadku osi napędnych PN-EN 13104:2009 [18] wartość $\beta=0,175g=1,71 \text{ m/s}^2$. W przypadku bardzo dużych przechyłek toru, przeznaczonych dla pojazdów trakcyjnych z przechylnym pudłem niezrównoważone przyspieszenie jest znacznie większe aniżeli przyjęte w PN-EN 13103:2009 [17] oraz PN-EN 13104:2009 [18]. Widoczne to jest dla przechyłek toru o wartości większej niż 240 mm. W związku z powyższym można wnioskować o trzech istotnych punktach, w których normy PN-EN 13103:2009 [17] oraz PN-EN 13104:2009 [18] posiadają istotne mankamenty, a mianowicie pominięcie:

- ⇒ masy zestawu kołowego
- ⇒ kołysania i ewentualnego przechyłu pudła
- ⇒ zbyt małe współczynniki bezpieczeństwa dla dopuszczalnych naprężeń przy bardzo dużych niedostatecznościach przechyłki.

4. AUTOMATYCZNY MONITORING ZESTAWÓW KOŁOWYCH WAGONÓW TOWAROWYCH

Jednym z istotnych elementów zwiększenia niezawodności zestawów kołowych jest ich monitoring. Jak wynika niemieckich doświadczeń eksploatacyj-

nych kolei niemieckich około 100 000 wagonów towarowych jest w codziennej eksploatacji. Okres między-naprawczy wynosi 6 lat i ma być wydłużony nawet do 8 lat. W przeciwieństwie do pojazdów trakcyjnych, których przeglądy są zależne od przebiegu kilometrowego, wagony towarowe podlegają naprawom okresowym, które są związane z określonymi czasookresami. Z tego też względu jest trudne do ustalenia jaki przebieg kilometrowy posiadają zestawy kołowe wagonów towarowych. W tej sytuacji Federalny Urząd Kolejnictwa (EBA) w Bonn wydał rozporządzenie jesienią 2009 roku, aby dokonać kontroli zestawów kołowych 4450 wagonów towarowych. Przeprowadzona kontrola wykazała wady, wpływające na bezpieczeństwo eksploatacyjne. W związku z powyższym powstał plan wdrożenia monitoringu zestawów kołowych, na podstawie którego można by zarejestrować przebieg kilometrowy. Przedsiębiorstwo Eureka Navigation Solutions AG w Monachium wraz z niemieckim koncernem Deutsche Telekom rozwinęło nowoczesny rozwiązanie RodoTAG. Rejestrator, miniaturowej wielkości można zainstalować w ciągu kilku minut za pomocą pasków taśm szybkococujących (rys.13).



Rys.13. Urządzenie RodoTAG, zamocowane na osi zestawu kołowego wagonu towarowego wg [2]

Sensory zainstalowane są wewnątrz urządzenia i mierzą prędkość obrotową zestawu kołowego. Na podstawie takiego parametru można ustalić prędkość i przebieg wagonu. Urządzenie to jest przystosowane do następujących warunków eksploatacyjnych:

- ⇒ najniższa temperatura otoczenia: -40°C
- ⇒ siły bezwładności wynoszące do $80g=785 \text{ m/s}^2$
- ⇒ orientacyjny czasookres eksploatacji: siedem lat.

Jedną z zalet nowego urządzenia typu RodoTAG są jego zdolności komunikacyjne. Przekazywanie danych odbywa się za pomocą modułu GSM przez sieć radiową do centrali Deutsche Telekom gdzie podlegają

obróbce, a następnie są przekazywane do użytkownika wagonu lub do systemu komunikacyjnego T, zbudowanego przez filię firmy Deutsche Telekom. Istotną korzyścią wprowadzenia nowego systemu jest możliwość wdrożenia nowoczesnego systemu konserwacyjno-naprawczego, który może się odbywać w zależności od rzeczywistych przebiegów kilometrowych wagonów towarowych. Jest to tym bardziej uzasadnione, że niektóre wagony towarowe mają bardzo małe przebiegi kilometrowe w skali rocznej, a inne z kolei posiadają znaczące przebiegi, wynoszące 150 000 km na rok. Z tego można wnioskować, że wagony towarowe o małym przebiegu nie będą podlegały wcześniejszemu, natomiast z większym przebiegiem zbyt późnemu przeglądowi. Wymiana zużytych części we właściwym czasie przyczynia się do zmniejszenia kosztów przeprowadzenia napraw i konserwacji. Wielu przewoźników kolejowych przetestowało nowy system w praktyce i wyposażyło swój tabor wagonowy w urządzenie RodoTAG już od września 2010 roku. Istotną zaletą nowego systemu jest nie tylko możliwość dokładnej rejestracji przebiegów kilometrowych, ale również możliwość automatycznej identyfikacji zestawów kołowych w miejscach naprawczych lub serwisowych. Wdrożenie nowego systemu wspomagają firmy telekomunikacyjne Eureka i Deutsche Telekom.

5. WNIOSKI

Jak widać z przeprowadzonej analizy tendencji rozwojowych problem, związany z zasadami konstrukcji osi zestawów kołowych pojazdów szynowych jest wciąż problemem otwartym. Wynika to z trendów rozwojowych kolejnictwa europejskiego oraz światowego, polegającym na zwiększeniu efektywności przewozowej przez zwiększenie nacisków zestawów kołowych na tor oraz prędkości pojazdu. Jednoczesne zwiększenie prędkości pojazdów i ich przebiegów, niewątpliwie przyczyniło się do znaczącego przyrostu cykli obciążeń (tzw. „zakres gigacyklowy”). Zakres ten nie był wcześniej badany na stanowiskach stacjonarnych. Pęknięcia osi zestawów kołowych dalekobieżnych zespołów trakcyjnych wysokich prędkości są nowym doświadczeniem, które powinno być gruntownie przeanalizowane i uwzględnione w PN-EN 13103 [17] oraz PN-EN13104 [18]. Problem diagnostyki, przeglądów uzależnionych od faktycznego przebiegu kilometrowego jest też bardzo istotny, zwłaszcza dla takich pojazdów jak wagony towarowe. Próba skodyfikowania wad zestawów kołowych w formie katalogu uszkodzeń jest istotnym kierunkiem, zwiększającym bezpieczeństwo zestawów kołowych w eksploatacji. Jest to jeszcze jeden dowód na to, że o bezpieczeństwie i niezawodności osi zestawów kołowych decyduje aktualny stan techniczny, a nie wiek zestawów kołowych, jeśli nie jest on powiązany z przebie-

giem kilometrowym. Jeśli przyjąć, że roczny przebieg kilometrowy wagonu towarowego wynosi 50 000 ÷ 100 000 km, to wówczas podczas 30 letniej eksploatacji można się spodziewać łącznego przebiegu 1,5 ÷ 3 milionów kilometrów. Przebieg ten jest 5 ÷ 10 razy mniejszy od zakładanego dla dalekobieżnych zespołów trakcyjnych wysokich prędkości. Należy wziąć również pod uwagę specyfikę transportu kolejowego ładunków, polegającego na tym że część przejazdów odbywa się w stanie próżnym lub częściowo załadowanym, co powoduje że nie można w takim przypadku mówić o pełnym cyklu obciążenia. Ww. metody, mierzący jednak do ustalenia metodyki obliczeniowej oraz okresu pomiędzy kontrolami i naprawami w zależności od przebiegu kilometrowego, a nie „sztywno” określonych okresów międzynaprawczych. Jest to kolejna próba dopasowania konstrukcji do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Z przedstawionej analizy różnych metod, służących do zwiększenia niezawodności zestawów kołowych i znajdujących się w eksploatacji wynika również ich dostosowanie do specyfiki pojazdu. Wagony towarowe posiadają znacznie mniejsze przebiegi kilometrowe aniżeli zespoły trakcyjne wysokich prędkości. Gruntowne rozpoznanie rzeczywistych przebiegów eksploatacyjnych oraz działających obciążeń pozwala na rzeczywiste prognozowanie faktycznej żywotności osi zestawów kołowych. Przedstawione podejście kładzie nacisk na doświadczalne zbieranie danych z eksploatacji, a nie bezkrytyczne przyjmowanie metodyki projektowania przedstawionej w normach europejskich, które podlegają zmianom w zależności od aktualnego poziomu technicznego, akceptowalnego z punktu widzenia państw członkowskich Unii Europejskiej. Z przedstawionych analiz wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych, wynika konieczność utrzymywania jej na jak najwyższym poziomie, którą można zapewnić stosując zabiegi technologiczne.

Literatura

- [1] Engelmann J., Wirtgen J., Nicolin J.: *Europäisches Aktionsprogramm für die Güterwagensicherheit. Eisenbahntechnische Rundschau Nr. 11/2010.*
- [2] Gökcek E., Behrends V.: *Automatisches Radsatzmonitoring für Güterwagen. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau Nr.11/2010*
- [3] Grubisic V., Fischer V.: *Sichere Bemessung von ICE-Radsatzwellen. Eisenbahntechnische Rundschau, Nr.1-2, 2011*
- [4] Gumbiowski M., Poschmann I., Bowi M., Bardehle T.: *Oberflächenschutz von Radsätzen. Eisenbahningenieur Nr.9/2002.*
- [5] Hasslinger H.: *Lastannahmen für Radsatzwellen-Bestandsanalyse. Eisenbahntechnische Rundschau. Nr. 12, 12.2009.*
- [6] Liedgens K.: *Inspektionskonzept für Radsatzwellen bei der Hamburger Hochbahn. Eisenbahningenieur. Nr. 3/2010.*

- [7] Malkiewicz T.: *Metaloznawstwo stopów żelaza*. PWN Warszawa-Kraków. Wydanie III.1976.
- [8] Murawa F., Winkler M.: *Randschichtbehandelte Radsatzwellen*. *Eisenbahningenieur* Nr.7 /2007.
- [9] Richard A., Sander M., Wirxel M., Lebehahn J.: *Ermittlung von Inspektionsinterwallen mittels Risswachstumsuntersuchungen*. *Eisenbahningenieur*. Luty 2010.
- [10] Sobaś M.: *Diagnostyka osi zestawów kołowych układów biegowych pojazdów trakcyjnych i tocznych*. *Pojazdy Szynowe* nr 4/2010
- [11] Sobaś M.: *Kryteria obiektywnej oceny prognozowanych stanów osi zestawów osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych*. *Pojazdy Szynowe* nr 1/2011.
- [12] Sobaś M.: *Zabiegi technologiczne zwiększające żywotność osi zestawów kołowych*. *Pojazdy Szynowe* nr 4/2011
- [13] EN 473: *Kwalifikacja i certyfikacja personelu do badań nieniszczących*. *Ogólne zasady*. Marzec 1993.
- [14] EN 45013: *Ogólne wymagania dotyczące opinii i akredytacji placówek certyfikujących* (ISO/IEC Tom 61:1996).1998.
- [15] Karta UIC 811-1: *Warunki techniczne na dostawę osi zestawów kołowych dla pojazdów trakcyjnych i wagonów*.
- [16] 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.
- [17] PN-EN 13103:2009: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych tocznych. Zasady konstrukcji*.
- [18] PN-EN 13104:2009: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych napędnych. Zasady konstrukcji*.
- [19] PN-EN 13261+A1:2011: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu*.
- [20] PN-93/K-91045: *Pojazdy trakcyjne. Osie zestawów kołowych. Wymagania i badania*.
- [21] 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.
- [22] OR-9666: *„Diagnostyka układów biegowych pojazdów tocznych i trakcyjnych*. IPS „Tabor” Wrzesień 2010.