

Czynniki konstrukcyjne i technologiczne wpływające na żywotność osi zestawów kołowych

Artykuł jest poświęcony zabiegom konstrukcyjnym oraz technologicznym, mającym na celu zwiększenie żywotności osi pojazdów trakcyjnych oraz tocznych. Przedstawiono metody zwiększenia bezpieczeństwa i niezawodności osi zestawów kołowych na przykładzie wagonów towarowych. Poruszono istotne problemy związane z projektowaniem osi zestawów kołowych napędnych zespołów trakcyjnych dalekobieżnych, gdzie zaproponowano bardziej ostrożne podejście do przyjmowania naprężeń dopuszczalnych, wynikających z bardzo dużego przebiegu kilometrowego, wynoszącego nawet 500 000 km w skali roku. Zaprezentowano nowoczesną metodykę projektowania osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych dalekobieżnych oraz lokomotyw, która jest wynikiem zdobytych doświadczeń eksploatacyjnych. Osie takich pojazdów są poddane obciążeniom zmęczeniowym w zakresie giga-cyklowym, a więc zdecydowanie większym od zakresu 10^7 cykli, wynikającym z krzywej Wöhlera. Podejście to porównano z metodyką przedstawioną w normach europejskich PN-EN 13103+A1: 2011 (dla osi pojazdów tocznych) oraz PN-EN 13104+A1:2011 (dla osi pojazdów trakcyjnych). Omówiono istotny wkład w zakresie rozwoju kryteriów technologicznych i badań odbiorczych osi zestawów kołowych, która wnosi norma europejska. Bardzo istotnym czynnikiem, wpływającym na żywotność osi są badania diagnostyczne, do których należy zaliczyć badania ultradźwiękowe oraz badania magnetyczno-proszkowe. PN-EN 13261+A1:2011. 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. Wprowadzenie

Problematyka związana z rozwojem technologii wytwarzania osi zestawów kołowych jest wciąż aktualna. Rozwój tej technologii jest wynikiem wzrastających parametrów eksploatacyjnych, jakie muszą spełniać obecne pojazdy. Do podstawowych parametrów technicznych pojazdów, podlegającym zwiększeniu należą między innymi prędkość, nacisk zestawu kołowego na tor oraz przebieg kilometrowy pojazdu przeliczony w skali rocznej. Zwiększenie tych parametrów jest wywołane wzrastającymi wymaganiami, stawianymi przez przewoźników kolejowych, w wyniku konkurencji na rynku transportowym. Oś zestawu kołowego nabiera więc jako element konstrukcyjny coraz większego znaczenia, decydującego o bezpieczeństwie eksploatacyjnym pojazdu trakcyjnego. Tym należy tłumaczyć coraz większy nacisk na rozwój:

- metod obliczeniowych, przedstawionych w PN-EN 13103:2011+A1 [15] oraz PN-EN 13104:2011+A1 [16] oraz w [4,19],
- metod diagnostycznych [1,3,8,9,11,12,14,20] oraz
- prognozowania pęknięć w osiach zestawów kołowych [5,8,10].

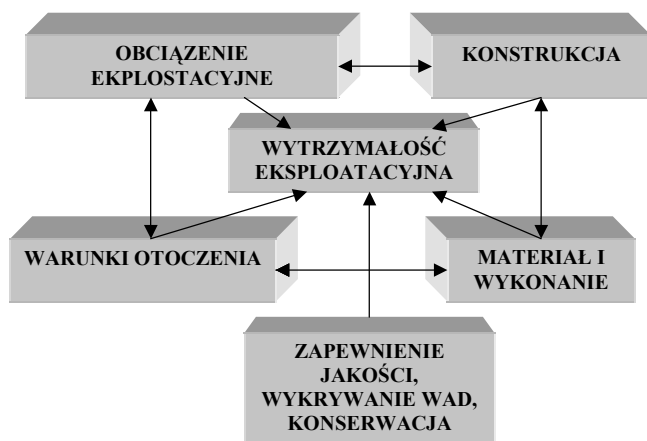
Niewątpliwie do zwiększenia żywotności osi przyczynia się również technologia wykonania osi, która ma ostateczny wpływ na osiągnięcie zakładanej granicy zmęczenia materiału. Norma PN-EN 13261:2011+A1 [17] przedstawia wymagania technologiczne w następujących zakresach:

- składu chemicznego,
- dopuszczalnych wad mikrograficznych,
- wymagań wytrzymałościowych,
- zabezpieczeń antykorozyjnych,
- dopuszczalnych naprężeń własnych.

2. Metody obliczeniowe wg norm europejskich, a doświadczenia eksploatacyjne

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 000km 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 ($100 \cdot 10^7$ 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.1.



Rys.1. Schemat blokowy czynników mających wpływ na wytrzymałość eksploatacyjną osi zestawów kołowych wraz z ich wzajemnymi powiązaniami

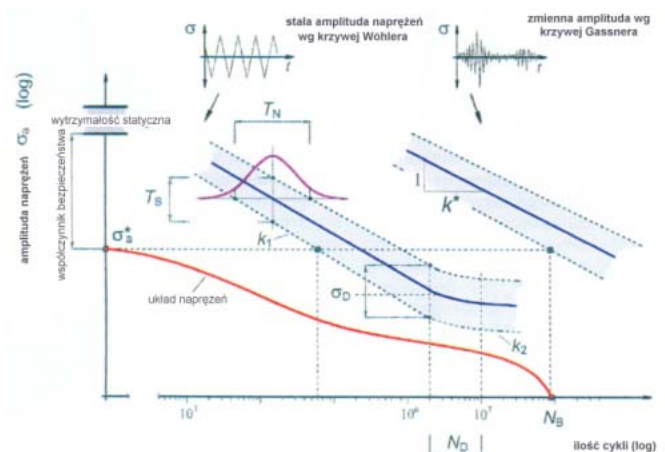
Z przeprowadzonych badań naukowych i doświadczeń praktycznych znane są ograniczenia prostego opisu wytrzymałości zmęczeniowej. Jako istotne ograniczenia należy wymienić:

- 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 spadek wytrzymałości co wyznacza krzywa o pochyleniu k_2 , szczególnie to odczuwa się przy połączeniach włączanych (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.

3. Żywotność osi zestawu kołowego wg krzywej Gassnera i Wöhlera

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.2.

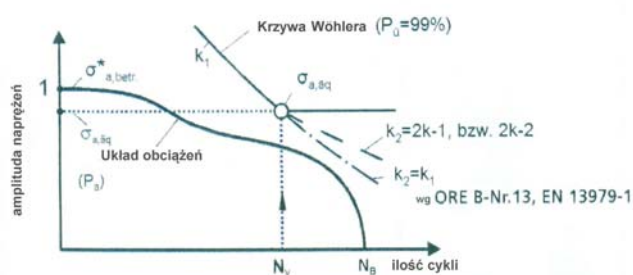


Rys.2. Określenie amplitudy naprężenia σ_a wg hipotezy ekwiwalentnych uszkodzeń wg [3]

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.

Naprężenie ekwiwalentne $\sigma_{a, \dot{a}q}$, odpowiadające uszkodzeniu jest obciążeniem o przebiegu sinusoidalnym przy zdefiniowanej ilości cykli obciążeń N_v , które wywoła analogiczne uszkodzenie jak układ obciążeń z maksymalną wartością naprężenia $\sigma_{a, \text{betr}}$ i ilości cykli obciążeń N_B . Naprężenie ekwiwalentne

$\sigma_{a,\dot{a}q}$ wyznacza się za pomocą hipotezy Palmgrena-Minera, przy czym wykorzystuje się pochylenie krzywej Wöhlera $k_2=2k_1-1$ lub $k_2=2k_1-2$, powyżej ilości cykli N_v na podstawie przedłożonych danych, zebranych doświadczeń i zależnie od mechanizmów uszkodzeń. Niniejszy sposób postępowania określa się jako projektowanie dopasowane do warunków eksploatacyjnych, przy czym jest zagwarantowane, że wykazana jest wymagana żywotność, przy której unika się przedwczesnego pęknięcia części decydujących o bezpieczeństwie, do jakich należą osie lub koła zestawów kołowych. Jako podstawę do uszkodzenia bierze się za podstawę „pęknięcie techniczne”, przy którym jest zachowana pełna funkcjonalność części.



Rys.3. Określenie naprężenia „ekwiwalentnego”, odpowiadającemu uszkodzeniu

Jako miarodajną dla żywotności osi przyjęto więc ilość cykli obciążeń $N_B \approx 10^9$, odpowiadającą rzeczywistym warunkom eksploatacyjnym. Przyjęto założenie, że przy odpowiednim zaprojektowaniu osi (zwymiarowaniu osi) prędkość propagacji pęknięcia jest relatywnie mała i można przewidzieć normalne okresy międzynaprawcze. W przeciwieństwie do tego przy częściach, wykazujących mniejsze wymiary („konstrukcja niedowymiarowana”) zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięcia, przy określonych warunkach wyężenia materiału i prowadzi to do istotnie zmniejszonych okresów międzynaprawczych. Tak więc projektowanie osi zgodnie z obciążeniami eksploatacyjnymi nabiera również znaczenia ekonomicznego.

Dotychczasowe wyniki uzyskane z badań oraz zdobytych doświadczeń z przemysłu pokazały, że występuje logarytmiczny związek pomiędzy żywotnością L i naprężeniem σ oraz pomiędzy średnicą przekroju osi d i żywotnością.

Żywotność osi określa się z zależności:

$$L_x = L_B \left(\frac{\sigma_{a,B}^*}{\sigma_{a,betr}^*} \right)^{k^*} \quad (1)$$

Zależność wymiarową wyznacza się wg wzoru:

$$d_B = d_x \left(\frac{L_B}{L_x} \right)^{1/n \cdot k^*} \quad (2)$$

gdzie:

L_x - oczekiwana żywotność przy występowaniu naprężenia eksploatacyjnego $\sigma_{a,betr}^*$

L_B - żywotność odpowiadająca projektowaniu

$\sigma_{a,B}^*$ - naprężenie, które jest w stanie przenieść konstrukcja osi, aby osiągnąć żywotność L_B osi zestawu kołowego;

d_x - średnica rozpatrywanego przekroju osi

n - wykładnik naprężenia ($n=1 \div 2$ dla wieńca i tarczy koła, $n=3$ dla osi zestawu kołowego)

k^* - wykładnik żywotności ($k^*=5 \div 8$, zależny od gradientu naprężenia, stanu powierzchni i stanu obciążenia w rozpatrywanej strefie elementu konstrukcyjnego).

Z oczekiwanej żywotności L_x i wymaganej żywotności projektowej L_B można ustalić wymagane zmniejszenie naprężeń $\sigma_{a,betr}^*$ względnie zwiększenie średnicy d_x .

Z drugiej strony z naprężenia $\sigma_{a,betr}^*$, które jest w stanie przenieść konstrukcja i ekwiwalentnego naprężenia $\sigma_{a,\dot{a}q}$ można określić oczekiwaną żywotność L_x w porównaniu do wymaganej żywotności projektowej L_B :

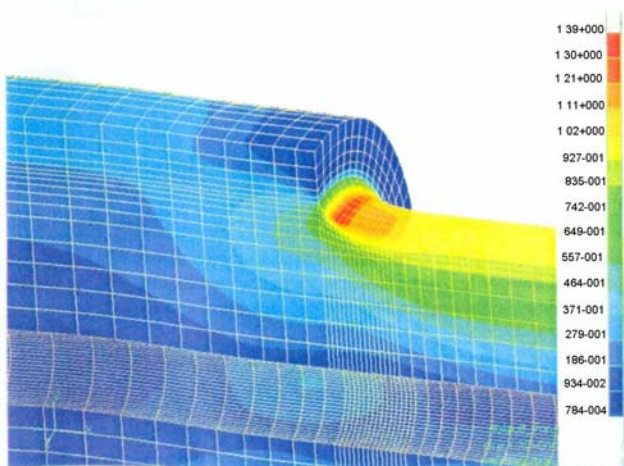
$$L_x = L_B \left(\frac{\sigma_{a,betr}^*}{\sigma_{a,\dot{a}q}^*} \right)^{k^*} \quad (3)$$

Wg tego wzoru, wyrażającego zależność pomiędzy żywotnością i naprężeniami, naprężenie większe o 10 % w stosunku do wartości naprężenia, które jest w stanie przenieść konstrukcja zmniejsza żywotność o 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 13103:2011+A1 [17] oraz PN-EN 13104:2011+A1 [18]. Osie toczne były wykonane z materiału normalizowanego cieplnie EA1N (25CrMo4), 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 kilometrów L_x wynosił 3 miliony kilometrów (aż do

ujawnionego pęknięcia w najbardziej wyęzonym 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):

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

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.4 (lewa strona).

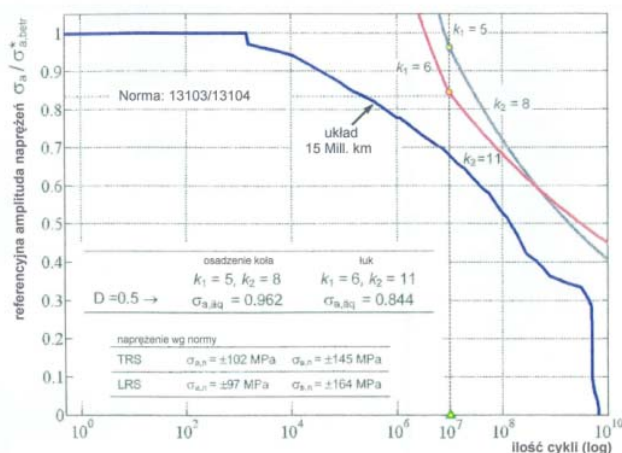


Rys.4. Usytuowanie pęknięcia zmęczeniowego w łuku osi napędnej zespołu trakcyjnego ICE 3, które wystąpiło po 7,7 latach eksploatacji i przebiegu 3 milionów kilometrów (analiza wytrzymałościowa metodą elementów skończonych)

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 ofiar wśród pasażerów. Przełom zmęczeniowy osi w strefie osadzenia koła został spowodowany korozją cierną w tym rejonie.

Graficzne przedstawienie wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych wg obliczeń zgodnie z normą PN-EN 13103+A1:2011 (osie toczne) [17] oraz PN-EN 13104+A1:2011 (osie trakcyjne) [18] w zależności od ilości cykli obciążeń znajduje się na rys.5.



Legenda:

TRS - zestaw kołowy napędny (niem. Treibradsatzwelle)

LRS - zestaw kołowy toczny (niem. Laufradsatzwelle)

Rys.5. Oszacowanie wytrzymałości zmęczeniowej osi zespołu trakcyjnego ICE (osadzenie koła na osi) w zależności od ilości cykli obciążeń

4. Zalecenia konstrukcyjne

Jak wynika z przebiegu krzywej zmęczenia, naprężenia pomierzone są o ok. 30% wyższe niżeli przedstawione w normie PN-EN13104:2011+A1 [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 fachow-

ców 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. Analizując niezrównoważone przyspieszenia a_{qc} w zależności od przechyłki toru, w raporcie ORE/ERRI B136/Rp.11/D [21] oraz PN-EN 13103:2011+A1 [17] przyjęto wartość przyspieszenia poprzecznego dla osi tocznych $\beta=0,15g=1,47 \text{ m/s}^2$ natomiast w przypadku osi napędnych PN-EN 13104:2011+A1 [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 13103:2011+A1 [17] oraz PN-EN 13104:2011+A1 [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 13103:2011+A1 [17] oraz PN-EN 13104:2011+A1 [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.

5. Podsumowanie

Problematyka projektowania osi, technologii wykonania oraz badań diagnostycznych jest cały czas przedmiotem konsekwentnego rozwoju w wyniku prowadzonych prac studialnych oraz doświadczalnych w krajach europejskich w ramach krajowych projektów badawczo-rozwojowych oraz pod nadzorem Unii Europejskiej. Do istotnych czynników prac badawczo-rozwojowych należy zaliczyć między innymi np. badania zmęczeniowe przeprowadzane na próbkach w skali 1:1 na specjalnych stanowiskach badawczych. Właściwe zaprojektowanie osi, jej technologia wytwarzania oraz utrzymanie poprawnego stanu technicznego należą do czynników gwarantujących niezawodność oraz dyspozycyjność pojazdu, co wpływa na jego wyniki przewozowe, a tym samym zwiększają pozycję transportu szynowego na rynku przewozowym w porównaniu do innych środków transportowych. Wszystkie ww. czynniki gwarantują

dopiero osiągnięcie właściwego celu. Należy pamiętać, że na niezawodność osi zestawów kołowych ma wpływ również stan utrzymania innych elementów zwłaszcza łożysk tocznych. Bardzo częstym przypadkiem niewłaściwego stanu utrzymania łożysk (niedostatek smaru, jego nieprawidłowe właściwości, zbyt małe luzy promieniowe, uszkodzenia materiałowe) jest przyczyną ukłęcia czopa osi zestawu kołowego, co powoduje znaczne straty materialne w kursującym taborze oraz w infrastrukturze kolejowej. Dlatego tak istotne znaczenie ma również diagnostyka ze strony infrastruktury kolejowej, między innymi zainstalowanie urządzeń do przegrzanych maźnic oraz tarcz hamulcowych w rejonie toru kolejowego. Bardzo ważnym problemem jest między innymi przeprowadzanie badań diagnostycznych przez certyfikowany personel, uprawniony do przeprowadzania zarówno badań ultradźwiękowych oraz badań magnetoskopowych osi.

6. 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 Inspektionsintervallen 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 13103:2011+A1: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych tocznych. Zasady konstrukcji.
- [18] PN-EN 13104:2011+A1: 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.