

Katarzyna CHRUZIŁ

METODOLOGIA PROJEKTOWANIA I WDRAŻANIA NOWYCH KONSTRUKCJI KÓŁ KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Streszczenie. Nowe pojazdy szynowe i ich elementy powinny spełniać kilka podstawowych założeń, na które uwagę należy zwrócić już na etapie projektowania. Przy czym optymalizację projektowania warunkują wymagania stawiane obecnie nowym zestawom kolejowym i ich elementom: bezpieczeństwo, trwałość i niezawodność, dbałość o środowisko, niski koszt wytwarzania i eksploatacji, podejście systemowe.

NEW WHEELS CONSTRUCTION OF RAILWAY WHEEL SETS DESIGNING AND IMPLEMENTATION

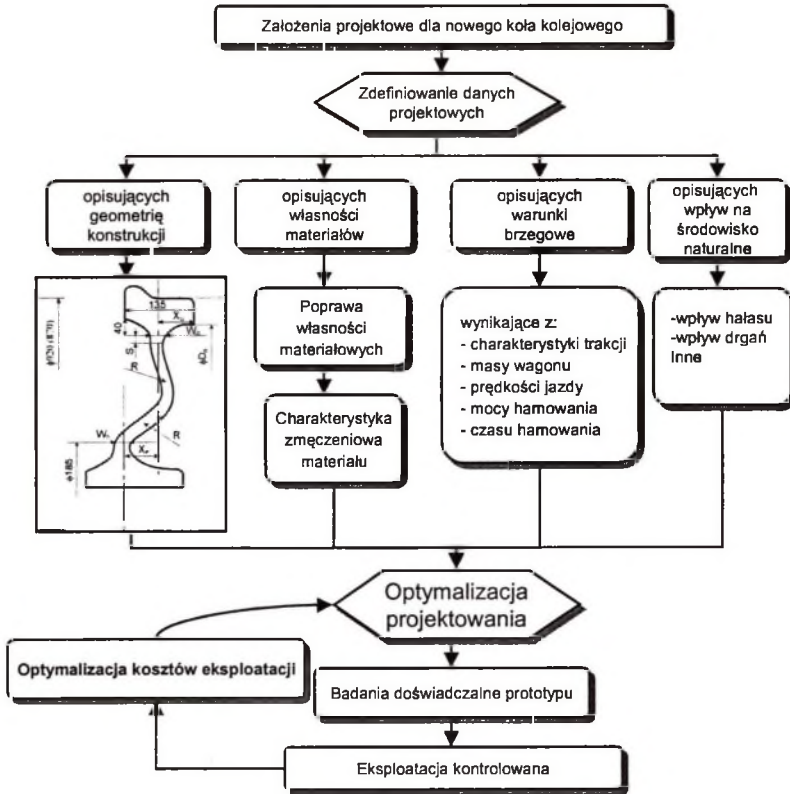
Summary. New railway vehicles and their elements ought to meet several basic specifications during their designing. And optimization of designing is contingent upon present requirements of new railway wheel sets and their elements: safety, durability and reliability. environment care, low costs of manufacture and operation. system approach.

1. WPROWADZENIE

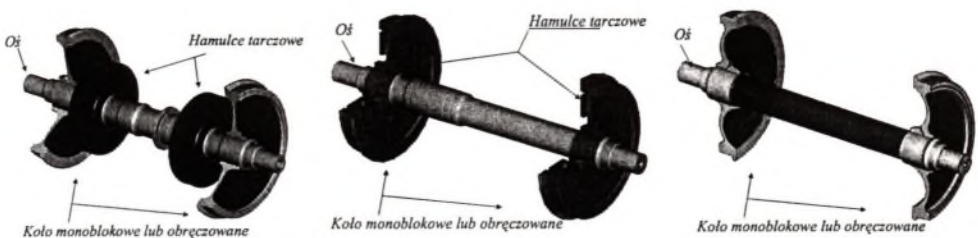
Kolejowy zestaw kołowy jest jednym z najważniejszych elementów układu napędowego pojazdu szynowego. Do jego podstawowych zadań należą: umożliwienie ruchu pojazdu, prowadzenie pojazdu po torze, przeniesienie ciężaru pojazdu, przenoszenie sił obwodowych od napędu i hamowania, przenoszenie obciążeń dynamicznych powodowanych nierównością toru na elementy resorujące. Na rysunku 1 pokazano typowe konfiguracje kolejowych zestawów kołowych z kołem monoblokowym.

Zdefiniowanie danych projektowych – rys.2 - jest powiązane ze zużyciem zmęczeniowym, które zachodzi w elementach pojazdu pod wpływem eksploatacji (wg UIC 515 trwałość pojazdu szynowego powinna być taka, aby mógł on być efektywnie eksploatowany w ciągu 30 lat). Na zużycie zmęczeniowe ma wpływ między innymi: geometria, własności materiałów, warunki pracy i obciążenia. Są to podstawowe dane projektowe, ale uwzględnienie w obliczeniach wytrzymałościowych tych wszystkich cech jest bardzo trudne.

Danymi wejściowymi przy projektowaniu koła zestawu kolejowego są przede wszystkim standardy oraz normy europejskie i krajowe, np. w Polsce będą to: PN 98/K-91018, PN 98/K-91019, PN 98/K-91056, UIC 510.2, UIC 812.2, UIC 812.3, UIC 510.2, EN 13103, EN 13104 itp., oraz dodatkowe wymagania zamawiającego, np. pionowe i poziome obciążenia statyczne lub dynamiczne.



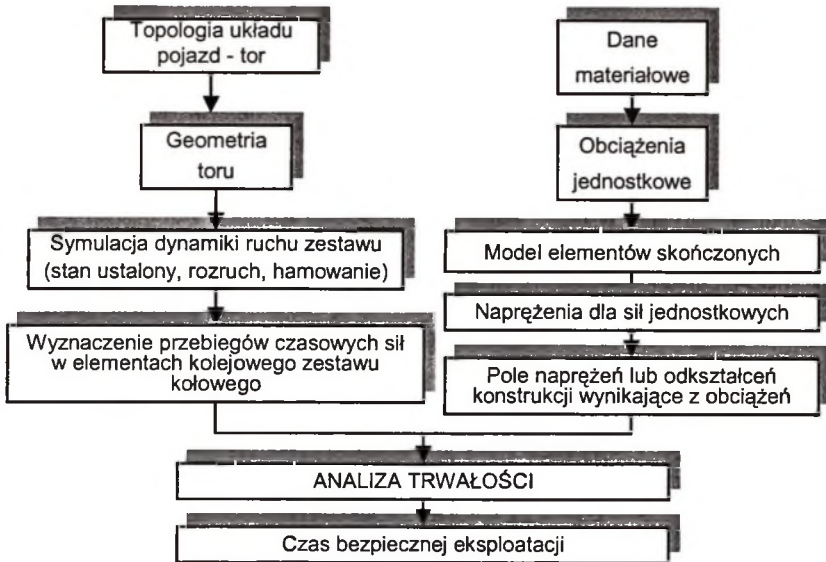
Rys. 1. Proces projektowania i wdrażania nowych kół kolejowych zestawów kołowych
 Fig. 1. Designing and implementation process of new railway wheels



Rys.2. Typowe konfiguracje zestawów z kołem monoblokowym
 Fig. 2. Typical configuration of sets with monoblock wheel

Jedną z metod weryfikacji wytrzymałości zmęczeniowej przyjętej w praktyce są metody doświadczalne oparte na poddawaniu elementów konstrukcji zamierzonemu obciążeniu oraz ocena ilości cykli do chwili wystąpienia uszkodzenia. Badania te są jednak bardzo czasochłonne i drogie. Obecnie coraz częściej do oceny trwałości zmęczeniowej stosuje się metody obliczeniowe oparte na symulacjach komputerowych wykonywanych w programach wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych (MES)[1].

Analizę trwałości konstrukcji zestawu kołowego można zobrazować schematycznie jak na rysunku 3.



Rys. 3. Procedura do analizy trwałości konstrukcji kolejowego zestawu kołowego
 Fig. 3. Procedure for durability analysis of railway wheel set construction

Danymi wejściowymi procedury są dane o topologii układu pojazd-tor oraz dane materiałowe. Konieczne jest również zdefiniowanie zaburzeń zewnętrznych wpływających na ruch analizowanego obiektu. W przypadku pojazdów szynowych może to być profil toru. Na podstawie symulacji ruchu w czasie stanu ustalonego, jak również w czasie rozruchu (rozpędzania) czy hamowania wyznaczane są siły (najczęściej przebiegi czasowe sił) w elementach łączących poszczególne bryły analizowanego układu. Przebiegi tych sił stanowią podstawę oszacowania trwałości konstrukcji. Równoległe stosując metodę elementów skończonych (MES) wyznacza się pole odkształceń lub naprężeń konstrukcji. Najczęściej w tych obliczeniach stosuje się jednostkowe wartości składowych wektora obciążenia. Ze względu na to, że konstrukcja (pojedyncze odkształcalne elementy konstrukcji) traktowana jest jako obiekty liniowe, stosując zasadę superpozycji oblicza się pole naprężeń lub odkształceń dla pojedynczych składowych wektora obciążeń, a następnie składa wyniki dla złożonego wieloosiowego stanu obciążenia. Następnie wykonuje się analizę trwałości zmęczeniowej za pomocą dostępnych oprogramowań (np. LMS FALANCS).

Takie podejście skraca czas powstawania konstrukcji. Podejście to umożliwia na etapie projektowania modyfikację własności konstrukcji tak, aby zwiększyć jej wytrzymałość zmęczeniową. Jednak ostateczny najbardziej wiarygodny test przeprowadza się za pomocą badań eksperymentalnych [1].

Badania eksperymentalne mogą także posłużyć do uzyskania danych wejściowych dla kolejnych etapów projektowania.

2. DANE OPISUJĄCE GEOMETRIĘ

W zależności od miejsca i warunków eksploatacji geometria nowego koła ma narzucone niektóre wymiary geometryczne lub ich granice. W pracy [2] pokazano próbę optymalizacji geometrii koła kolejowego zestawu kołowego mając na uwadze:

- zmniejszenie naprężeń wynikających z obciążeń mechanicznych;
- zmniejszenie naprężeń wynikających z obciążeń termicznych;
- przemieszczenie główki koła względem piasty;
- minimalizację masy koła.

Porównanie wykonano dla koła standardowego UIC.

Aby otrzymać koła optymalne ze względu na poszczególne wymagania modyfikowano sześć parametrów geometrycznych koła. Optymalizację przeprowadzono dla minimalnej i maksymalnej wartości parametru, co dało $2^6 = 64$ kombinacji.

Analizowane odpowiedzi pochodzące z kalkulacji tych 64 kombinacji mogą być używane w celu ustalenia wielomianu empirycznej postaci wzoru:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_6 x_6 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \dots + \beta_{123456} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 \quad (1)$$

$x_1 - x_6$ to 6 zmiennych zakodowanych w celu przyjęcia wartości -1 na niższym poziomie i $+1$ na wyższym poziomie. Współczynniki $\beta_1 - \beta_6$ są głównym efektem, który szacuje średnią zmianę w odpowiedzi, kiedy jeden przechodzi od niskiego (-) do wyższego (+) poziomu każdej pojedynczej zmiennej. Także interakcje ($\beta_{12}, \beta_{123}, \dots, \beta_{123456}$) pomiędzy różnymi parametrami są wykryte dzięki użyciu metody FFDM.

Rezultatem tej pracy były przybliżone wzory wyznaczania optymalnej konstrukcji koła ze względu na:

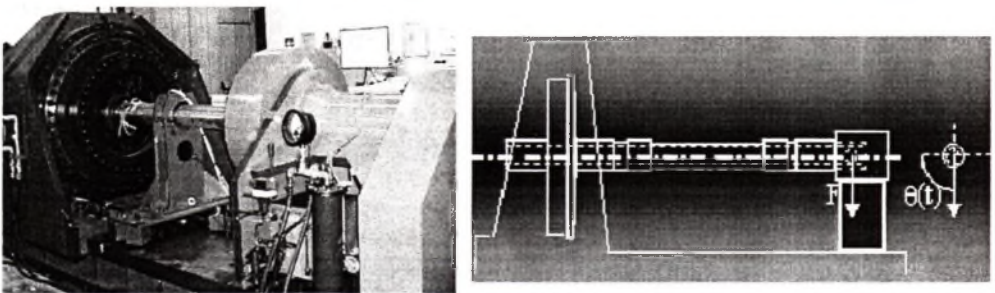
- przemieszczenie obręczy koła wywołane hamowaniem;
- masę koła;
- naprężenia wynikające z kontaktem koła z szyną;
- sztywność koła.

3. DANE OPISUJĄCE WŁASNOŚCI MATERIAŁOWE

Zadaniem projektowania nowych stali na kolejowe zestawy kołowe jest zwiększenie bezpieczeństwa pasażerów, zmniejszenie ilości defektów kół, a tym samym zwiększenie ich trwałości. Musi być to oczywiście, stal zgodna ze standardami i normami, a poszukiwanym celem projektowania jest stal zgodna z wymaganiami odbiorcy.

Materiał, z którego są wykonane zestawy kołowe, jest kluczowym wśród materiałów zastosowanych w kolejnictwie, ponieważ odpowiednia jego selekcja zapewnia bezpieczeństwo i spełnienie wymagań niskich kosztów wytwarzania i eksploatacji.

Kolejnym problemem projektowania nowych gatunków stali są dokładne badania zmęczeniowe projektowanego lub zmodyfikowanego materiału. Na rysunkach 4 i 5 pokazano przykład stanowisk do badań zmęczeniowych kolejowych zestawów kołowych [3].



Rys.4. Stanowisko badawcze do testów zmęczeniowych koła

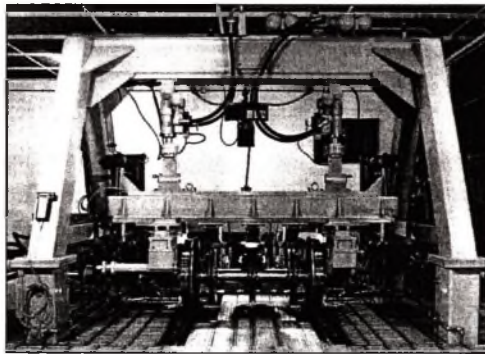
Fig.4. Research stand appropriated for fatigue wheel investigation



Rys. 5. Stanowisko badawcze do testów zmęczeniowych osi
Fig. 5. Research stand appropriated for fatigue axle investigation

4. DANE OPISUJĄCE WARUNKI BRZEGOWE

Bardzo ważne jest określenie oddziaływania wynikającego z kontaktu koła z szyną, czyli warunków brzegowych eksploatacji. Na rysunku 6 pokazano uniwersalne stanowisko do badań zestawów kolejowych – firmy Lucchini - umożliwiające symulację dynamiki jazdy zestawu kolejowego [3].

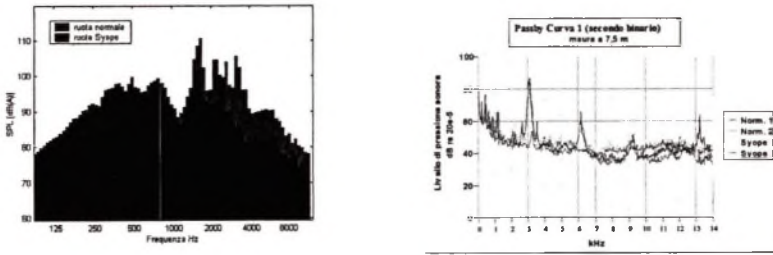


Rys. 6. Uniwersalne stanowisko do badań zestawów kołowych
Fig.6. Universal research stand appropriated for wheel sets studies

5. DANE OPISUJĄCE WPLYW NA ŚRODOWISKO NATURALNE

Dużą wagę już na etapie projektowania przykładają się obecnie do ochrony środowiska naturalnego. Tworząc elementy pojazdów musimy pamiętać o redukcji hałasu i drgań, jakie one powodują. Nowoczesne rozwiązania konstrukcji kół pozwalają w dużym stopniu zredukować hałas i drgania, co jest szczególnie ważne w przypadku ich użytkowania w aglomeracjach miejskich.

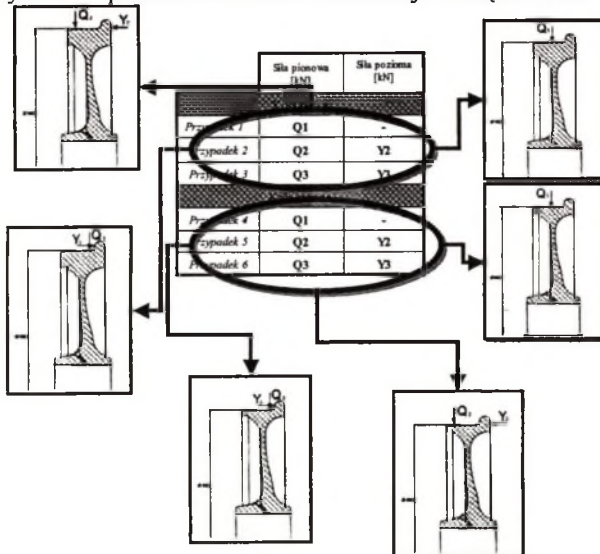
Zastosowanie nowej konstrukcji koła powleczonego warstwą aluminiowo-polimerową skutecznie zredukowało hałas wywołany jazdą pociągu, szczególnie w trakcie jazdy po łuku – rysunek 7 [3].



Rys.7. Redukcja hałasu: a) na poziomie ogólnym, b) w czasie jazdy po łuku
Fig. 7. Noise reduction: a) on general level, b) during the movement along curved railway track

6. OPTIMALIZACJA PROJEKTOWANIA

Znając obciążenia zewnętrzne kół oraz ich charakterystykę materiałową możemy rozpocząć analizę numeryczną. Obciążenia wynikające z kontaktu koła z szyną zależą od odcinka drogi, po jakim toczy się koło. Duży wpływ na pole odkształceń i naprężeń ma także zużycie koła. Na rysunku 8 pokazano możliwe kombinacje obciążeń koła



Rys. 8. Obciążenia koła w trakcie eksploatacji
Fig. 8. Operation loads of wheel

Zamodelowanie obciążeń wynikających z hamowania pociągu zależy od rodzaju zastosowanych hamulców.

W przypadku hamulca tarczowego należy zdefiniować warunki brzegowe opisujące strumień mocy dostarczonej przez klocek (jego miejsce przyłożenia i wartość), sposób, w jaki koło oddaje ciepło, a także czas hamowania

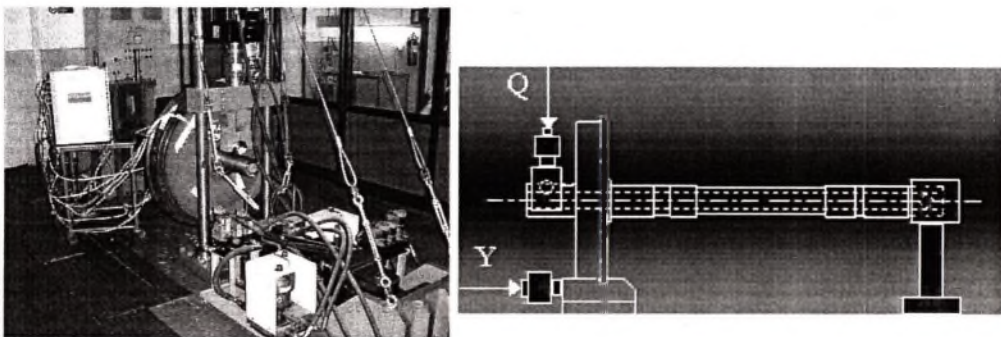
Hamulec tarczowy umieszczony na tarczy koła wymusza jeszcze uwzględnienie w obliczeniach sił wynikających z zamocowania hamulca. Wynikiem analizy numerycznej są mapy odkształceń i naprężeń wyznaczanych obciążen.

Następnie wyniki są oceniane zgodnie z założonymi kryteriami, którymi mogą być np: karty UIC 510.2, schemat Haigha, czy schemat Smitha.

7. BADANIA DOŚWIADCZALNE PROTOTYPU

Po analizie numerycznej tworzony jest prototyp koła, który przechodzi wiele badań na stanowiskach doświadczalnych.

Jako pierwsze przeprowadzane są badania statyczne. Na rysunku 9 pokazane jest stanowisko do badań statycznych składające się z dwóch 500 kN hydraulicznych pras, które umożliwiają zastosowanie zarówno siły pionowej F_z na czopie, jak i poziomej F_x na gwincie [3].



Rys. 9. Stanowisko do badań statycznych kół kolejowych
Fig. 9. Research stand appropriated for static test of railway wheels

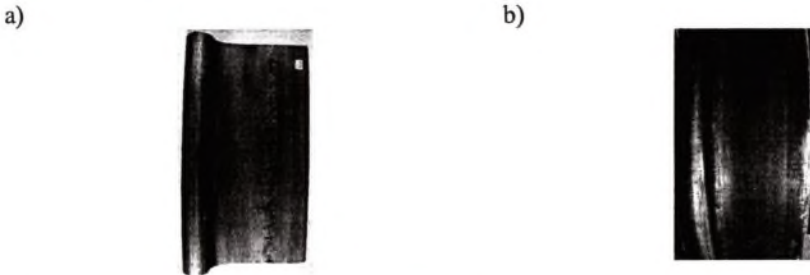
Naprężenia (pochodzące od sił pionowych) są mierzone w punktach, gdzie osiągają maksimum dla różnych nieregularnych pozycji – od 0 do 360°. Umożliwia to znalezienie cyklu obciążeń w punktach naprężeń maksymalnych dla jednego obrotu koła, co w połączeniu z wykresem Haigha umożliwia znalezienie równoważnika symetrycznego cyklu uszkodzeń.

8. EKSPLOATACJA KONTROLOWANA (WALIDACJA)

Kolejnym etapem procesu projektowania i wdrażania nowego produktu jest eksploatacja pod ścisłą kontrolą, w trakcie której przeprowadzane są testy i badania na prototypie. Pełne informacje otrzymujemy dopiero poprzez porównanie nowych rozwiązań ze starą wersją lub innym, podobnym rozwiązaniem.

9. OPTIMALIZACJA KOSZTÓW EKSPLOATACJI

W trakcie eksploatacji kontrolowanej duży nacisk kładzie się na optymalizację kosztów utrzymania kolejowych zestawów kołowych. Na rysunku 10 pokazany jest przykład zwiększenia trwałości poprzez zmniejszenie uszkodzeń na powierzchni toczonej koła.



Rys. 10. Pełen obraz powłoki: a) pierwotne rozwiązanie po przejechaniu 80 000 km, b) nowe rozwiązanie po procesie optymalizacji i przejechaniu 320 000 km

Fig. 10. Complete coating view: a) initial solution after 80 000 km distance covered; b) new solution after optimization process and 320 000 km distance covered

Literatura

1. Uhl T., Chudzikiewicz A.: Analiza trwałości konstrukcji pojazdów szynowych w procesie projektowania, Pojazdy Szynowe, Arłamów 2000.
2. M. Fermer: Optimization of a Railway Freight Car Wheel by Use of a Fractional Factorial Design Method, Chalmers University of Technology, Division of Solid Mechanics, 1993.
3. F. Trombini: New Wheels for New Requirements. Solid wheels with brake discs mounted on the web: Features and analysis methodology. 1st International Conference Paris – France 2002.

Praca wykonana w ramach Badań Własnych BW- 468 /RM10-4/2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Piec

Abstract

New railway vehicles and their elements ought to meet some basic requirements and they should be taken into consideration during designing process. And optimization of designing is contingent upon present requirements of new railway wheel sets and their elements: Safety, Durability and Reliability. Environment Care. Low Costs of Manufacture and Operation. System Approach. One of fatigue strength verification methods, being in practical application, are experimental methods. They are based on intentional loading process of constructional elements and cycles quantity estimation process until the failure appears. Nevertheless, these research are very expensive and time – consuming. Nowadays, in order to fatigue strength estimation, we often use analytical methods based on simulation of finite elements models.