

Roman Bąk

O KRYTERIACH OCENY WYTRZYMAŁOŚCI I TRWAŁOŚCI ZESTAWÓW KOŁOWYCH POJAZDÓW SZYNOWYCH

Streszczenie. Opracowanie zawiera przegląd metod oceny wytrzymałości i trwałości zestawów kołowych pojazdów szynowych. Omówiono kryteria oceny uwzględniające aktualny stan wiedzy w zakresie numerycznej analizy stanu odkształcenia i naprężenia, zmęczenia materiałów i mechaniki pękania.

ON THE EVALUATION CRITERIA OF RAIL WHEELSETS STRENGTH AND DURABILITY

Summary. The paper contains an overview of the evaluation methods of rail wheelsets strength and durability. The evaluation criteria taking into account the state-of-the-art findings on the numerical analysis of strain and stress, material fatigue and the mechanics of fractures.

WPROWADZENIE

Aby sformułować wiarygodne kryterium oceny wytrzymałości czy trwałości zestawu kołowego pojazdu szynowego, trzeba znać działające na ten zestaw obciążenie, które wywołuje w nim określony stan odkształcenia i naprężenia oraz odpowiednie własności mechaniczne tworzywa, z którego go wykonano.

Zespół, kierowany przez autora, wykonał w latach 1973-1995 kilkadziesiąt prac naukowo-badawczych dotyczących wspomnianej problematyki. Rezultaty tych badań oraz związane z nimi przemyślenia doprowadziły mnie do przekonania, że warto by było korzystając z naszego kolejnego spotkania rozważyć wspólne możliwości sformułowania kryteriów wytrzymałości i trwałości zestawów kołowych zgodnych z obecnym stanem wiedzy w zakresie numerycznej analizy stanu odkształcenia i naprężenia, zmęczenia materiałów i mechaniki pękania. Skupimy uwagę na ocenie wytrzymałości i trwałości jednego z elementów zestawu, a mianowicie koła (monoblokowego, lub obręczowego), bo jest to problem trudniejszy, jako że oś zestawu można traktować jako pręt.

Ilość i różnorodność metod oceny wytrzymałości i trwałości elementów maszyn i pojazdów wyklucza możliwość szczegółowego i wyczerpującego ich omówienia w ramach jednego referatu. Ograniczymy się do przeglądu tych spośród nich, które w możliwie największym

stopniu uwzględniają aktualny stan wiedzy, są stosunkowo proste i stwarzają realne możliwości ich praktycznego zastosowania.

W latach siedemdziesiątych Biuro Prób i Badań ORE-Międzynarodowej Unii Kolejnictwa UIC podało w jednym ze swych raportów sposób obliczania, zależnych od ciężaru wagonu, statycznych sił, uwzględniających nadwyżki dynamiczne, które można traktować jako normatywne obciążenie wagonowego zestawu kołowego.

Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa w Warszawie przeprowadził na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych pierwsze w kraju pomiary obciążeń działających na wagonowy zestaw kołowy w czasie jazdy po reprezentatywnych dla całej sieci PKP odcinkach toru. Wyniki tych pomiarów opracowane zostały w Instytucie Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Wartości maksymalne promieniowej i osiowej (prostopadłej do szyny) siły oddziaływania szyny na koło potraktowano jako dyskretne, stacjonarne i ergodyczne procesy stochastyczne. Określono między innymi histogramy i gęstości prawdopodobieństwa obydwu sił składowych.

Analizując wyniki pomiarów obciążeń eksploatacyjnych stwierdzono, że ich krańcowe wartości są większe od uznawanych dotychczas za graniczne. Prognozy statystyczne wykazały ponadto, że istnieje realne prawdopodobieństwo pojawienia się rzadkich przeciążeń, o wartościach większych od zarejestrowanych w trakcie pomiarów. Można zatem przypuszczać, że wbrew temu, co się powszechnie sądzi, zestawy kołowe mogą podlegać obciążeniom, które wymagają oceny ich trwałości nie tylko w zakresie ograniczonej, ale nawet niskowęglowej wytrzymałości na zmęczenie, jak również oceny możliwości ich kruchej pęknięcia.

W połowie lat siedemdziesiątych opracowano w Instytucie Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach pierwszy w kraju pakiet programów KOŁO PC (stałe udoskonalany i modernizowany), który umożliwia obliczenie na podstawie metody elementów skończonych składowych stanu odkształcenia i naprężenia (a więc również naprężenia zredukowanego) w dowolnym punkcie zestawu kołowego. Mogą to być stany odkształcenia i naprężenia spowodowane statyczną promieniową i osiową (prostopadłą do szyny) siłą oddziaływania szyny na koło, wciskami w połączeniach koła bosego z osią i obręczą oraz energią cieplną od hamowania.

System programów KOŁO PC można wykorzystać także do określenia stochastycznych zmian składowych stanu odkształcenia oraz naprężenia, a więc również naprężenia zredukowanego σ_{red} w dowolnym punkcie koła zestawu, wywołanych zmierzonym obciążeniem eksploatacyjnym. Proces stochastyczny zmian σ_{red} w dowolnym punkcie koła zestawu będzie bowiem taki sam, niezależnie od tego, czy punkt przyłożenia zmiennego losowo obciążenia (oddziaływania szyny na koło) wędruje ze stałą prędkością po obwodzie koła, czy też zajmuje na nim położenie stałe. Stwierdzenie to jest naturalnie słuszne tylko wtedy, gdy zestaw kołowy jest nieważki, a proces stochastyczny jego obciążenia jest stacjonarny i ergodyczny. Jest to duże uproszczenie, ponieważ określenie dynamicznego związku pomiędzy stanem odkształcenia i naprężenia a obciążeniem wymaga znalezienia tzw. funkcji przejścia. Innym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie pomiaru odkształceń zestawu kołowego w trakcie eksploatacji.

1. OCENA WYTRZYMAŁOŚCI KOŁA ZESTAWU OBCIĄŻONEGO NORMATYWNYMI SIŁAMI STATYCZNYMI, UWZGLĘDNIAJĄCYMI NADWYŻKI DYNAMICZNE NA PODSTAWIE NAPRĘŻENIA REDUKOWANEGO

Obciążenie ustala się na podstawie zaleceń ORE (oczywiście można zastosować inne sposoby określania obciążeń). Za pomocą systemu programów KOŁO PC (lub innego tego rodzaju systemu programów) oblicza się naprężenie redukowane σ_{red} w punkcie (obszarze) koła zestawu, gdzie osiąga ono wartość maksymalną. Kryterium wytrzymałości posiada następującą postać:

$$\sigma_{red} \leq \frac{R_e}{\delta_1} \text{ lub } \sigma_{red} \leq \frac{R_m}{\delta_2} \quad (1)$$

(gdzie R_e i R_m - granica plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie materiału koła zestawu
 δ_1 i δ_2 - współczynniki bezpieczeństwa)

2. OCENA TRWAŁEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ZMĘCZENIE KOŁA ZESTAWU OBCIĄŻONEGO NORMATYWNYMI SIŁAMI STATYCZNYMI, KTÓRE NA SKUTEK OBROTU TEGO KOŁA WYWOŁUJĄ W NIM OKRESOWO ZMIENNE NAPRĘŻENIA

Obciążenia i sposób określenia σ_{red} jest taki sam jak w poprzednim przypadku. Wyszukuje się następnie taki punkt koła zestawu, w którym w trakcie jego obrotu okresowa zmiana σ_{red} przebiega wg najbardziej niebezpiecznego rodzaju cyklu. Na podstawie naprężenia średniego σ_{mred} i amplitudalnego σ_{ared} tego cyklu, wykorzystując wykres Soderberga dla materiału koła (przy $\sigma_{mred} = \text{const.}$) oblicza się rzeczywisty współczynnik bezpieczeństwa δ i sprawdza czy mieści się on w dopuszczalnych granicach:

$$\delta = \frac{Z_{rc} \left(1 - \frac{\sigma_{mred}}{R_v}\right)}{\frac{\beta}{\varepsilon} \sigma_{ared}}, \quad (2)$$

gdzie Z_{rc} - trwała granica zmęczenia przy symetrycznym cyklu rozciągająco ściskającym
 β, ε - współczynnik działania karbu i wielkości przedmiotu

3. OCENA TRWAŁEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ZMĘCZENIE KOŁA ZESTAWU PODDANEGO LOSOWYM OBCIĄŻENIOM EKSPLOATACYJNYM NA PODSTAWIE KRYTERIUM STOCHASTYCZNEGO

Można w takim przypadku dokonać obustronnej oceny prawdopodobieństwa zniszczenia P koła zestawu metodą Strieleckiego na podstawie następującego kryterium stochastycznego.

$$F_1 F_2 < P < F_1 + F_2 - F_1 F_2 \quad (3)$$

F_1 i F_2 są to pola powierzchni zakreskowanych pokazanych na rys.1, które oblicza się według wzorów (4) i (5).

$$F_1 = \int_{\sigma_{red}^A}^{\infty} p(\sigma_{red}) d\sigma_{red} \quad (4)$$

$$F_2 = \int_0^{Z^A} p(Z) dZ \quad (5)$$

Gęstość prawdopodobieństwa $p(\sigma_{red})$ naprężenia redukowanego w najbardziej wyteżonym punkcie (obszarze) koła zestawu określa się na podstawie zmierzonego obciążenia eksploatacyjnego.

Gęstość prawdopodobieństwa $p(Z)$ trwałej wytrzymałości na zmęczenie Z materiału koła zestawu wyznaczyć należy eksperymentalnie.

Wartość σ_{red}^A odpowiada punktowi A przecięcia się krzywych $p(\sigma_{red})$ i $p(Z)$.
Wartości średnie naprężenia redukowanego i wytrzymałości na zmęczenie oznaczono

odpowiednio $\overline{\sigma_{red}}$ i \overline{Z} .

4. OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ (OGRANICZONEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ZMĘCZENIE) KOŁA ZESTAWU PRZY WYKORZYSTANIU HIPOTEZY KUMULACJI USZKODZEŃ

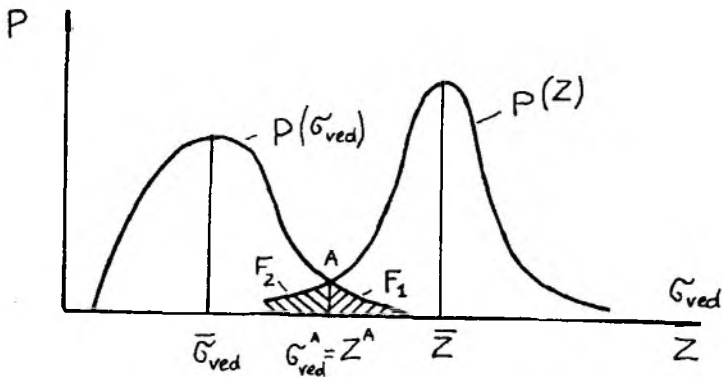
Histogram naprężenia redukowanego w punkcie (obszarze) największego wyteżenia koła zestawu określa się na podstawie histogramu zmierzonych obciążeń eksploatacyjnych.

Dowolnemu i -temu ($i=1,2,\dots,q$) poziomowi naprężenia redukowanego σ_{ired} odpowiadają :

liczba cykli zmian obciążenia w całym okresie eksploatacji n , oraz łamiąca liczba cykli N_i , którą określa się z wykresu Wohlera materiału koła zestawu.

Na podstawie hipotezy kumulacji uszkodzeń Palmgrena Mínera, zmodyfikowanej przez Serensena, można napisać następujące równanie

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = a \quad (6)$$



Rys.1

Wartość a oblicza się według wzoru zaproponowanego przez Serensena

$$a = \frac{\sigma_{qred} \xi - kZ}{\sigma_{qred} - kZ} \quad (7)$$

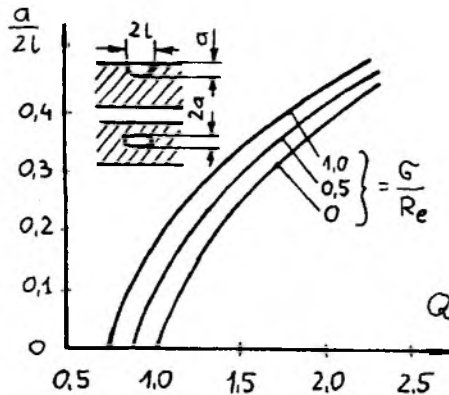
gdzie: Z - trwała wytrzymałość na zmęczenie materiału koła zestawu dla właściwego rodzaju cyklu

k - ułamek określający najniższą wartość naprężenia zredukowanego mogącą wywołać uszkodzenie (wynosi on od 0.4 do 0.6, najczęściej 0.5).

Współczynnik wypełnienia przebiegu ξ określa następująca formuła:

Przypomnijmy na koniec, że modele obliczeń wytrzymałościowych dla przypadku obciążeń zmiennych są znacznie mniej uniwersalne i adekwatne do rzeczywistości niż dla obciążeń statycznych. Dlatego decydującą rolę przy ocenie wytrzymałości, czy trwałości zmęczeniowej odgrywają doświadczalne badania rzeczywistych elementów poddanych forsownym obciążeniom eksploatacyjnym bądź programowanym.

W latach siedemdziesiątych w Instytucie Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach opracowano projekt symulatora obciążeń kołowych zestawów pojazdów szynowych. Pomiary obciążeń eksploatacyjnych, o których była wcześniej mowa, mogą posłużyć do opracowania odpowiedniego programu obciążeń do badań trwałości zestawu kołowego na symulatorze. W Ośrodku Badawczo Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu funkcjonuje stanowisko do badań zmęczeniowych osi zestawu kołowego.



Rys.2

Literatura

- [1] Prace naukowo-badawcze Instytutu Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn oraz Instytutu Transportu Politechniki Śląskiej w Gliwicach wykonane w latach 1973-1992 przez zespół w składzie: Roman Bąk (kierownik naukowy), Tadeusz Burczyński, Krzysztof Grajek, Michał Zacharski, Tadeusz Gawryś oraz Marek Pless, Tomasz Adamczyk, Bogna Mrówczyńska, Tomasz Matyja, Henryk Gębczyński, Marek Sitarz.
- [2] Kocańda St., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa 1985
- [3] Bąk R.: Piętnaście wykładów z wytrzymałości materiałów. Skrypt Politechniki Śląskiej w Gliwicach (w druku).

Recenzent: doc. dr inż Zbigniew Ginalski

Wpłynęło do redakcji 10.07.1995 r.

Abstract

The paper contains an overview of the evaluation methods of rail wheelsets strength and durability. The evaluation criteria taking into account the state-of-the-art findings on the numerical analysis of strain and stress, material fatigue and the mechanics of fractures.

The paper presents the evaluation criteria taking into account the state-of-the-art findings on the numerical analysis of strain and stress, material fatigue and the mechanics of fractures. In the first place, an analysis of strength and durability of one of the wheelset elements, i.e. the wheels (compact or equipped with the wheelband) has been made, since it poses more difficult problem than the axle, which can be treated as a rod.

The quantity and diversity of strength and durability of vehicle parts evaluation methods has forced the author to limit himself to the investigation of these specific methods, which are most up-to-date, are comparatively simple and best suited for practical use.

The greatest attention has been paid to the following problems:

- evaluation of the strength of the wheelset wheel loaded with standard static force, accounting for the dynamic surplus, basing on the reduced stress
- evaluation of the long-term fatigue strength of the wheelset wheel loaded with standard static force; the force produces periodically varying stress during the rotation of the wheel
- evaluation of the long-term fatigue strength of the wheelset wheel loaded with random running loads, basing on stochastic criteria
- evaluation of the fatigue durability (the limited fatigue strength) of the wheelset wheel, employing the damage accumulation hypothesis
- evaluation of the wheelset wheel durability in the low-cycle fatigue range, caused by infrequent overloads (predicted by conjecture) on the basis of strain criteria
- evaluation of possibility of wheelset wheel brittle failure on the basis of Irwin criterion.