

Piotr Adamiec
Marek Sitarz
Mirosław Witaszek

TRWAŁOŚĆ UKŁADU KOŁO - SZYNA

Streszczenie. W artykule podano metodę obliczania trwałości i niezawodności, a także zużycia powierzchni. Przedstawiono sposób zwiększenia trwałości zestawów kołowych

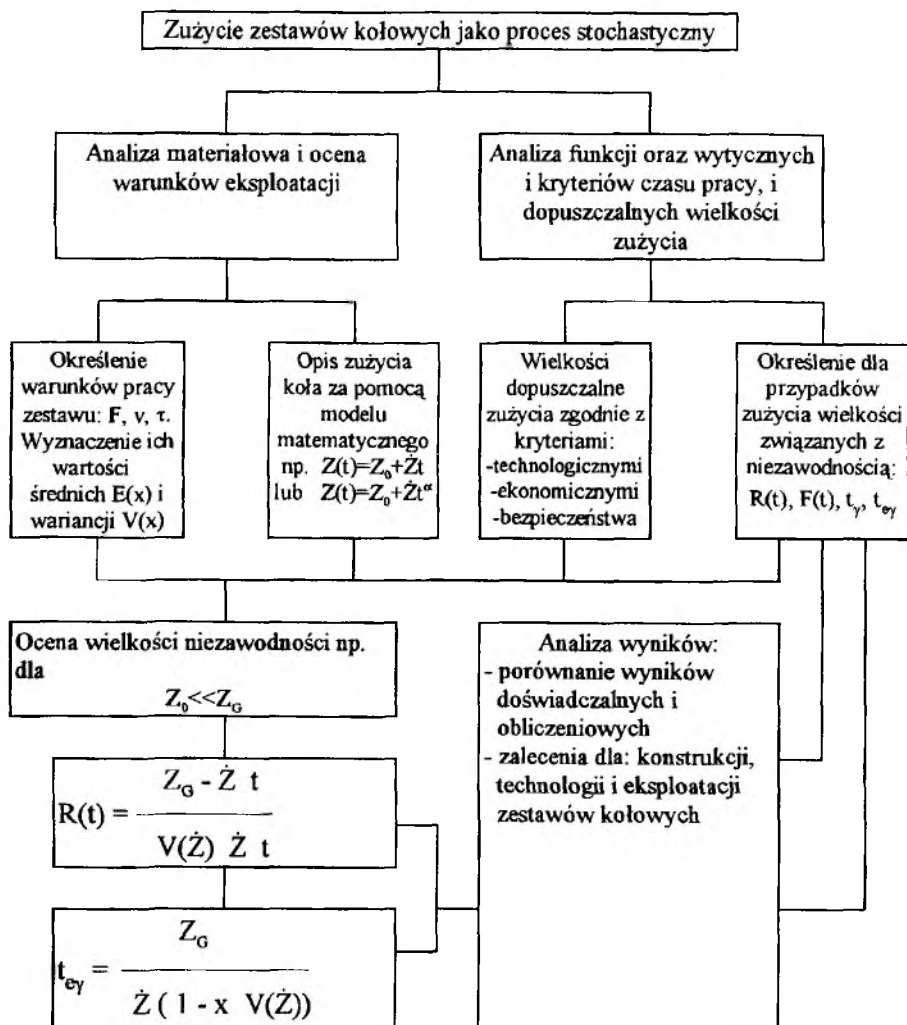
DURABILITY OF WHEEL - RAIL SYSTEM

Summary. A review is given of the durability and reliability calculation and surface damage phenomena. The way of durability increasing of rail wheelsets was presented.

1. WSTĘP

Rozwój techniki transportu kolejowego, a zarazem zwiększenie intensywności jego wykorzystania powodują wzrost ilości uszkodzeń i zużycia taboru kolejowego, a w szczególności układu koło - szyna. W czasie użytkowania taboru kolejowego zestaw kołowy (koło) jest narażony na oddziaływania makro- i mikrootoczenia, które można sprowadzić do działania obciążeń dynamicznych o różnym natężeniu. Na obciążenia te składają się siły pionowe, boczne i tarcia, które dla czteroosiowej węglarki o masie 60 t, jadącej z prędkością 60 - 80 km/h, wynoszą odpowiednio na jedno koło: siły pionowe - ok. 100 kN, siły boczne - ok. 50 kN (w łuku), siły tarcia ok. 50 kN, które mogą przy gwałtownym hamowaniu wzrosnąć do 450 kN [1]. W czasie eksploatacji siły te mogą powodować zużycie kontaktowe koła i szyny lub zniszczenie zmęczeniowe takiego układu.

W przypadku zużycia kontaktowego ma miejsce zużycie ściernie i adhezyjne, powodujące zmianę wymiarów geometrycznych i w następstwie zmianę profilu obręczy oraz zmęczeniowe zużycie kontaktowe powodujące powstawanie wyrw pittingowych. Cykliczne obciążenie eksploatacyjne może spowodować również pęknięcie zmęczeniowe obręczy i szyny. Procesy te posiadają charakter stochastyczny, a określane trwałości przy złożonych kryteriach (np. zużycia geometrycznego) cechują się dużym rozrzutem wyników. Rozrzut ten decyduje o niezawodności eksploatacyjnej zestawów kołowych, rozumianej jako prawdopodobieństwo nieprzekroczenia wymiarów granicznych w założonym przedziale czasu, tzn. $R(t) = P(T > t)$, gdzie T - zmienna losowa czasu poprawnej eksploatacji, a t - zadany przedział czasu.



Rys. 1. Schemat wyznaczania wielkości decydujących o trwałości i niezawodności zestawów kołowych:

F - obciążenie, v - szybkość poślizgu, τ - naprężenie tarcia, $Z(t)$ - zużycie bieżące, Z_0 - zużycie początkowe, \dot{Z} - intensywność zużycia, Z_G - zużycie graniczne, $V(\dot{Z})$ - współczynnik zmienności intensywności zużycia, t_γ - trwałość, t_{ey} - trwałość efektywna, α - stała, x - kwantyl

Fig. 1. The diagram of the way to determine quantities affecting the durability and reliability of wheelsets:

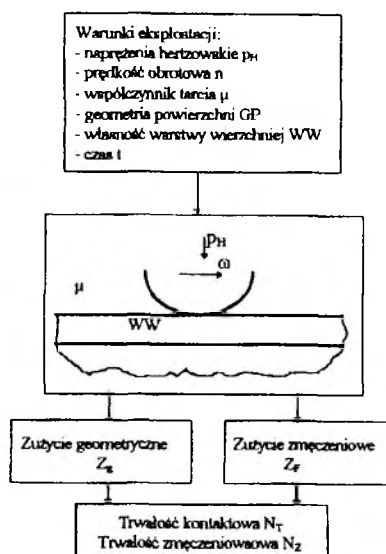
F - load, v - slip velocity, τ - friction stress, $Z(t)$ - current wear, Z_0 - initial wear, \dot{Z} - rate of wear, Z_G - limit wear, $V(\dot{Z})$ - coefficient of variation of wear intensity, t_γ - durability, t_{ey} - effective durability, α - constant, x - quantile

Do oceny trwałości zestawów i ich niezawodności eksploatacyjnej można wykorzystać rozważania Thuma [2], które można przedstawić w postaci algorytmu na rys. 1. Dla określenia wielkości decydujących o trwałości i niezawodności elementów układu koło - szyna występujących w algorytmie na rys. 1 istnieje konieczność dokonania analizy czynników decydujących o wielkości i intensywności zużycia. Do analizy można wykorzystać modele fizyczne matematyczne symulujące układ koło - szyna. Uzyskane zależności i prawidłowości powinny być weryfikowane na podstawie pomiarów zużycia i oceny trwałości rzeczywistych zestawów kołowych pracujących na torach kolejowych.

2. MODELOWANIE ZUŻYCIA W UKŁADZIE KOŁO - SZYNA

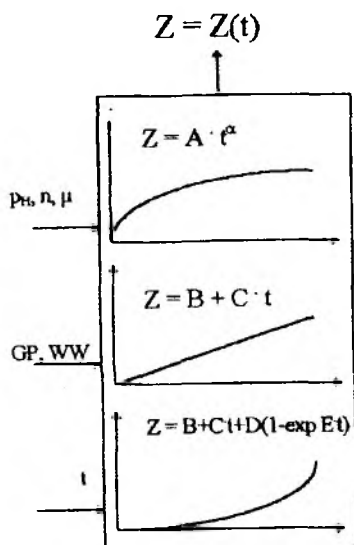
Do oceny trwałości układu koło - szyna można wykorzystać model zużycia przedstawiony na rys. 2, z którego wynika, że niezawodność układu jest funkcją trwałości kontaktowej i zmęczeniowej poszczególnych elementów układu, tzn. koła i szyny. W procesie eksploatacji układu występuje zużycie geometryczne oraz zmęczeniowe koła i szyny. Zużycie kontaktowe może być opisane za pomocą modelu matematycznego przedstawionego na rys.3, który można wyznaczyć na podstawie laboratoryjnych prób zużycia kontaktowego.

Wyżej wymienione modele ujmują wpływ czynników eksploatacyjnych na wielkości zużycia i trwałość zestawów kołowych. W analizie trwałości kół istotne są również mikromechanizmy w warstwie wierzchniej, towarzyszące zużyciu typu makro.



Rys. 2. Model zużycia układu koło - szyna

Fig. 2. A model of tribological wear of a rail - wheel system

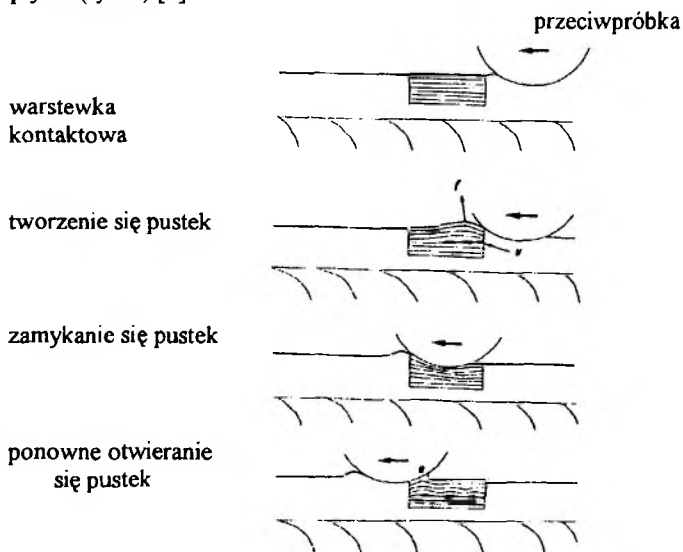


Rys. 3. Matematyczny model zużycia układu koło - szyna

Fig. 3. A mathematical model of a rail - wheel system

Zużycie mikro warstw wierzchnich zestawów kołowych następuje w tzw. strefie styku tarcowego, która jest definiowana jako strefa z występującymi odkształceniami sprężystymi i plastycznymi różnymi od stanu początkowego. Charakterystycznym zjawiskiem dla procesu tarcia w systemie koło - szyna jest cykliczność obciążenia mikroobszarów strefy styku. Wynika to ze względnego przemieszczania się punktów węzła kinematycznego systemu koło - szyna, a zużycie jest wynikiem kumulacji zmian zachodzących w strefie styku w efekcie elementarnej adhezji i odrywania nierówności.

Założenie to jest podstawą teorii delaminacji opracowanej przez Suha [4]. Kolejno w strefie styku w efekcie cyklicznych obciążeń występuje kumulacja efektów, począwszy od wzrostu gęstości dyslokacji poprzez powstawanie struktur dyslokacyjnych komórkowych, zarodkowanie mikrodefektów, ich koalescencję w mikroszczeliny, dalszą propagację w kierunku równoległym do powierzchni tarcia i powstawanie produktów tarcia w postaci płytek (rys. 4) [5].



Rys. 4. Model zużycia powstającego w wyniku tworzenia się pustek i ich rozprzestrzeniania się

Fig. 4. A model for the initiation and propagation of cracks ahead of an advancing slider

Zużycie w obszarach mikro powoduje zmniejszenie się wytrzymałości zestawów kołowych w miarę wzrostu czasu eksploatacji. Spadek wytrzymałości eksploatacyjnej posiada charakter wykładniczy i wyraża się wzorem [5]:

$$\log \frac{\sigma_0}{\sigma} = k \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{E}\right), \quad (1)$$

gdzie: σ_0 - wytrzymałość początkowa, σ - wytrzymałość eksploatacyjna po czasie t , t - czas, Q - energia aktywacji, E - energia otoczenia.

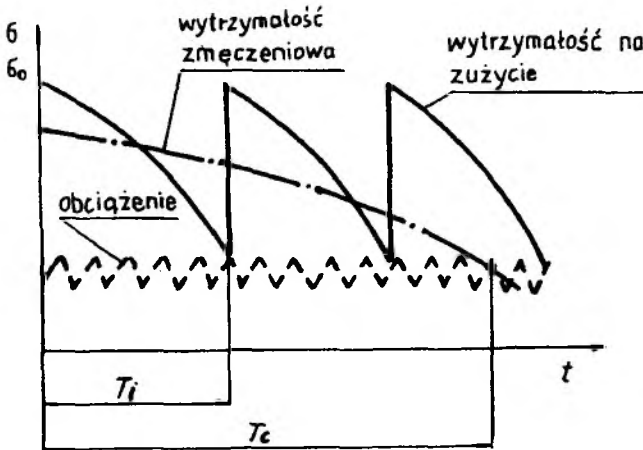
Przy założeniu, że wytrzymałość eksploatacyjna σ przybiera wartość krytyczną σ_C , równą obciążeniu σ_L można określić trwałość T jako:

$$T = k \cdot \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_C} \quad (2)$$

Uwagi te wykorzystano do analizy zużycia układu koło - szyna, a w szczególności do oceny trwałości kół w zestawach kołowych.

3. ANALIZA TRWAŁOŚCI ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Analizując wyniki zużycia kontaktowego [6] można stwierdzić, że intensywność zużycia ściernego i adhezyjnego jest zdecydowanie większa od intensywności zużycia zmęczenia kontaktowego. W przypadku obręczy zestawów kołowych o trwałości decydują zmiany geometryczne bieżni koła. Trwałość tę można zwiększyć poprzez odtworzenie profilu koła za pomocą napawania obrzeża i obróbkę skrawaniem. Możliwości kilkakrotnej regeneracji są ograniczone z jednej strony grubością obrzeża, a z drugiej strony kumulowaniem się defektów i spadkiem wytrzymałości zmęczeniowej obręczy (rys. 5).



Rys. 5. Schemat określania trwałości zestawów kołowych
Fig. 5. The diagram for determining the wheelset durability

Optymalną ilość odtworzeń można określić z rozważań dotyczących ilości możliwych napraw, która decyduje o całkowitej trwałości obręczy T_c , będącej sumą trwałości cząstkowych.

$$T_c = \sum T_i = T \cdot i, \quad (3)$$

gdzie: T_c - trwałość całkowita, T_i - trwałości cząstkowe, T - okres trwałości cząstkowej, i - ilość możliwych napraw.

Ilość możliwych napraw wynika z dyspozycyjnej grubości obręczy $\Delta B = \alpha B$, gdzie: α - współczynnik wykorzystania obręczy B - grubość obręczy i wynosi:

$$i = \frac{\alpha \cdot B}{z + \Delta}, \quad (4)$$

gdzie: z - zużycie jednostkowe, Δ - naddatek na obróbkę.

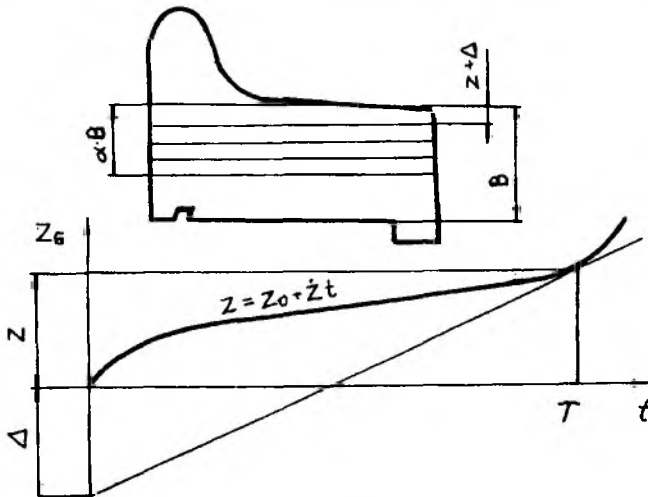
Po podstawieniu równania (4) do równania (3) otrzymujemy:

$$T_C = \frac{\alpha \cdot B \cdot T}{z + \Delta}. \quad (5)$$

Trwałość całkowita T_C powinna być maksymalna. Po zróżniczkowaniu wyrażenia (5) i przyrównaniu do zera uzyskuje się zależność:

$$\frac{\partial z}{\partial T} = \frac{z + \Delta}{T}, \quad (6)$$

która przy znajomości krzywej zużycia $z = f(t)$ pozwala określić wartość zużycia granicznego z_{gr} zapewniającego optymalną trwałość cząstkową, a zarazem trwałość całkowitą obręczy (rys.6).



Rys. 6. Sposób wyznaczania zużycia granicznego dla maksymalizacji trwałości
Fig. 6. The method of determining the limit wear in order to maximize durability

Innym sposobem regeneracji obręczy kół jest ich napawanie łukiem krytym. Napawanie takie umożliwia wykorzystanie warstw odtwarzających geometrię powierzchni oraz napawanie warstw utwardzających, zwiększających ich trwałość kontaktową. Badania wytrzymałości zmęczeniowej napawanych części maszyn [7] wskazują jednak, że proces napawania nie zwiększa wytrzymałości zmęczeniowej w obecności wad spawalniczych tworzących mikroszczeliny. Może jednak zmniejszać wytrzymałość zmęczeniową obręczy, obniżając jednocześnie trwałość całkowitą.

4. UWAGI KOŃCOWE

Prowadzone aktualnie badania modelowe systemu koło - szyna wskazują, że optymalnym modelem matematycznym eksploatacyjnego zużycia jest model liniowy (rys. 2). Analiza mikromechanizmów wskazuje, że wzrost obciążenia zwiększa prawdopodobieństwo zużycia adhezyjnego, natomiast zmniejszenie obciążenia, przy wyraźnym wzroście trwałości, prowadzi do efektów zużycia kontaktowego, np. wyrw pittingowych.

Trwałość zestawów kołowych można zwiększyć poprzez ich regenerację metodami obróbki skrawaniem (ok. 3 razy) lub ich napawanie, przy czym istotnym ograniczeniem krotności regeneracji jest wytrzymałość zmęczeniowa, stanowiąca ostateczne kryterium wytrzymałości zestawów. Napawanie obrzeży, zwiększając trwałość kontaktową zestawów, może obniżyć jednak trwałość całkowitą i możliwość regeneracji

W praktyce kolejowej ilość napraw wynosi ok. 3 - 4. Pytaniem pozostaje, jak zmienia się niezawodność naprawionych kół w świetle malejącej ich wytrzymałości zmęczeniowej. Problem ten wydaje się być szczególnie ważny przy napawanych kołach, gdzie dodatkowo dochodzi problem obecności wad spawalniczych, tworzących szczeliny mogące być zarodkami pęknięć zmęczeniowych.

Literatura

- [1] Magiera J., Piec P.: Ocena zużycia i niezawodności. "Ossolineum", Kraków 1994.
- [2] Thum H.: Zur Lebensdauerbestimmung von Verchleißteilen. Schmierungstechnik 11 (1980), 4, s. 100-103.
- [3] Adamiec P., Dziubiński J.: Monitoring and modelling of wear of hard-faced machine parts.
- [4] Suh N. P.: An overview of the delamination theory of wear. Wear 44, 1977, s. 1.
- [5] Blau P.J., Doyle E. D.: Metallographic evidence for the nucleation of subsurface microcracks. Wear, 117, 1987, s. 381.
- [6] Adamiec P., Dziubiński J.: Ocena trwałości części maszyn regenerowanych za pomocą napawania. W III Konferencja Naukowo - Techniczna Trwałość Elementów i Węzłów Konstrukcyjnych Maszyn Górniczych, Ustroń - Zawodzie 9 - 10. 11. 1994.
- [7] Adamiec P., Dziubiński J.: Pękanie i trwałość napawanych części maszyn. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport, z. 25, Gliwice, 1995.

Recenzent: prof. Edmund Tasak

Wpłynęło do redakcji: 10.07.1995 r.

Abstract

The development of railway transportation as well as its increased usage causes the increase in the resulting wear and failure of the railway stock and the wheelsets in particular. While the railway stock is being used, the wheelset is a subject to various micro- and macro-environmental influences, which can be ascribed to the action of the dynamic loads of differing intensity. These loads consist of vertical, lateral and friction forces. In case of four-axle coal car of 60 t mass going at $60 \div 80$ km/h these forces have been calculated as follows (per one wheel): vertical forces - c. 100 kN, lateral forces - c. 50 kN (while negotiating a curve), friction forces - c. 50 kN and during sudden deceleration they can go up to 450 kN [1]. These forces may cause the flange contact wear or its fatigue damage.

The research on the wheel/rail conducted at present shows that the optimum mathematical model of the run wear is the linear model (see Fig.2). The analysis of micromechanisms implies that as the load goes up, so does the probability of adhesive wear, whereas the load decrease, while decidedly improving the durability, generates contact wear effects such as pitting cracks.

The durability of wheelsets can be increased with the reconstruction by machining (c.three times) or facing by welding. The important factor limiting number of reclamations is fatigue strength which constitutes the final criterium of wheelset strength. Welding of wheel bands, while improving the contact durability of a wheel set, can lead to a decrease of total durability and reclamation chances.

The run-time practice sets the number of repairs at 3 or 4. The question is, what will be the change in the reliability of reclaimed wheels, noting their decreasing fatigue strength. This issue may be especially important in case of welded wheels, where the additional problems of welding defects exist. The defects create cracks which could become the nuclei of fatigue failures.