

Streszczenie rozprawy doktorskiej „Alternatywna metoda oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych w pojazdach szynowych”

Osie zestawów kołowych stanowią jeden z kluczowych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych, odpowiadając nie tylko za przenoszenie obciążeń od masy pojazdu, ale także za przekazywanie sił dynamicznych powstających podczas ruchu. Od ich wytrzymałości i niezawodności zależy bezpieczeństwo jazdy oraz pasażerów poruszających się pojazdem szynowym. Uszkodzenia zmęczeniowe osi mogą prowadzić do poważnych awarii, dlatego ich precyzyjna ocena wytrzymałościowa stanowi jedno z kluczowych zadań inżynierii kolejowej.

W obowiązującej normie PN-EN 13103-1:2023-05 stosuje się podejście oparte głównie na metodach analitycznych. Chociaż pozwalają one na skuteczną ocenę standardowych rozwiązań konstrukcyjnych, to nie obejmują w pełni możliwości współczesnych analiz numerycznych oraz nie przewidują procedur dla przypadków nietypowych, takich jak niestandardowe przejścia pomiędzy elementami osi czy nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne. Powoduje to ograniczenia w ocenie trwałości zmęczeniowej oraz w dostosowaniu obliczeń do złożonych rozwiązań projektowych stosowanych w nowoczesnych pojazdach szynowych.

Celem niniejszej pracy było opracowanie alternatywnej metody oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych, opartej na Metodzie Elementów Skończonych (MES), uzupełniającej i rozszerzającej klasyczne podejście analityczne. Badania przeprowadzono w trzech głównych etapach:

Metoda analityczna – wykonano obliczenia wytrzymałościowe zgodne z normą PN-EN 13103-1:2023-05, tworząc specjalny arkusz kalkulacyjny.

Badania doświadczalne – wykonano testy zmęczeniowe na rzeczywistych osiach, co umożliwiło weryfikację i kalibrację modeli MES oraz ocenę dokładności zaproponowanej metody.

Symulacje numeryczne (MES) – opracowano modele numeryczne odwzorowujące rzeczywistą geometrię osi oraz warunki obciążeń eksploatacyjnych. Dzięki tym analizom sprawdzono, na ile metoda elementów skończonych wiernie odtwarza rzeczywiste naprężenia i czy może być stosowana do obliczeń konstrukcji osi, które nie są uwzględnione w obowiązujących normach.

Dodatkowo, opracowano i przeprowadzono **badania osi w malej skali (1:5)**, które choć nie przewidziane pierwotnie w planie badawczym, wzbogaciły projekt o nową perspektywę

badawczą. Wyniki porównano z symulacjami numerycznymi. Taki podejście może obniżyć koszty podczas projektowania nowych, nietypowych osi.

W celu ułatwienia przeniesienia analizy do programu opartego na metodzie elementów skończonych (MES), przygotowano specjalne makro w języku Python. Jego zadaniem jest automatyczne generowanie trójwymiarowego modelu konstrukcji. Proces ten odbywa się na podstawie danych geometrycznych odczytanych z rysunku konstrukcyjnego. Dzięki temu możliwe jest szybkie i dokładne odwzorowanie geometrii analizowanego obiektu w środowisku obliczeniowym, co znacząco skraca czas przygotowania modelu do dalszych symulacji i analiz numerycznych.

Zastosowanie proponowanego podejścia pozwala na:

- skrócenie czasu projektowania nowych oraz modernizowanych osi,
- redukcję kosztów poprzez ograniczenie liczby prototypów wymaganych do testów,
- dokładniejsze przewidywanie trwałości zmęczeniowej w warunkach rzeczywistej eksploatacji,
- zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów szynowych,
- możliwość analizy nietypowych konstrukcji osi niedających się poprawnie ocenić metodami normowymi.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że integracja klasycznych metod analitycznych z analizą MES i weryfikacją eksperymentalną znacząco podnosi precyzję oceny wytrzymałości zmęczeniowej. Wyniki pracy mają istotne znaczenie dla przemysłu kolejowego, dostarczając narzędzi umożliwiających bardziej kompleksową, szybszą i tańszą ocenę trwałości osi, co w perspektywie długoterminowej może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa transportu szynowego oraz optymalizacji kosztów jego utrzymania. Nie bez znaczenia jest także możliwość uwzględnienia wymiarów regeneracyjnych już na etapie projektowania stanowi ważny krok w kierunku rozwoju gospodarki obiegu zamkniętego. Praca stanowi również fundament do dalszych badań naukowych, rozszerzenia narzędzia także na osie napędne oraz modyfikacji arkusza tak, aby służył do wstępnej oceny diagnostycznej osi „staroużytecznych”.

Summary

„An alternative method of assessing the fatigue strength of wheelset axles in rail vehicles”

Wheelset axles are one of the key structural components of railway vehicles, responsible not only for transmitting loads from the vehicle's mass but also for transferring dynamic forces generated during motion. Their strength and reliability directly determine the operational safety of the train and the safety of its passengers. Fatigue damage to axles can lead to severe failures; therefore, accurate fatigue strength assessment is one of the essential tasks in railway engineering.

The currently applicable standard, PN-EN 13103-1:2023-05, is based primarily on analytical methods. While these methods enable effective assessment of standard axle designs, they do not fully utilize the potential of modern numerical analysis techniques and do not provide procedures for non-standard cases, such as unconventional transitions between axle components or innovative structural solutions. This results in limitations in fatigue life assessment and reduces the adaptability of calculations to complex design solutions used in modern railway vehicles.

The aim of this work was to develop an alternative method for assessing the fatigue strength of wheelset axles, based on the Finite Element Method (FEM), which complements and extends the classical analytical approach. The research was carried out in four stages:

Analytical method – fatigue strength calculations were performed in accordance with PN-EN 13103-1:2023-05, creating a special spreadsheet.

Experimental testing – full-scale fatigue tests were conducted on actual axles, enabling verification and calibration of FEM models, as well as assessment of the accuracy of the proposed method.

Numerical simulations (FEM) – numerical models replicating the actual axle geometry and operational load conditions were developed. These analyses allowed us to check to what extent the finite element method faithfully reproduces the actual stresses and whether it can be used to calculate axle structures that are not included in the applicable standards.

Small-scale axle testing – additional fatigue tests were performed on reduced-scale axles (1:5), demonstrating the potential of such testing to reduce costs when designing novel, non-standard axles.

To facilitate the transfer of analysis to a program based on the finite element method (FEM), a dedicated Python macro was developed. It automatically generates a three-dimensional model of the structure using geometric data from the construction drawing. This

enables fast and accurate representation of the analyzed object's geometry in the computational environment, significantly reducing the time required to prepare the model for subsequent simulations and numerical analyses.

The proposed approach enables:

- shorter design cycles for new and modernized axles,
- cost reduction by minimizing the number of prototypes required for testing,
- more accurate fatigue life predictions under actual operating conditions,
- improved safety and reliability of railway vehicles,
- the ability to assess non-standard axle designs that cannot be reliably evaluated using normative methods.

The research confirmed that integrating classical analytical methods with FEM analysis and experimental verification significantly improves the precision of fatigue strength assessment. The results are highly significant for the railway industry, providing tools for more comprehensive, faster, and more cost-effective axle life evaluation, which, in the long term, may contribute to improved railway transport safety and optimized maintenance costs. Importantly, incorporating reconditioning dimensions already at the design stage is a vital step toward a circular economy. Furthermore, this work lays the foundation for future research, including extending the tool to powered axles and adapting the computational framework for preliminary diagnostic evaluation of in-service “second-life” axles.