

Łukasz FARBANIEC, Mirosław MRZYGLÓD
Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych

ALGORYTM ANALIZY NUMERYCZNEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ DLA MODERNIZOWANYCH POJAZDÓW SZYNOWYCH

Słowa kluczowe

Analiza trwałości zmęczeniowej, modernizacja pojazdów szynowych, bezpieczeństwo pojazdów szynowych.

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycje metodyki analizy trwałości zmęczeniowej pojazdów podlegających modernizacji. Zaproponowany algorytm obliczeniowy trwałości zmęczeniowej opiera się na wykorzystaniu parametrycznego modelu MES. Pozwala to na analizę zmęczeniową pojazdu przed i po modernizacji na jednym modelu, co umożliwia obliczenia kumulacyjnej macierzy uszkodzeń dla pełnego cyklu eksploatacji. Na przykładzie modernizacji lokomotywy manewrowej zaprezentowano praktyczną realizację działania algorytmu. Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować o przydatności proponowanej metodyki w zapewnieniu bezpieczeństwa modernizowanych pojazdów szynowych.

Wprowadzenie

Projektowanie trwałości zmęczeniowej konstrukcji pojazdów szynowych jest znormalizowanym procesem [1]. Podlegać mu muszą wszystkie nowo projektowane pojazdy. Jednakże dla pojazdów podlegających modernizowaniu jak dotąd nie zdefiniowano oficjalnie przebiegu procesu określenia poziomu uszkodzeń zmęczeniowych, jak i prognozowania długości możliwej eksploatacji. Przykładowo dla lokomotyw manewrowych, które obecnie podlegają procesowi

głębokiej modernizacji, czas eksploatacji przed modernizacją sięga nawet 29 lat [2], a dla zapewnienia odpowiednich parametrów ekonomicznych (koszty LCC) pojazd po modernizacji powinien być eksploatowany minimum przez kolejne 20 lat [3, 4]. Z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa użytkownika konieczne jest wprowadzenie dokładnych metod prognozowania trwałości zmęczeniowej dla tego typu pojazdów. W artykule przedstawiono propozycje algorytmu badań symulacyjnych, który umożliwi testowanie poziomu uszkodzeń zmęczeniowych zakumulowanych w konstrukcji do chwili modernizacji oraz estymowanie okresu bezpiecznej eksploatacji po modernizacji.

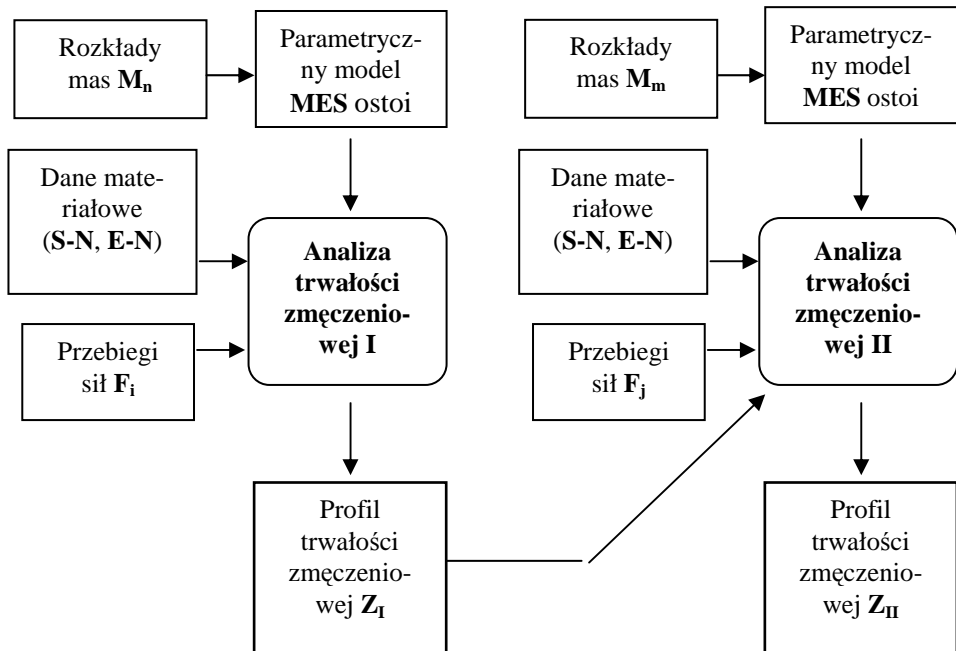
1. Algorytm analizy numerycznej trwałości zmęczeniowej dla modernizowanych pojazdów szynowych

Założeniem algorytmu jest możliwie pełne wykorzystanie obecnych możliwości analizy metodą elementów skończonych (MES) oraz maksymalne skrócenie cyklu badań symulacyjnych. Ten ostatni cel można uzyskać przez budowę parametrycznego modelu MES, na którym będzie można przeprowadzić symulacje zarówno dla pojazdu przed, jak i po modernizacji. Ponadto wykorzystanie jednego modelu MES najważniejszej części konstrukcji pojazdu – ostoji, pozwala na sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych dla cykli pracy przed i po modernizacji dla tej konstrukcji.

Algorytm można przedstawić w następujących krokach (rys. 1):

- I. Dla modelu MES ostoji przeprowadzamy symulacje przebiegu pracy konstrukcji w okresie eksploatacji T_I (przed modernizacją), uwzględniając:
 - charakterystykę zmęczeniową materiału konstrukcji (krzywą Wöhlera (S-N) oraz krzywą E-N [5, 6]),
 - reprezentatywne przebiegi sił F_i dla i sił działających na ostoje w trakcie eksploatacji (uzyskane z badań doświadczalnych lub symulacji MBS [5, 7]),
 - rozkład mas głównych podzespołów dla konstrukcji lokomotywy przed modernizacją w postaci zestawu n skupionych sił M_n .
- II. W wyniku analizy symulacyjnej uzyskujemy profil trwałości zmęczeniowej Z_I dla ostoji, który odpowiada okresowi eksploatacji T_I (profilem trwałości będziemy nazywać kumulacyjną macierz uszkodzeń zmęczeniowych dla modelu MES).
- III. Dla modelu MES ostoji przeprowadzamy symulacje przebiegu pracy konstrukcji w okresie eksploatacji T_{II} (prognoza na koniec okresu eksploatacji po modernizacji), uwzględniając:
 - charakterystykę zmęczeniową materiału konstrukcji,
 - prognozowane reprezentatywne przebiegi j sił F_j , które będą działać na ostoje w trakcie przyszłej eksploatacji (uzyskane z symulacji MBS [7]),
 - rozkład mas głównych podzespołów dla konstrukcji lokomotywy po modernizacją w postaci zestawu m skupionych sił M_m ,

- profil trwałości Z_I dla okresu eksploatacji T_I (kolejne uszkodzenia wynikłe w drugim okresie eksploatacji są dodawane do Z_I).
- IV. W wyniku analizy symulacyjnej uzyskujemy profil trwałości zmęczeniowej Z_{II} dla ostoi, który odpowiada okresowi eksploatacji $T_I + T_{II}$.



Rys. 1. Algorytm analizy numerycznej trwałości zmęczeniowej dla modernizowanych pojazdów szynowych

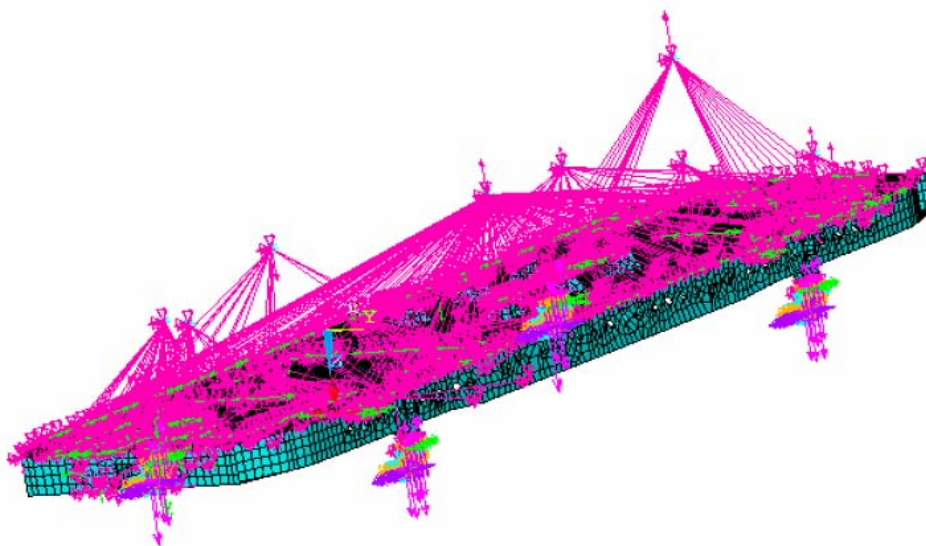
2. Przykład prognozowania trwałości dla modernizowanej lokomotywy

Dla zilustrowania proponowanej procedury badania trwałości zmęczeniowej przygotowano przykład obliczeniowy dla konstrukcji lokomotywy manewrowej typu SM42. Lokomotywa jest przeznaczona do średnich i ciężkich prac manewrowych. Zakres modernizacji pojazdu obejmował między innymi wymianę nadwozia oraz silnika [2]. Ostoja lokomotywy nie uległa zmianom konstrukcyjnym.

Informacje na temat przebiegów obciążeń działających na obiekt badań uzyskano na podstawie analizy dynamicznej Multi-Body Simulation (MBS) w programie MSC.ADAMS/RAIL [7]. Dla materiału, z którego została wyko-

nana ostoja pojazdu (stal 18G2A), wyznaczono charakterystykę zmęczeniową na podstawie danych literaturowych w postaci krzywych Wöhlera i E-N.

Model MES zamodelowano w programie ANSYS w oparciu o dokumentację techniczną pojazdu. Składa się on z 32646 elementów skończonych typu shell63 (4-wezłowych) (rys. 2) [8]. Na modelu ostoji dodano elementy masowe (MASS21), uwzględniające wypadkowe sił masowych pochodzących od podzespołów nadwozia zarówno dla konstrukcji przed modernizacją, jak i po modernizacji. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskane wyniki analizy można połączyć w jedną historię obciążeń działających na konstrukcję przed modernizacją oraz po modernizacji. W przypadku obliczeń dla konstrukcji sprzed modernizacji elementy masowe dla obiektu po modernizacji są wyłączane. Podobna zasada obowiązuje dla konstrukcji po modernizacji. Modelowanie konstrukcji w taki sposób jest warunkiem koniecznym uzyskania wiarygodnych wyników analizy trwałości zmęczeniowej.



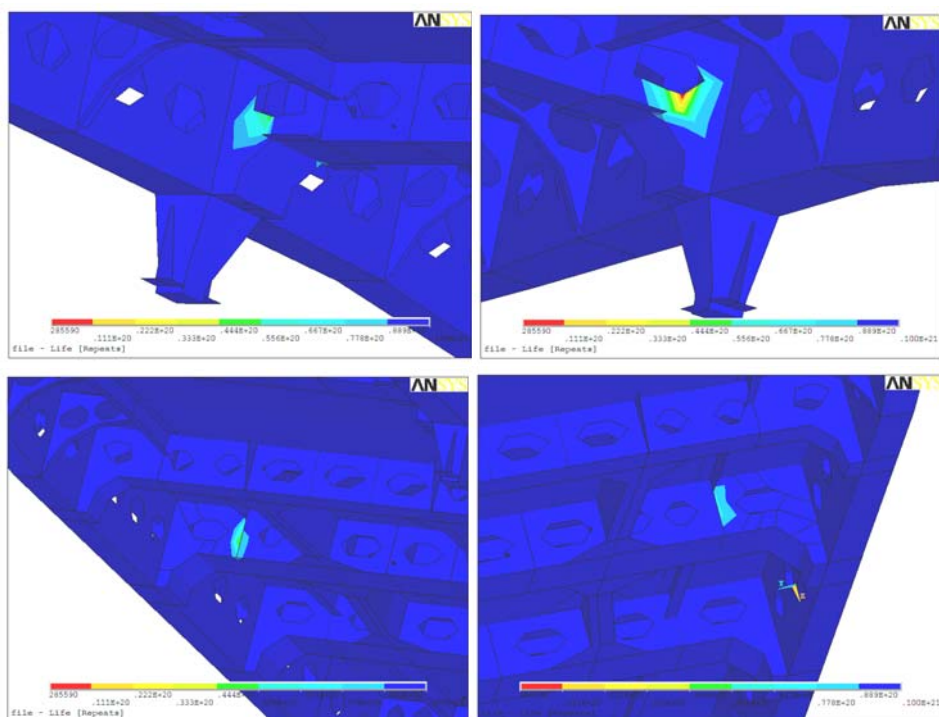
Rys. 2. Model MES ostoji lokomotywy wraz z obciążeniami masowymi MASS21

Badania zmęczeniowe zostały wykonane w programie Fe-Fatigue [9]. Rozpatrywana analiza modelu MES ostoji obejmowała 30 przypadków obciążeń składowych, które były sumowane z użyciem metody superpozycji quasi-statycznej. Obciążenia te pochodzą od wózków trakcyjnych (po 10 sił jednostkowych na każdy wózek), od zespołu prądotwórczego (10 sił jednostkowych). Każdy przypadek obciążenia jest obliczany niezależnie od siebie, a następnie

sumowany. Uzyskane wyniki analizy zapisane są w postaci kumulacyjnej macierzy uszkodzeń dla całego modelu MES.

Analizę badanego obiektu przeprowadzono dla zakresu wysokocyklowego, uwzględniając przebiegi obciążeń uzyskane podczas analizy MBS pojazdu [7]. Obliczenia obejmowały 64 miliony cykli, reprezentujące 29 lat eksploatacji lokomotywy przed modernizacją oraz 45 milionów cykli dla 20 lat eksploatacji po modernizacji.

Rezultatem przeprowadzonej analizy zmęczeniowej jest profil trwałości Z_{II} dla obiektu badań. Wyniki prognozowania trwałości konstrukcji można przedstawić w postaci liczby cykli obciążeniowych, jakie może przetrwać konstrukcja oraz mapy uszkodzeń zmęczeniowych dla modelu MES konstrukcji ostoi. Wyniki dla profilu Z_{II} po modernizacji przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 3 oraz liczbowej w tabeli 1. Dla lokomotywy można także odczytać profil trwałości Z_I przed modernizacją.



Rys. 3. Wyniki analizy numerycznej trwałości zmęczeniowej Z_{II}

Tabela 1. Wyniki prognozowania trwałości konstrukcji Z_{II}

Lp.	Kryterium zmęczeniowe	Prawdopodobieństwo uszkodzenia [%]	Korekcja naprężenia średniego	Minimalna wytrzymałość zmęczeniowa
1	Abs. Max Principle	50	Nie	4.5e7
2	Von Mises	50	Nie	4.5e7
3	Tresca/Shear	50	Nie	4.5e7
4	Signed Von Mises	50	Nie	4.5e7
5	Abs. Max Principle	50	Goodman	4.5e7
6	Von Mises	50	Goodman	4.5e7
7	Tresca/Shear	50	Goodman	4.5e7
8	Signed Von Mises	50	Goodman	4.5e7
9	Abs. Max Principle	50	Gerber	4.5e7
10	Von Mises	50	Gerber	4.5e7
11	Tresca/Shear	50	Gerber	4.5e7
12	Signed Von Mises	50	Gerber	4.5e7

Podsumowanie

W pracy przedstawiono algorytm analizy zmęczeniowej dla zmodernizowanych konstrukcji pojazdów szynowych. Wyznaczony profil trwałości zmęczeniowej Z_{II} uwzględnia eksploatację przed modernizacją, jak i prognozę eksploatacji po modernizacji. Proponowaną metodykę zilustrowano przykładem obliczeniowym dla lokomotywy podlegającej modernizacji. Zaproponowany algorytm obliczeniowy powinien być w przyszłości wykorzystywany dla modernizacji pojazdów szynowych, aby zapewnić ich bezpieczeństwo eksploatacji.

Bibliografia

1. PN-EN 12663:2002, Kolejnictwo – Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych. Polski Komitet Normalizacyjny, 2002.

2. Babeł M., Tułeczki A.: Konstrukcja zmodernizowanej spalinowej lokomotywy manewrowej serii 6Dg, XVIII Konferencja Naukowa – Pojazdy Szynowe, 2008.
3. PN-EN 60300-3-3:2006, Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań – Szacowanie Kosztu Cyklu Życia, Polski Komitet Normalizacyjny, 2006.
4. Tułeczki A., Szkoła M.: Koszt cyklu trwałości LCC jako model decyzyjny modernizacji pojazdów szynowych. XVII Konferencja Naukowa – Pojazdy Szynowe, 2006.
5. Farbaniec Ł., Analiza numeryczna trwałości zmęczeniowej dla modernizowanych pojazdów szynowych, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Krakowska, 2008.
6. Zahavi E., Torbilo V.: Fatigue Design: Life Expectancy of Machine Parts. A Salomon Press book, USA, 1996.
7. Farbaniec Ł., Mrzygłód M., Badania symulacyjne dynamiki pojazdów szynowych podlegających modernizacji, VI Międzynarodowa Konferencja – Quality, Safety and Ecology in Vehicles, 2009.
8. ANSYS, Inc. Theory Reference for ANSYS, 2004.
9. NCode Int. Ltd, The nCode Book of Fatigue Theory, 2000.

Recenzent:
Antoni JOHN

Fatigue life cycle analysis algorithm for modernized railway vehicles

Keywords

Fatigue life cycle analysis, modernization of railway vehicles, safety of railway vehicles

Summary

In the paper an algorithm of fatigue durability analysis of vehicles subjected modernization was proposed. The proposed computational framework of durability analysis is based on utilization a parametric FEM model. Utilization of a common FE model makes possible calculations the cumulative damage matrix of the full life cycle. The practical realization of methodology was illustrated by example of modernization of shunter locomotive. The results obtained show high effectiveness of proposed methodology in assurance of safety of modernized railway vehicles.

