

Tomasz TECHMAŃSKI¹, Krzysztof GOŁOŚ¹

NUMERYCZNA ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA OSTOI TOWAROWEGO WAGONU CZTEROOSIOWEGO 412Ka Z ZASTOSOWANIEM MES

Streszczenie. W niniejszym referacie przedstawiono wyniki obliczeń wytrzymałościowych przeprowadzonych z wykorzystaniem metody elementów skończonych ostoi wagonu czteroosiowego 412Ka. Obliczenia przeprowadzono dla przypadków obciążeń zdefiniowanych wg karty UIC/OSŽD/49 punkt 2.1 - wymagań wytrzymałościowych kolei 1520 mm. Wykonano obliczenia statyki liniowej oraz liniowej utraty stateczności.

NUMERICAL STRENGTH ANALYSIS OF TRUCK FRAME EIGHT WHEEL GOODS WAGON TYPE 412Ka USING FEM

Summary. In this paper were presented computational strength results using FEM of truck frame eight wheel goods wagon type 412Ka. Computations were performed for load cases based on the UIC/OSŽD/49 point 2.1-1520mm Railroad Strength Regulations. Linear static and linear buckling analysis using Finite Element Method was carried out.

1. WSTĘP

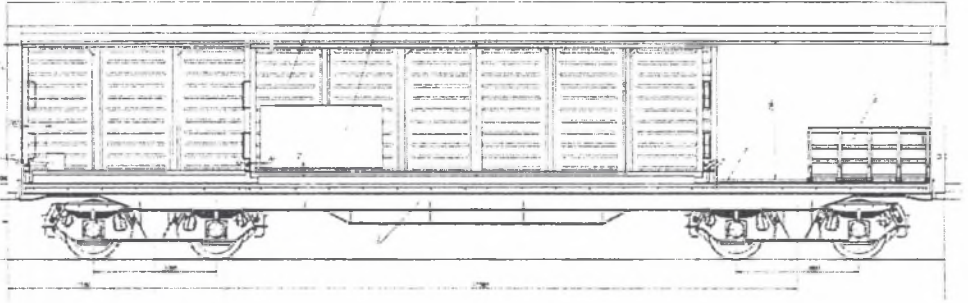
Przedmiotem analizy wytrzymałościowej przedstawionej w tej pracy jest ostoja wagonu czteroosiowego 412Ka modyfikowana w ZNTK Łapy S.A.(rys.1). Głównym celem przeprowadzonej analizy MES było wyznaczenie poziomów naprężeń w modelowanej strukturze ostoi wagonu oraz jej naprężeń krytycznych utraty stateczności.

Obliczenia przeprowadzono dla przypadków obciążeń zdefiniowanych wg karty UIC/OSŽD/49 punkt 2.1 - wymagań wytrzymałościowych kolei 1520 mm.

Obliczenia prowadzono w systemie MSC/ Nastran (wersja 70.5) - Patran (wersja 7.5) na stacji roboczej Silicon Graphics typu Indy (system operacyjny Irix wersja 5.3).

¹ Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska

Ostoja wagonu jest ramą całkowicie metalową, spawaną, której głównymi elementami składowymi są: belka grzbietowa, ostojnice, poprzecznice, podłużnice, belka skrętowa, czołownice, nadbudówki czołownic.



Rys. 1. Szkic wagonu czteroosiowego 412Ka

Fig. 1. Four axis wagons draft

2. OPIS MODELU MES

Dyskretny model obliczeniowy (rys.2) został zbudowany na podstawie dokumentacji technicznej ostoi wagonu czteroosiowego 412Ka.

Z powodu symetrii ostoi wagonu czteroosiowego 412Ka względem dwóch płaszczyzn - poprzecznej i podłużnej, obciążenia ostoi działające symetrycznie lub antysymetrycznie oraz wykonywania obliczeń w teorii małych przemieszczeń: statyki liniowej i liniowej utraty stateczności, zamodelowano 1/4 ostoi wagonu.

W sposób uproszczony zamodelowano następujące elementy struktury ostoi wagonu:

- rejon wprowadzania obciążeń ze sprzęgu samoczynnego w ostojnicy wagonu: oporę przednią oraz oporę tylną.

Założono dostateczną wytrzymałość statyczną tego rejonu konstrukcji wagonu na podstawie projektu i badań przeprowadzonych w Fabryce Urządzeń Mechanicznych KAMAX S.A.

- rejon czopa skrzytu zamodelowano za pomocą elementów sztywnych typu RBE2 [3].

Założono dostateczną wytrzymałość statyczną tego rejonu konstrukcji wagonu na podstawie projektu i badań przeprowadzonych w firmie POMET w Poznaniu,

- rejon wprowadzenia obciążeń w postaci sił skupionych w rejon: opory przedniej, opory tylnej, zderzaka - zamodelowano za pomocą elementów sztywnych typu RBE2 [3].

Elementy składowe konstrukcji ostoi: belka grzbietowa, poprzecznice, podłużnice, belka skrętowa, czołownica, nadbudówka czołownicy zamodelowano poprzez użycie elementów typu QUAD4 [3] (elementy płytowo-powłokowe, czterowęzłowe, posiadające liniową aproksymację przemieszczeń międzywęzłowych).

Struktura modelowanej ostoi wagonu wykonana jest ze stali typu 18G2A. Dla stali 18G2A przyjęto następujące stałe materiałowe wg PN-72/H-84018 [1]:

$$E=2.05e^5 \text{ MPa}, \quad \nu=0.3, \quad Re=360 \text{ MPa}, \quad Rm=450 \text{ MPa}, \quad A=22\%$$

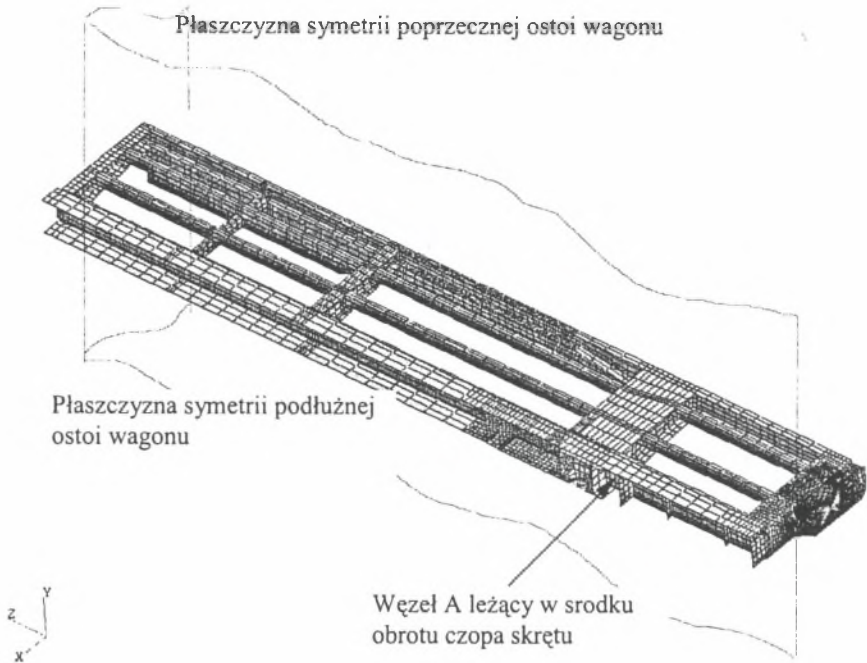
Stal 18G2A do obliczeń przyjęto jako materiał liniowo sprężysty.

W dyskretnym modelu obliczeniowym zdefiniowano 88 właściwości materiałowych.

Model obliczeniowy składa się z:

- 4550 elementów płytowo-powłokowych typu QUAD4,
- 36 elementów płytowo-powłokowych typu TRIA3,
- 3 elementów sztywnych typu RBE2.

Razem 5715 elementów, 5910 węzłów, 29550 stopni swobody,



Rys. 2. Widok dyskretnego modelu obliczeniowego

Fig. 2. Discrete computational model

2.1. Warunki brzegowe

Z powodu symetrii ostoi wagonu czteroosiowego 412Ka względem dwóch płaszczyzn - poprzecznej i podłużnej, obciążenia ostoi działające symetrycznie lub antysymetrycznie oraz wykonywania obliczeń w teorii małych przemieszczeń: statyki liniowej i liniowej utraty stateczności, zamodelowano 1/4 ostoi wagonu.

Analizowano dyskretny model obliczeniowy ostoi dla warunków brzegowych:

- symetrycznych z warunkami brzegowymi uwzględniającymi mocowanie ostoi wagonu do wózka jezdnego poprzez czop skrzętu - *wariant 1*,
- antysymetrycznych z warunkami brzegowymi uwzględniającymi mocowanie ostoi wagonu do wózka jezdnego poprzez czop skrzętu - *wariant 2*.

Obliczenia ostoi wagonu przeprowadzono dla następujących wariantów warunków brzegowych (odebrano odpowiednie stopnie swobody w układzie współrzędnych z rys.2:

a) **wariant 1 (rys. 2):**

- „*sym_podl*” - węzłom w modelu obliczeniowym leżącym w *płaszczyźnie symetrii podłużnej* odebrano stopnie swobody U_x, R_y, R_z ,
- „*sym_0*” - węzłom leżącym w *płaszczyźnie symetrii poprzecznej* odebrano stopnie swobody U_z, R_x, R_y ,
- „*czop*” (rys.2) - węzłowi A odebrano stopnie swobody U_x, U_y ,

b) **wariant 2 (rys. 2):**

- „*anty_sym_podl*” - węzłom w modelu obliczeniowym leżącym w *płaszczyźnie symetrii podłużnej* odebrano stopnie swobody U_x, U_z, R_x ,
- „*anty_sym_0*” - węzłom leżącym w *płaszczyźnie symetrii poprzecznej* odebrano stopnie swobody U_x, U_y, R_z
- „*czop*” (rys. 2) - węzłowi A odebrano stopnie swobody U_x, U_y .

2.2. Obciążenia

Przypadki obciążeń ostoi wagonu dobrano na podstawie karty UIC/OSŽD/49 punkt 2.1 - wymagań wytrzymałościowych kolei 1520 mm. Konstrukcja ostoi wagonu musi być tak ukształtowana, aby wytrzymała bez odkształceń trwałych następujące przypadki obciążeń:

- a) siły osiowe 3000 kN ściskające działające na łożyska ciśnieniowe sprzęgu automatycznego,
- b) siły osiowe 2500 kN rozciągające działające na łożyska ciśnieniowe sprzęgu automatycznego,
- c) siłę ściskającą 1000 kN w osi każdego zderzaka bocznego i 750 kN 50 mm poniżej osi każdego zderzaka bocznego,
- d) siły działające po przekątnej 400 kN w osi zderzaków bocznych.

Obciążenia działające na ostoję wymienione w punktach a, b, c przyjęto jako symetryczne względem płaszczyzny poprzecznej i podłużnej ostoi. Obciążenie opisane w punkcie d rozłożono na część obciążenia symetrycznego 200 kN i symetrycznych warunków brzegowych oraz antysymetrycznego 200 kN i antysymetrycznych warunków brzegowych. Rejony wprowadzenia obciążeń w postaci sił skupionych w rejon: opory przedniej, opory tylnej, zderzaka - zamodelowano za pomocą elementów sztywnych typu RBE2 [3].

3. METODYKA OBLICZEŃ

Konstrukcja ostoi wagonu musi być tak ukształtowana, aby wytrzymała bez odkształceń trwałych następujące przypadki obciążeń (wg *karty UIC/OSŽD/49 punkt 2.1 - wymagań wytrzymałościowych kolei 1520 mm*):

- a) siły osiowe 3000 kN ściskające działające na łożyska ciśnieniowe sprzęgu automatycznego,
- b) siły osiowe 2500 kN rozciągające działające na łożyska ciśnieniowe sprzęgu automatycznego,

- c) siłę ściskającą 1000 kN w osi każdego zderzaka bocznego i 750 kN 50 mm poniżej osi każdego zderzaka bocznego,
- d) siły działające po przekątnej 400 kN w osi zderzaków bocznych.

Jako kryteria wytrzymałościowe dla struktury ostoi wagonu typu 426Sc przyjęto (wg raportu *ERRI B12 RP17, wydanie 8*):

- nieprzekroczenie w żadnym z elementów struktury naprężeń granicy sprężystości materiału rodzimego ($Re=360$ [MPa]) przy poziomie 100% obciążeń dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń [2],
- nieprzekroczenie w żadnym z elementów struktury naprężeń granicy sprężystości materiału w rejonie połączeń spawanych ($Re' =327$ [MPa]) przy poziomie 100% obciążeń dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń [2],
- zastosowano dodatkowe kryterium stateczności: niewystępowanie utraty stateczności w żadnym z elementów struktury do poziomu 100% obciążeń dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

4.1. Wyniki obliczeń statyki liniowej

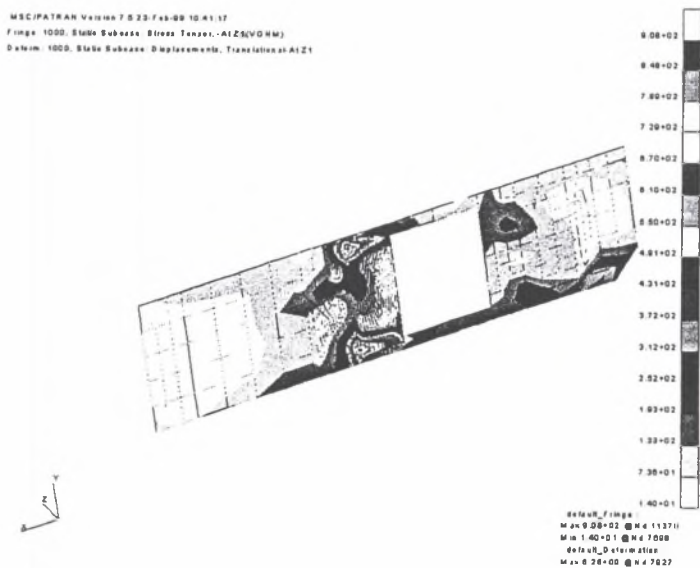
Na podstawie wykonanych obliczeń statyki liniowej ostoi wagonu 412 Ka dla zadanych przypadków obciążenia stwierdzono, że:

- występują lokalne przekroczenia naprężeń Re' w rejonach konstrukcji ostoi, w których nie zostały prawidłowo opanowane zagadnienia załomów dla przypadków obciążeń a, b, c (przykładowy rejon załomu przedstawia rys.3),
- występują lokalne przekroczenia naprężeń Re' w rejonach konstrukcji ostoi wagonu, gdzie wprowadzane są obciążenia prostopadle do powierzchni płyt czołownicy i pasów belki grzbietowej dla przypadków obciążeń c, d (przykładowy rejon wprowadzenia obciążeń skupionych prostopadle do powierzchni płyty przedstawia rys. 4 - widoczne spiętrzenia naprężeń),
- występują lokalne przekroczenia naprężeń Re' w rejonach konstrukcji ostoi wagonu, gdzie następuje lokalne zginanie płyt dla przypadków obciążeń c (przykładowy rejon zginanej płyty przedstawia rys.5).

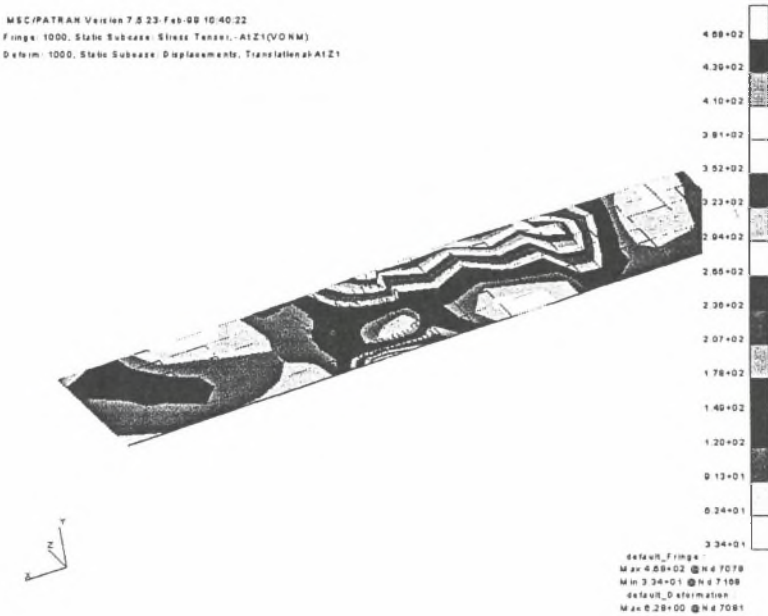
Nie brano pod uwagę rejonów spiętrzeń naprężeń powstałych w miejscu wprowadzenia siły skupionej dla przypadków 3000 kN i 2500 kN. Spiętrzenie naprężeń wystąpiło w rejonie opory tylnej i przedniej sprężgi automatycznego i jest spowodowane uproszczonym sposobem zamodelowania tej strefy konstrukcji poprzez użycie elementów sztywnych typu RBE2 [3].



Rys. 3. Rejon załomu - połączenie ścianki dolnej czołownicy z pasem dolnym ostojnicy. Rozkład naprężeń zredukowanych wg Hubera-Misesa [MPa]
 Fig.3. Refraction vicinity- Von Mises stress distribution [MPa]



Rys. 4. Ścianka przednia czołownicy. Rozkład naprężeń zredukowanych wg Hubera-Misesa [MPa]
 Fig. 4. Front wall of buffer beam- Von Mises stress distribution [MPa]



Rys. 5. Ścianka górna czołownicy. Rozkład naprężeń zredukowanych wg Hubera-Misesa [MPa]
 Fig. 5. Upstairs wall of buffer beam- Von Mises stress distribution [MPa]

4.2. Obliczenia liniowej utraty stateczności

Zagadnienie utraty stateczności sprężystej ustroju można sprowadzić do algebraicznego, uogólnionego zagadnienia wartości własnych i wektorów własnych:

$$\left([K] - \lambda \cdot [K_g] \right) \cdot \{q\} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

$[K]$ - globalna macierz sztywności elementów,

$[K_g]$ - macierz naprężeń początkowych,

λ_i - wartość własna.

Każda wartość własna λ_i jest wartością krytyczną stanu naprężeń, a w konsekwencji i obciążenia zewnętrznego. Każdej wartości krytycznej odpowiada określona postać wybożenia zdeterminowana przez wektor własny $\{q\}_i$. Wartości własnych i wektorów własnych jest tyle, ile w ustroju wyodrębnionych było stopni swobody ($i=1,2,\dots,n$). W celu rozwiązania zagadnienia (1) użyto numerycznej procedury Lanczosa.

Obciążenie krytyczne wyznaczono z zależności:

$$P_{kr} = \lambda_i * P_{dop} \quad (2)$$

gdzie:

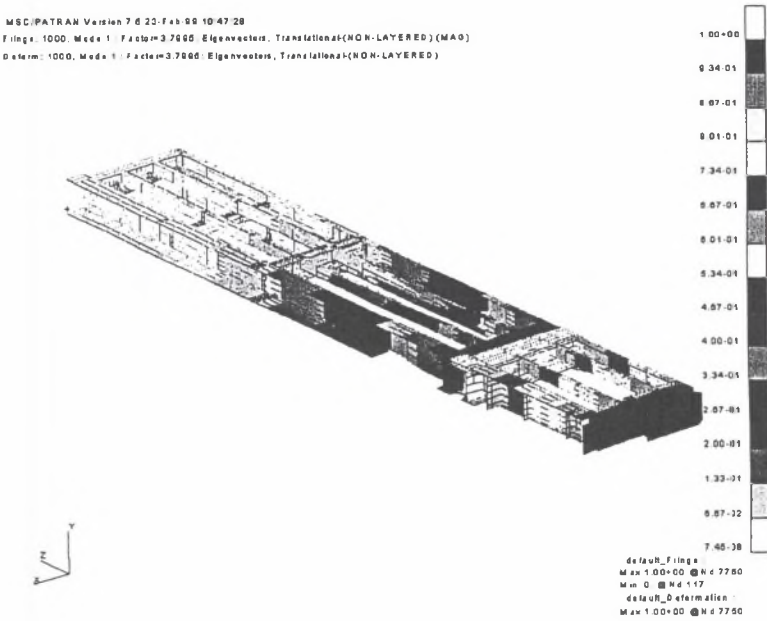
P_{kr} - obciążenie krytyczne,

P_{dop} - obciążenie dopuszczalne.

Analizowano pierwszych dziesięć postaci utraty stateczności dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń.

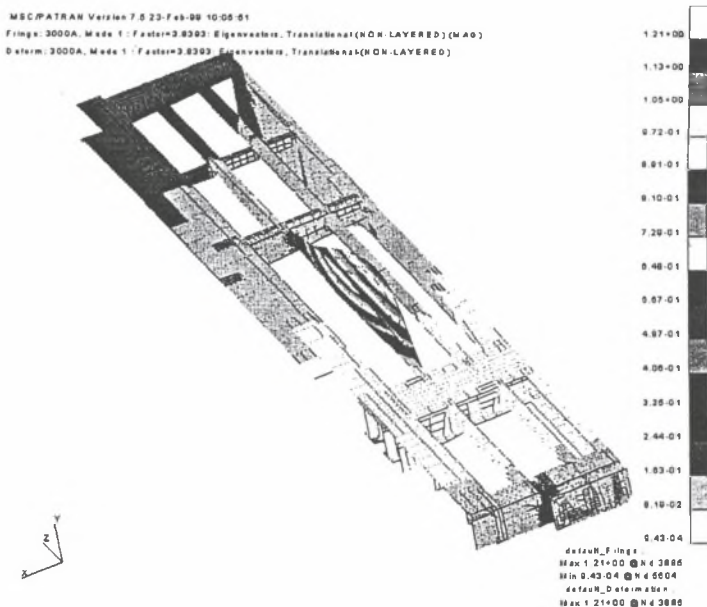
W konstrukcji ostoi wagonu nie występuje utrata stateczności przed osiągnięciem dopuszczalnego obciążenia dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń. Na rysunkach rys. 6 i 7 przykładowo przedstawiono postacie utraty stateczności dla przypadku 1000 kN – globalną i lokalną (podłużnica ostoi wagonu) dla przypadku 3000 kN.

W konstrukcji ostoi wagonu nie występuje utrata stateczności przed osiągnięciem dopuszczalnego obciążenia dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń.



Rys. 6. Postać globalna utraty stateczności dla przypadku 1000 kN

Fig. 6. Buckling global mode for load case 1000 kN



Rys. 7. Postać lokalna utraty stateczności dla przypadku 3000 kN
 Fig. 7. Buckling local mode for load case 3000 kN

5. WNIOSKI Z WYKONANYCH OBLICZEŃ

Na drodze obliczeń numerycznych MES wykazano, że konstrukcja ostoi wagonu czterosiowego 412 Ka nie spełnia kryteriów wytrzymałościowych dla zadanych przypadków obciążeń wg karty UIC/OSŻD/49, punkt 2.1 - wymagań wytrzymałościowych kolei 1520 mm.

Przeprowadzona analiza stateczności konstrukcji ostoi wykazała, że w konstrukcji ostoi wagonu nie występuje utrata stateczności przed osiągnięciem dopuszczalnego obciążenia dla każdego z rozpatrywanych przypadków obciążeń.

Wykorzystując wyniki analizy wytrzymałościowej przeprowadzono modyfikacje rejonów konstrukcji z przekroczonymi poziomami naprężeń do stanu, w którym ostoja wagonu spełnia warunki wytrzymałościowe omówione w referacie.

Literatura

1. Polska Norma - PN-72/H-84018.
2. Raport ERRI B12 RP17 wydanie 8.
3. „MSC/Nastran quick reference guide” Kevin Kilroy.

Abstract

In this paper were presented computational strength results using FEM of truck frame eight wheel goods wagon type 412Ka. Computations were performed for load cases based on the UIC/OSŽD/49 point 2.1-1520mm Railroad Strength Regulations. Linear static and linear buckling analysis using Finite Element Method was carried out.