

Marek SITARZ, Krzysztof BIZOŃ

OBLICZENIA NUMERYCZNE KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. Metoda elementów skończonych jest najbardziej rozpowszechnioną metodą obliczeń wytrzymałościowych kół kolejowych zestawów kołowych. Pozwala ona analizować koła o złożonej geometrii, poddane obciążeniom termicznym, obciążeniom w postaci sił skupionych, obciążeniom pochodzącym od wzajemnego oddziaływania układu koło – oś (wcisk), a także obciążeniom wynikającym z sił bezwładności i grawitacji. Autorzy pracy przeprowadzili obliczenia wytrzymałościowe kół kolejowych zestawów kołowych za pomocą metody elementów skończonych, a następnie dokonali porównania wyników analizy numerycznej z wynikami pomiarów tensometrycznych deformacji koła. Zadowolające autorów wyniki porównania były podstawą do przeprowadzenia zaawansowanej analizy strukturalnej i termicznej nowych konstrukcji kół kolejowych zestawów kołowych.

NUMERICAL CALCULATIONS RECKONINGS OF RAILWAY WHEEL SETS WITH FINITE ELEMENTS METHOD

Summary. Finite Element Method is the most popular method of the structural and thermal calculations of the rail sets wheel. It allows to analyze the wheels with their complicated geometry, which are given up thermal loads, concentrated forces, initial displacements, gravital and centrifugal loads. The authors of the paper made structural calculations of wheels of rail wheel-sets with the help of finite elements method, and later compared the analysis results with tensometers measurements of wheel deformation. Finite elements method has been used by the authors for structural and thermal calculations and find new constructions of rail sets' wheels.

1. WPROWADZENIE

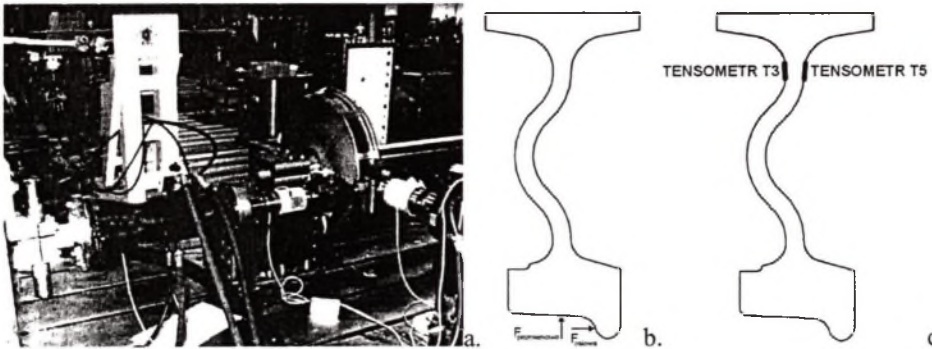
Metoda elementów skończonych jest najbardziej rozpowszechnioną metodą obliczeń wytrzymałościowych kół kolejowych zestawów kołowych. Pozwala ona analizować koła o złożonej geometrii, poddane obciążeniom termicznym, obciążeniom w postaci sił skupionych, obciążeniom pochodzącym od wzajemnego oddziaływania układu koło – oś (wcisk), a także obciążeniom wynikającym z sił bezwładności i sił grawitacji. Jednakże wykorzystanie metody elementów skończonych bazującej na procedurach obliczeń przybliżonych powoduje otrzymanie wyników obarczonych błędem. Również geometryczne odwzorowanie obiektu rzeczywistego, które jest jednym z etapów tworzenia modelu

obliczeniowego, bywa niedokładne. Wyniki obliczeń numerycznych dokonanych metodą elementów skończonych mogą być obciążone błędami, których wartość może mieć duży wpływ na końcową ocenę i wnioski wypływające z przeprowadzonej analizy. Niezbędna staje się weryfikacja otrzymanych wyników obliczeń numerycznych. Najbardziej rozpowszechnioną metodą weryfikacji obliczeń numerycznych prowadzonych metodą elementów skończonych są pomiary tensometryczne.

Autorzy pracy przeprowadzili obliczenia deformacji kół kolejowych zestawów kołowych za pomocą metody elementów skończonych, a następnie dokonali weryfikacji wyników analizy numerycznej porównując je z wynikami pomiarów tensometrycznych deformacji koła. Kolejnym etapem pracy było prowadzenie analizy termicznej i strukturalnej koła kolejowego zestawu kołowego. Analiza prowadzona była z wykorzystaniem programu do analizy metodą elementów skończonych Cosmos 2.6 [1].

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

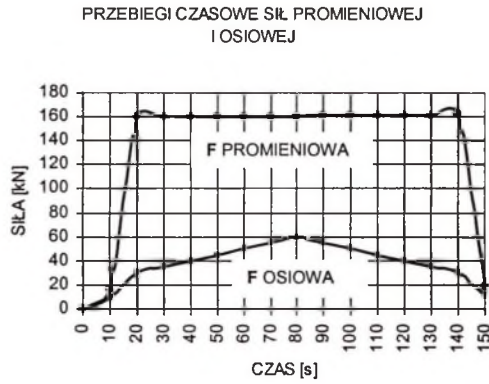
Autorzy opracowania dysponowali wynikami tensometrycznych pomiarów deformacji koła kolejowego, przeprowadzonymi we współpracy z zakładami Bonatrans a.s. Bohumin w Czechach [2]. Podczas badań koło obciążano jednocześnie siłą promieniową i osiową (rys.1a, 1b.) w czasie 150 sekund. Maksymalne, ustalone wartości sił wynosiły odpowiednio: siła osiowa 60 kN, siła promieniowa 160 kN (rys.2). Maksymalne, ustalone wartości siły promieniowej i siły osiowej zostały przyjęte w drugim etapie badań, podczas prowadzenia analizy strukturalnej koła metodą elementów skończonych. Do porównania wyników badań doświadczalnych z wynikami analizy numerycznej MES wybrano wartości deformacji zmierzone tensometrami T3 i T5 umieszczonymi promieniowo po obu stronach tarczy koła (rys.1c).



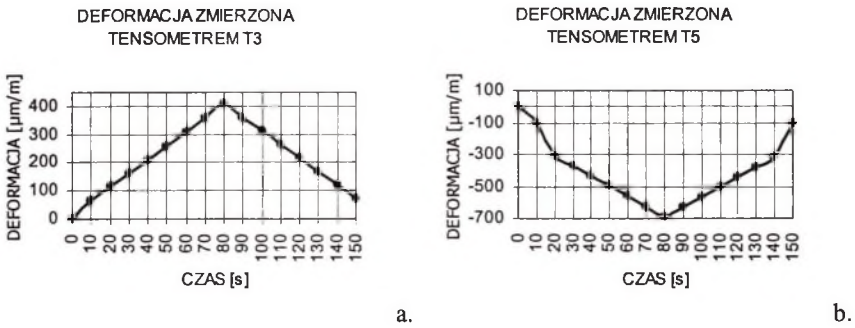
Rys.1. a – stanowisko do dokonywania pomiarów tensometrycznych deformacji kół kolejowych zestawów kołowych (Bonatrans a.s. Bohumin, Czechy), b – schemat obciążenia koła, c – schemat naklejenia tensometrów

Fig.1. a – place to making of tensometer measurements of deformation of wheels of railway wheel sets (Bonatrans and.s. Bohumin, Czech Republic), b – diagram of burden wheels, c – diagram of sticking of tensometers

Maksymalne zmierzone wartość deformacji promieniowej tarczy koła po stronie wewnętrznej (tensometr 3 – T3) i po stronie zewnętrznej (tensometr 5 – T5) wynosiły odpowiednio: strona zewnętrzna (tensometr 3 – T3) 412 $\mu\text{m}/\text{m}$ (rys. 3a), strona wewnętrzna (tensometr 5 – T5) - 695 $\mu\text{m}/\text{m}$ (rys.3b).



Rys. 2. Przebiegi czasowe sił obciążających koło na stanowisku badawczym
Fig. 2. Time courses of burdening strengths wheel on experimental place



Rys. 3. Przebiegi czasowe deformacji koła zestawu kołowego zmierzone na stanowisku badawczym: a – deformacja tarczy koła w miejscu naklejenia tensometru T3 (strona zewnętrzna koła), b – deformacja tarczy koła w miejscu naklejenia tensometru T5 (strona wewnętrzna koła)

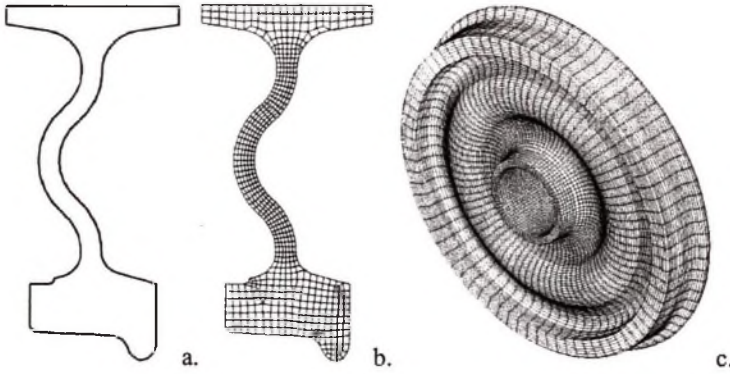
Fig.3. Time courses of deformation of circular measured of wheel set on experimental place: a – deformation of shield of wheel in place of sticking of tensometer T3 (external side of wheel), b – deformation of shield of wheel in place of sticking of tensometer T5 (internal side of wheel)

3. WSTĘPNA ANALIZA MES

Na podstawie dokumentacji stworzona została geometria połowy poprzecznego przekroju koła (rys.4a). W początkowej fazie tworzenia modelu dyskretnego koła użyto elementu skończonego typu *shell* i dokonano dyskretyzacji stworzonego modelu geometrycznego połowy przekroju poprzecznego koła (rys.4b) [3, 4].

Następna faza tworzenia przestrzennego modelu dyskretnego koła polegała na generacji geometrii (punkty, linie, powierzchnie) i siatki elementów skończonych poprzez obrót modelu

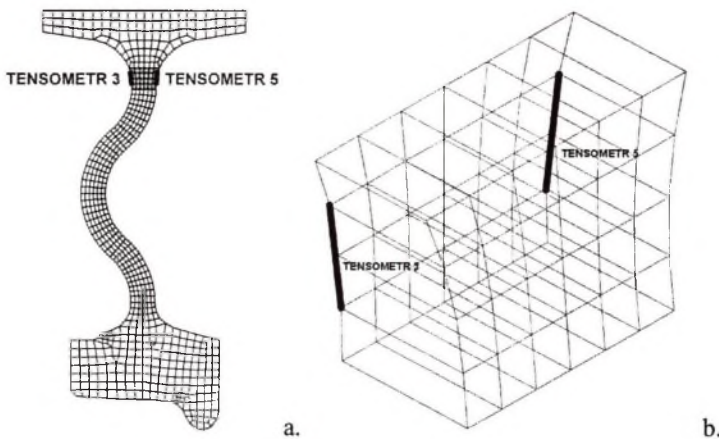
geometrycznego i dyskretnego połowy przekroju poprzecznego koła wokół osi obrotu koła. Z elementów typu *shell* wygenerowane zostały elementy typu *solid* (rys.4c).



Rys.4. a – model fizyczny połowy przekroju poprzecznego koła kolejowego, b – model dyskretny 2D koła, c – model dyskretny 3D koła

Fig.4. a – physical model of half cross section of wheel, b – two dimensions FEM model of cross-section of the wheel, c – three dimensions model of the wheel

Model dyskretny koła podparto w miejscach styku piasty koła z osią kolejowego zestawu kołowego, odbierając w węzłach leżących na powierzchni styku wszystkie stopnie swobody [5]. W pierwszym etapie obliczeń obciążenie koła kolejowego zestawu kołowego stanowiły dwie siły skupione (pionowa i pozioma) odpowiadające statycznemu oddziaływaniu w układzie szyna – koło (rys. 1b). Na etapie tworzenia przestrzennego modelu dyskretnego koła autorzy wzięli pod uwagę miejsca naklejenia tensometrów na obiekcie rzeczywistym i tak zbudowali siatkę elementów skończonych, aby krawędzie wybranych elementów odpowiadały długości i miejscom naklejenia tensometrów na kole (rys.5a, 5b).

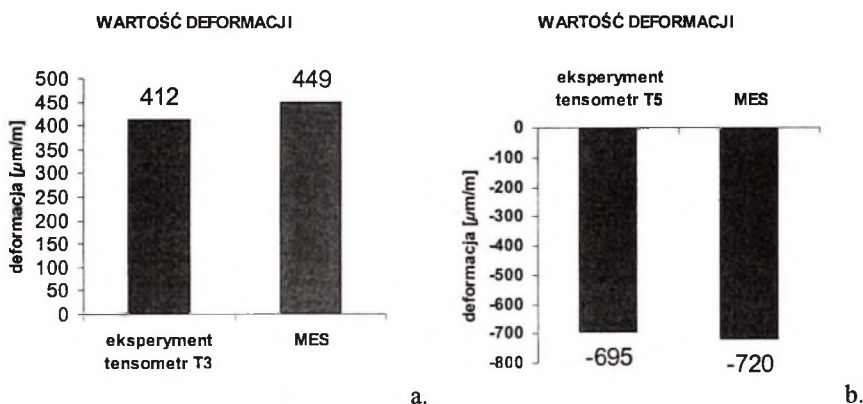


Rys. 5. a – schemat rozmieszczenia tensometrów, b – schemat rozmieszczenia tensometrów – fragment

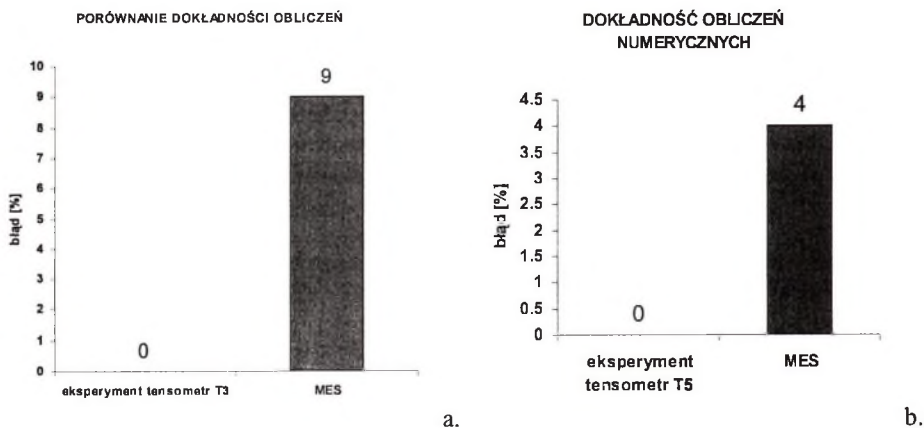
Fig.5. a – diagram of distributions of tensometers, b – diagram of distribution of tensometers – fragment

4. PORÓWNANIE WYNIKÓW WSTĘPNEJ ANALIZY MES Z WYNIKAMI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Porównano wartości deformacji obiektu rzeczywistego uzyskane w wyniku przeprowadzenia badań doświadczalnych z wartościami deformacji krawędzi elementów skończonych modelu MES. Położenie i wymiary krawędzi elementów skończonych, których deformację wyznaczono numerycznie, odpowiadało miejscom naklejenia tensometrów na obiekcie rzeczywistym i ich wymiarom (rys.5a i 5b). Porównanie wartości deformacji uzyskanych z przeprowadzonej analizy strukturalnej modeli numerycznych koła i wartości deformacji uzyskanych w wyniku przeprowadzenia badań doświadczalnych (rys.6) pozwoliło na wyznaczenie względnego błędu wyników analizy numerycznej w odniesieniu do wyników pomiarów tensometrycznych (rys.7). Wyznaczono deformację po stronie włókien ściskanych (tensometr 3) i po stronie włókien ściskanych (tensometr 5).



Rys.6. Porównanie wartości deformacji wyznaczonej doświadczalnie i numerycznie
 Fig.6. Comparison of value of deformation appointed eksperymental and numerical



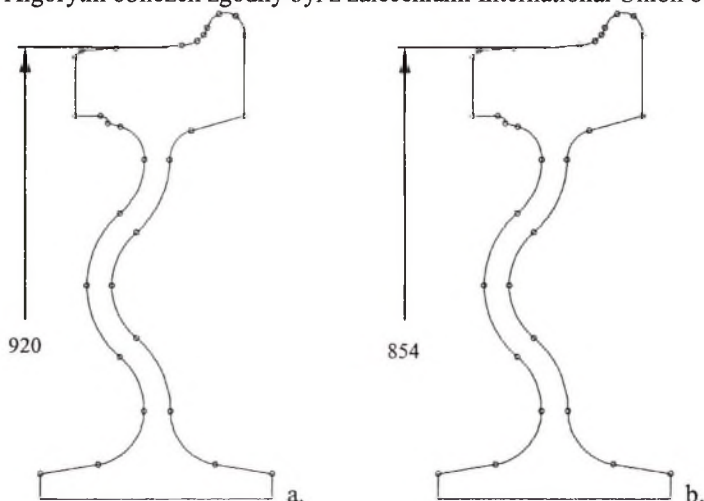
Rys.7. Błąd względny obliczeń numerycznych w odniesieniu do wyników pomiarów tensometrycznych
 Fig.7. Relative mistake of numeric calculations in refer to tensometer results of measurements

Przeprowadzona analiza strukturalna koła kolejowego zestawu kołowego pozwoliła na wyznaczenie deformacji tarczy koła i porównanie wartości deformacji otrzymanych drogą obliczeń numerycznych z wartościami deformacji otrzymanymi doświadczalnie drogą pomiarów tensometrycznych. Błąd względny wyników obliczeń numerycznych odniesionych do wyników badań doświadczalnych wynosił od 4 do 9 procent. Na podstawie dobrej zgodności wyników analizy strukturalnej z wynikami badań doświadczalnych wnioskować można, że model MES odpowiada obiektowi rzeczywistemu. Stworzony model MES poddany został zaawansowanej analizie strukturalnej i nieliniowej analizie termicznej, które będą uwzględniały oddziaływania dynamiczne w układzie szyna – koło, siły bezwładności, siły pochodzące od naprasowania koła na oś kolejowego zestawu kołowego, nieliniowe własności materiałowe zależne od temperatury.

5. ZAAWANSOWANA ANALIZA MES

Na obciążenia koła składały się siły skupione pochodzące od wzajemnego oddziaływania układu szyna - koło, obciążenia grawitacyjne, obciążenia pochodzące od sił bezwładności powstających podczas toczenia się koła. Uwzględniono również obciążenia termiczne powstające na skutek tarcia klocków hamulcowych o koło wagonu podczas hamowania. Oprócz obciążeń termicznych w postaci strumienia ciepła uwzględniono również odpływ ciepła do otoczenia w postaci konwekcji. Odpływający strumień ciepła był nieliniową funkcją temperatury. Analiza termiczna koła wagonu wymagała zdefiniowania następujących własności materiałowych: gęstość, współczynnik przewodnictwa cieplnego, ciepło właściwe. Wartości każdej z wyżej wymienionych własności były nieliniowymi funkcjami temperatury. Aby przeprowadzić analizę strukturalną, własności materiałowe należało uzupełnić o moduł sprężystości podłużnej, współczynnik Poissona i współczynnik rozszerzalności cieplnej. Również te własności materiałowe były nieliniowymi funkcjami temperatury [6,7].

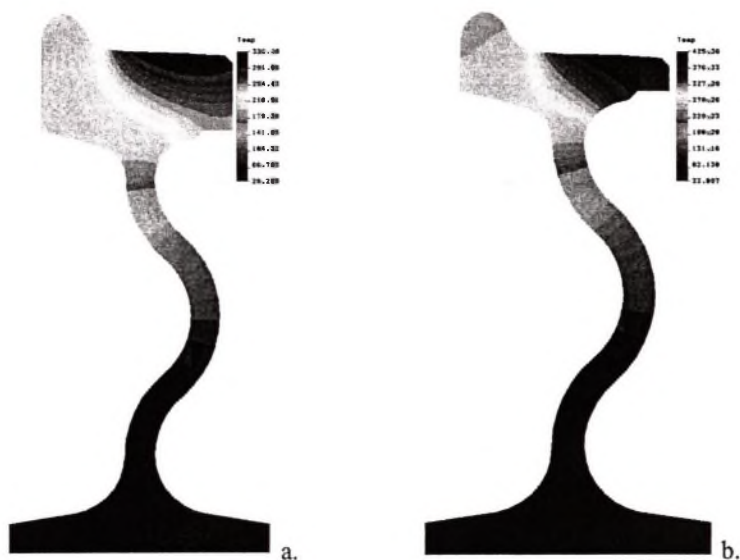
Analizie poddano koło wagonowe typu 920/185s. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów wymiarowych traktując koło jako fabrycznie nowe i jako zużyte (PN-92/K-91019) (rys.8). Algorytm obliczeń zgodny był z zaleceniami International Union of Railways.



Rys. 8. Dwa warianty wymiarowe koła kolejowego (PN-92/K-91019): a – koło fabrycznie nowe, b – koło zużyte

Fig. 8. Two variants of dimension railway wheel (PN-92/K-91019): a – new wheel, b – used wheel

Poniżej dla przykładu przedstawiono porównanie map temperatur dla koła fabrycznie nowego i zużytego po procesie hamowania trwającym 1200 sekund. Przykładowe mapy przedstawiają rozkład temperatur w kole wagonowym po hamowaniu trwającym 1200 s (rys.9).



Rys. 9. Mapy rozkładu temperatur: a – dla koła nowego (max. temp. 329°C), b – dla koła zużytego (max. temp. 425°C)

Fig. 9. Charts of temperature: a – for new wheel (max. temp. 329 °C), b – for used wheel (max. temp. 425 °C)

6. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza strukturalna koła kolejowego zestawu kołowego pozwoliła na wyznaczenie deformacji tarczy koła i porównanie wartości deformacji otrzymanych drogą obliczeń numerycznych z wartościami deformacji otrzymanymi doświadczalnie drogą pomiarów tensometrycznych. Błąd względny wyników obliczeń numerycznych odniesionych do wyników badań doświadczalnych wynosił od 4 do 9 procent. Na podstawie dobrej zgodności wyników analizy strukturalnej z wynikami badań doświadczalnych wnioskować można, iż stworzony model numeryczny dobrze odpowiada obiektowi rzeczywistemu. Model MES poddany został zaawansowanej analizie strukturalnej i nieliniowej analizie termicznej, które będą uwzględniały oddziaływania dynamiczne w układzie szyna – koło, siły bezwładności, siły pochodzące od naprasowania koła na oś kolejowego zestawu kołowego, nieliniowe własności materiałowe zależne od temperatury.

Zastosowany przez autorów parametryczny sposób budowy modelu pozwala na łatwe i szybkie poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych (kształt przekroju poprzecznego) kół kolejowych zestawów kołowych. Parametryzacja modelu geometrycznego i wykorzystanie pliku wsadowego pozwala szybko i skutecznie ocenić jakościowy i ilościowy wpływ zmian geometrii koła na wartości maksymalne temperatury, naprężeń i odkształceń koła. W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano kolorowe mapy rozkładu temperatur, kolorowe mapy naprężeń i deformacji koła wagonowego.

Literatura

1. Rusiński E. Metoda elementów skończonych. System Cosmos/M. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1994.
2. Śładkowski A., Bizoń K., Chruzik K.: Porównanie wyników analizy mes z wynikami pomiarów tensometrycznych deformacji kół kolejowych zestawów kołowych. XLI Sympozjon „Modelowanie w mechnice”, Wisła 2002.
3. Сладковский А.В., Шмурыгин Н.Д.: К вопросу точности определения НДС железнодорожных колес при помощи МКЭ / XVIII Международная конференция. Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов. С. 163 – 168. Санкт – Петербург 2000.
4. Sitarz M., Śładkowski A.W., Chruzik K.: Analysis of calculation errors in FEM (Final Elements Method). 42nd International Scientific Conference Riga 2001. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Transport and Engineering, Serija 6, Sejums 4, “RTU”, Riga 2001, p. 76 – 83.
5. Śładkowski A. W, Chruzik K.: Zastosowanie metod numerycznych do analiz wytrzymałościowych połączenia montażowego koło – oś. XL sympozjon PTMTS „Modelowanie w mechnice” Streszczenia referatów. Wisła, Poland 2001, s. 241 - 242.
6. Sitarz M., Bizoń K., Chruzik K.: Numerical calculations reckonings of railway wheel sets 42nd International Scientific Conference Riga 2001. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Transport and Engineering, Serija 6, Sejums 4, “RTU”, Riga 2001 p. 84 – 89.
7. Sitarz M, Śładkowski A. W, Bizoń K.: Расчет термических напряжений в железнодорожных колесах при их длительном торможении. 2nd International Conference Research and development in mechanical industry RaDMI 2002, September 2002, Vrnjacka Banja, Yugoslavia, p. 686-692.

Praca wykonana w ramach BK-243/RM10-4/2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Piec

Abstract

Finite Element Method is the most popular method of the structural and thermal calculations of the rail sets wheel. Usage of finite elements method on approximate calculating procedures causes receiving mistake results. The verification of numeric calculations with received in research results is necessary. Tensometers measurements are the most popular method of structural numeric calculations verification. The authors of the paper made structural calculations of wheels of rail wheel-sets with the help of finite elements method, and later compared the analysis results with tensometers measurements of wheel deformation.

The used parametric method of the model creating proposed by authors allows to investigate the new constructions of wheel very quickly and conveniently. The parametric geometric model and the log file usage allows to investigate the influence of the geometric changes for maximal indexes of temperature, deformation and stress of wheel. After the analysis the color charts of the temperature, stress and deformation of the new and used wheel has been get as the results of the authors' research.