

Marek SITARZ, Katarzyna CHRUZIK
Katedra Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach

CERTYFIKACJA PROJEKTOWANIA I OBLICZEŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH ELEMENTÓW POJAZDÓW SZYNOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD NUMERYCZNYCH

Streszczenie. Korzyści, jakie daje standaryzacja w działalności gospodarczej - szczególnie w produkcji, są oczywiste. Trudno sobie wyobrazić wytwarzanie na skalę masową złożonych wyrobów bez stosowania norm. Problem ten dotyczy również procesu projektowania wyrobu. Duża liczba producentów wytwarzających elementy na kolejowy rynek europejski wymusza stworzenie ujednoczonych metod projektowania numerycznego. Mając na uwadze fakt, że 25 lat temu badania doświadczalne pojazdów szynowych i ich elementów stanowiły około 95%, a badania numeryczne około 5% oraz przewidując, że za 10 lat badania symulacyjne i wytrzymałościowe z wykorzystaniem metod numerycznych będą stanowiły około 90%, należy się zastanowić - podobnie jak dla metod doświadczalnych - nad ich certyfikacją. Może to być związane z certyfikacją oprogramowania jak również centrów badawczych.

CERTIFICATION OF DESIGNING AND CALCULATIONS OF RAILWAY VEHICLES ELEMENTS WITH USING THE NUMERICAL METHODS

Summary. Advantages arising from standardisation and certification in economic activity and in particular in manufacture are plain. It is difficult to imagine large-scale production without any standards. This is also true in case of construction, both in the design and prototype testing stage. The number of manufacturers present at European market brings about the need for creation of unified numerical design methods. Keeping in mind that 25 years ago the experimental tests of rail vehicles constituted c. 95 percent and numerical tests c. 5 % of total testing, and anticipating that in 10 years simulation and strength testing using numerical methods will probably constitute 90% of total testing, the need for certification of numerical methods becomes obvious. The several issues here are certification of software and R&D centres.

1. WSTĘP

Certyfikacja procesu projektowania jest ściśle związana ze standaryzacją transportu kolejowego w Unii Europejskiej. Standaryzacja polega na wprowadzaniu standardów, czyli norm, modeli lub wzorców do określonego procesu - w interesującym nas przypadku dla transportu szynowego. Oznacza to, z jednej strony, ujednoczenie, a z drugiej określenie

poszczególnych etapów projektowania ma prowadzić do porównywalnych efektów (wyników), np. podczas procesu analiz numerycznych. Jest to wyzwanie spowodowane postępującą globalizacją współczesnego świata, w tym globalizacją transportu szynowego. Aby ujednoczyć obliczenia wytrzymałościowe, trzeba przyjąć pewien poziom odniesienia - właśnie standard, czyli normę odnoszącą się do wyróżnionych elementów. W dalszej kolejności cele globalne (np. projektowanie kół kolejowych), czyli ogólne, transformowane są w cele pośrednie i szczegółowe (np. tworzenie algorytmów analizy poszczególnych sił obciążających koło kolejowe).

Korzyści, jakie daje standaryzacja (normalizacja) w działalności gospodarczej - szczególnie w produkcji, są oczywiste. Trudno sobie wyobrazić wytwarzanie na skalę masową złożonych wyrobów bez stosowania norm. Problem ten dotyczy również procesu projektowania wyrobu (zarówno na etapie badań numerycznych, jak i testowania prototypu). Duża liczba producentów wytwarzających elementy na kolejowy rynek europejski wymusza stworzenie ujednoczonych metod projektowania numerycznego.

Mając na uwadze fakt, że 25 lat temu badania doświadczalne pojazdów szynowych i ich elementów stanowiły około 95%, a badania numeryczne około 5% oraz przewidując, że za 10 lat badania symulacyjne i wytrzymałościowe z wykorzystaniem metod numerycznych będą stanowiły około 90%, należy się zastanowić - podobnie jak dla metod doświadczalnych - nad ich certyfikacją. Może to być związane z certyfikacją oprogramowania jak również centrów badawczych.

2. DOKŁADNOŚĆ BADAŃ NUMERYCZNYCH I DOŚWIADCZALNYCH

Wobec coraz powszechniejszego stosowania metod numerycznych w obliczeniach wytrzymałościowych dla kół kolejowych zestawów kołowych (BONATRANS, LUCCHINI, KLW WHEELCO, GRIFFIN, VALDUNES) i opierania na ich wynikach różnorodnych decyzji technicznych i ekonomicznych, znaczenia nabiera wiarygodność tych wyników.

W szczególności ważne jest, jakie błędy zawierają te obliczenia i w jaki sposób można je sprowadzić do przyjętych tolerancji. Różne są źródła błędów obliczeń komputerowych, np. w przygotowaniu bazy danych, w programowaniu i oprogramowaniu. Tego rodzaju błędy są możliwe do wykrycia i usunięcia. Jednakże błędy wynikające z procedur budowy modelu obliczeniowego, tak zwane błędy dyskretyzacji, nie mogą być całkowicie usunięte. Od lat prowadzone są intensywne badania, np. takie, w wyniku których opracowano metody szacowania błędów dyskretyzacji oraz techniki określania miejsc występowania i ograniczania ich wartości [1].

Podkreślając możliwości i przydatność MES, należy zwrócić uwagę na konieczność bardzo przemyślanego i rozważnego stosowania tej metody. Jest ona metodą przybliżoną. Jej wyniki odnoszą się nie do rzeczywistych układów konstrukcyjnych, ale do ich modeli. Występuje więc różnica między realnym problemem a wynikami obliczeń przeprowadzonymi na jego modelu

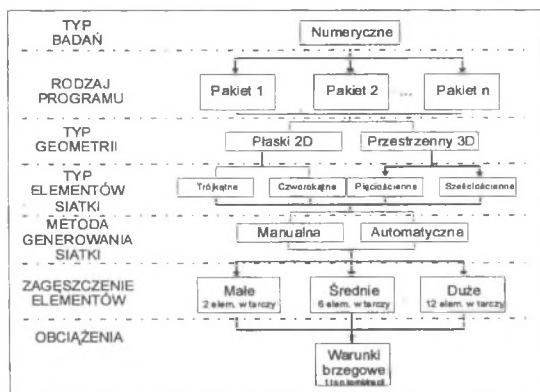
Metoda elementów skończonych jest metodą przybliżoną. Zakładając, że w programie nie ma błędów ukrytych i realizuje on obliczenia w sposób poprawny, pozostają jeszcze błędy wynikające z procedur budowy modelu obliczeniowego MES, czyli tzw. błędy dyskretyzacji. Są one specyficzną cechą metody i nie mogą być całkowicie usunięte. W trakcie analiz komputerowych występują również błędy zaokrąglenia wyniku zależne od procesora.

Mnogosc możliwych kombinacji analizy numerycznej dla tego samego elementu konstrukcyjnego nie pozwala obecnie na porównanie wyników tych badań. Standaryzacja procesu projektowania elementów pojazdów (w tym również elementów pojazdów szynowych np. kolejowych zestawów kołowych) wymusza znalezienie określonych

wymogów również dla tego zjawiska, a następnie jego certyfikacje zarówno pod względem tworzonego modelu, pakietu oprogramowania, jak i czynnika ludzkiego. Certyfikacja powinna więc obejmować całe jednostki badawcze zajmujące się projektowaniem elementów pojazdów. Uściślenie całego etapu projektowania, w tym również obliczeń numerycznych, pozwoli na porównywalność wyników uzyskanych w różnych jednostkach badawczych.

W obecnej chwili nie określono jednoznacznie żadnych czynników wpływających na wartość wyniku dla modelu wygenerowanego w programie komputerowym. Na rysunku 1 pokazano na przykładzie koła kolejowego możliwe kombinacje doboru niektórych czynników wpływających na wynik analizy. Każda „droga analizy numerycznej” niesie za sobą wygenerowanie modelu, z którego uzyskujemy inne wyniki nawet przy zastosowaniu tych samych elementów brzegowych (np. punktów i wartości przyłożenia sił i podpór charakteryzujących dane zjawisko).

Dodatkowo nieokreślenie szczegółowo w aktach normatywnych modelu zjawisk charakteryzujących obciążenia wynikające z produkcji i eksploatacji elementów konstrukcyjnych całkowicie eliminuje możliwość porównywania analiz przeprowadzanych obecnie.



Rys. 1. Kombinacje czynników wpływających na wynik analizy numerycznej
Fig. 1. Combinations of factors influencing numerical analysis results

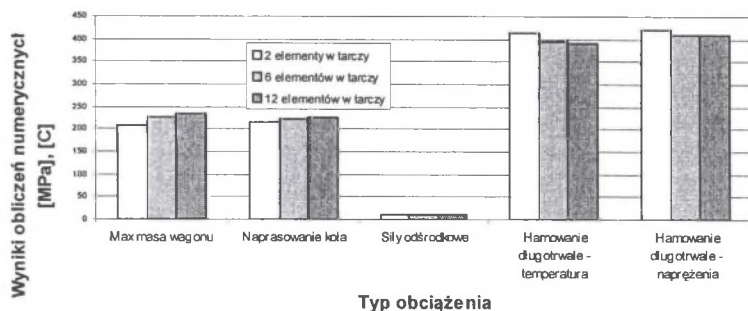
Z analizy obliczeń wytrzymałościowych [2] wynika, że minimalna liczba elementów wzdłuż przekroju poprzecznego tarczy koła powinna wynosić 6. W celu potwierdzenia zaproponowanego zagęszczenia modelu zbadano koło PN920/185_s dla trzech zagęszczeń siatki: 2 elementy, 6 elementów, 12 elementów w tarczy.

Przeprowadzona analiza wykazała, że przy siatce najbardziej zgrubnej różnica wyniku w stosunku do siatki modelowej (6 elementów) wyniosła maksymalnie 20 MPa. Podwójne zagęszczenie elementów nie wykazało już tak dużego wpływu na wyniki obliczeń (max 7 MPa), jednak czas analizy w przypadku siatki bardzo złożonej zwiększył się 9-krotnie. Wyniki porównania zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1
Analiza wpływu gęstości siatki na dokładność i czas obliczeń

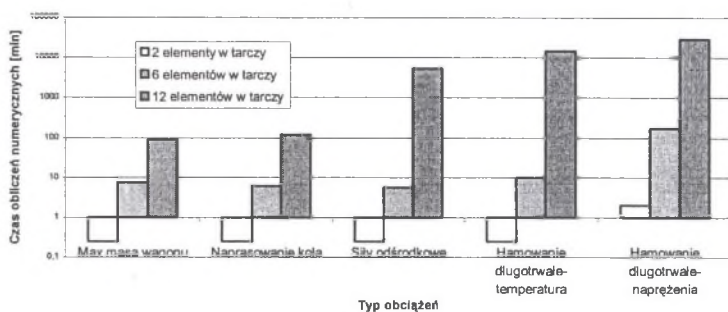
Rodzaj obciążenia	Koło PN920/185 s \varnothing 920					
	2 elementy w tarczy		6 elementów w tarczy		12 elementów w tarczy	
	naprężenia red. [MPa]	czas analizy [s]	naprężenia red. [MPa]	czas analizy [s]	naprężenia red. [MPa]	czas analizy [s]
Max obciążenie wagonu	207	15	227	450	234	5 400
Wcisk montażowy	216	15	225	375	228	7 200
Siły odśrodkowe	10	15	11	330	11	5 400
Ociążenia z hamowania	419	12	410	10 500	408	28 800

Wykresy na rysunkach 2 i 3 pokazują porównanie wyników obliczeń ze względu na dokładność i czas obliczeń. Badania te pozwoliły na wygenerowanie najkorzystniejszego modelu siatki koła ze względu na dokładność wyników i czas obliczeń.



Rys. 2. Wykres wpływu gęstości siatki na dokładność obliczeń

Fig. 2. Impact of mesh density on calculations accuracy



Rys. 3. Wykres wpływu gęstości siatki na czas obliczeń

Fig. 3. Impact of mesh density on calculations time

3. WYBRANE PRZYKŁADY BŁĘDÓW PRZY PROJEKTOWANIU KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Problematyka projektowania np. kolejowych zestawów kolejowych z wykorzystaniem metod numerycznych związana jest nie tylko z techniczną stroną programów komputerowych, ale przede wszystkim z praktyczną wiedzą kolejową ludzi wykorzystujących to oprogramowanie (know-how). Aktualnie firmy produkujące kolejowe zestawy kołowe wykorzystują różne programy (ANSYS, NASTRAN, COSMOS itd.) do obliczeń wytrzymałościowych, które posiadają określoną specyfikę [2+5]. Szczególnie widoczne jest to przy obliczeniach wytrzymałościowych kół związanych z określeniem naprężeń cieplnych i zmęczeniowych.

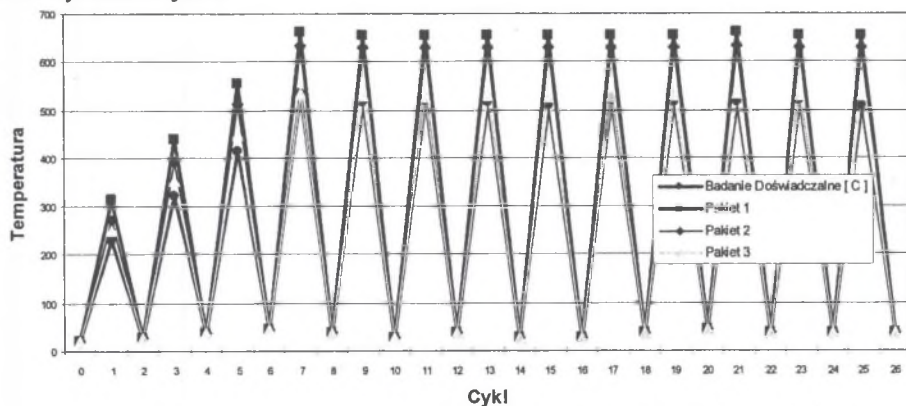
Proces stworzenia algorytmu obliczeń kół kolejowych można podzielić na dwa podstawowe etapy:

- określenie poprawnego modelu numerycznego koła kolejowego,

- opracowanie algorytmów analizy numerycznej poszczególnych obciążeń występujących w trakcie eksploatacji kół kolejowych i potwierdzenie ich w badaniach doświadczalnych.

Analizę numeryczną naprężeń cieplnych przeprowadzono dla kół kolejowych wykonanych z materiału ER7, który jest stosowany w Europie na koła kolejowe. Właściwości materiałowe dobrano zgodnie z Raportem UIC 169.1 oraz badaniami własnymi.

Przytoczone powyżej raporty UIC są jedynie zaleceniami odnośnie do procesu projektowania numerycznego. Niejednoznaczne określenie modelu numerycznego i modelu obciążeń powoduje duże rozbieżności wyników dochodzące do 50% (przy zastosowaniu siatki cztero- i sześciokątnej) [2]. Dodatkowo występują pewne rozbieżności przy analizie numerycznej różnymi pakietami oprogramowania. Przykładem może być analiza obciążeń wynikających z hamowania koła klockiem hamulcowym. W celu sprawdzenia poprawności zastosowanego algorytmu obliczeń pola temperatur przeprowadzono porównanie obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych z cyklem hamowania wg UIC 510-5. Numeryczną analizę termiczną przeprowadzono, zgodnie z Raportem UIC [6], na kole o maksymalnie zużytych profilu tocznym. Pomiedzy symulowanymi procesami hamowania (2700 s) zastosowano proces chłodzenia (14400 s). Po każdym etapie hamowania w węzłach odpowiadających punktom umieszczenia termopar odczytywano temperatury. Wynikiem analizy było wyznaczenie średniej wartości temperatury w wyodrębnionych węzłach dla poszczególnych cykli hamowania. W celu lepszego zobrazowania wyników sporządzono je w formie wykresu – rys. 4.



Rys. 4. Wykres temperatur w węzłach odpowiadających położeniu termopar

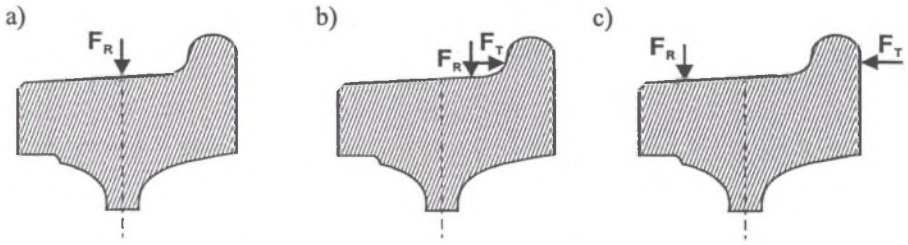
Fig. 4. Node temperatures (nodes correspond to thermocouples positions)

Porównanie przedstawionych w pracy wyników badań doświadczalnych cykli hamowania z wynikami analizy numerycznej pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- najmniejszą różnicę temperatur otrzymano w Pakiecie 3 (do 5 %);
- dla Pakietów 1 i 2 różnica wynosiła do 22 %.

Gdy weźmie się pod uwagę błędy obliczeń wytrzymałościowych kół kolejowych dochodzące do 50%, wyjaśnienie zaistniałych różnic wyników wymaga oddzielnej analizy przy współpracy z concernami produkującymi poszczególne oprogramowanie.

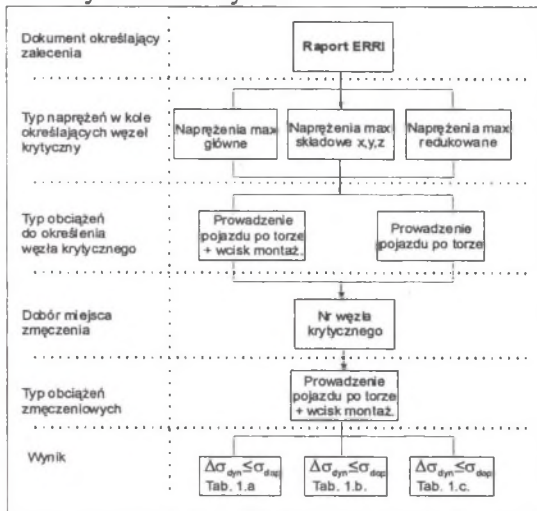
Kolejowy zestaw kołowy jest najmniej zmodyfikowanym elementem pojazdu szynowego w historii kolejnictwa. W ostatnich latach jednak trwają wzmożone badania nad sposobami zwiększenia jego trwałości i niezawodności. Także jeżeli chodzi o trwałość zmęczeniową [7,8]. Zalecenia dotyczące analizy numerycznej zmęczenia kół kolejowych można znaleźć w Raporcie ERRI B 169.1 [9]. Według tego algorytmu obliczeń model dyskretny koła jest obciążany przez siły reprezentujące trzy typy drogi: prostą (P), łuk (Ł) i rozjazd (R) – rys. 5.



Rys. 5. Schemat obciążenia koła do analizy zmęczeniowej: a) tor prosty, b) łuk, c) rozjazd

Fig. 5. Wheel fatigue analysis loading diagrams: a) straight track, b) curve and c) crossover

W związku z niejednoznacznością określenia w zaleceniach ERRI doboru węzła krytycznego oraz nieuwzględnieniem obciążeń wynikających z naprasowania koła na oś w pracy wykonano trzy warianty obliczeń – rys. 6.



Rys. 6. Analiza zmęczeniowa kół kolejowych przeprowadzona w pracy

Fig. 6. Railway wheel fatigue analysis conducted by the authors

Pierwsza analiza zmęczeniowa dziesięciu konstrukcji kół polegała na znalezieniu węzła krytycznego na podstawie maksymalnych naprężeń głównych (które okazały się zgodne z podaną przez program maksymalną wartością naprężeń składowych x, y oraz z) przy superpozycji obciążeń eksploatacyjnych i wcisku montażowego. Etap kalkulacji wartości naprężenia zmęczeniowego dotyczył również superpozycji tych obciążeń. Dla większości konstrukcji (7 typów kół) taki typ analizy wygenerował koncentracje naprężeń w piasku koła, a co za tym idzie - bardzo niskie wartości naprężeń zmęczeniowych. Wynikało to z niewielkiej różnicy w wartościach macierzy naprężeń dla różnych schematów obciążenia koła (maksymalne naprężenia generowało obciążenie pochodzące od wcisku – tab. 2 a). Druga analiza zmęczeniowa uwzględniająca zmianę doboru węzła u maksymalnym wyężeniu na węzeł dobierany na podstawie naprężeń zastępczych (redukowanych wg Hipotezy Von Missesa) również nie zlikwidowała tej osobliwości – tab. 2 b).

Dopiero trzecia polegająca na doborze węzła na podstawie naprężeń głównych tylko ze względu na obciążenia wynikające z prowadzenia pojazdu po torze (prosta, łuk, rozjazd), a następnie analizie zmęczeniowej biorącej pod uwagę obciążenia wynikające z wcisku i prowadzenia pojazdu po torze pozwoliła na wygenerowanie poprawnego modelu – tab. 2.c).

Tabela 2
Porównanie wyników kilku algorytmów analizy zmęczeniowej kół

Nr koła	Koło Nowe ϕ 920' a)				Koło Nowe ϕ 920' b)				Koło Nowe ϕ 920' c)			
	$\Delta\sigma_{dyn1}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn3}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn ma}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn1}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn3}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn ma}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn1}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn3}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{dyn ma}$ [MPa]
1.	6	15	5	15	404	10	153	404	405	10	154	405
2.	9	23	8	23	412	11	168	412	412	11	168	412
3.	9	24	7	24	7	18	8	18	51	249	109	249
4.	22	6	8	22	7	16	8	16	8	301	109	301
5.	5	14	4	14	394	12	144	394	383	9	140	383
6.	3	10	3	10	5	335	111	335	377	22	178	377
7.	214	88	158	214	51	335	109	335	227	89	164	227
8.	287	4	131	287	40	222	37	222	287	4	131	287
9.	446	16	204	446	29	336	97	468	20	211	468	468
10.	10	26	8	26	17	40	16	40	282	19	132	282

- dla koła o konstrukcji 10 średnica wynosi $\phi 957$ mm

Bardziej dokładną analizę zmęczeniową kół kolejowych z wykorzystaniem metod komputerowych przedstawiono w pracy [10].

4. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

- Nałożenie się możliwych różnic wynikających z generacji modelu MES koła, modelu obciążeń i zastosowanego oprogramowania uniemożliwia porównanie wyników badań numerycznych kół prowadzonych w wielu jednostkach naukowo-badawczych.
- Jak widać na dwóch przykładach analizy wytrzymałościowej kół kolejowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, w praktyce mogą wystąpić podczas projektowania znaczne różnice w wynikach obliczeń, które mogą zagrażać bezpieczeństwu ludzi i towarów.
- W związku z coraz powszechniejszym zastosowaniem symulacji komputerowych w transporcie szynowym celowe wydaje się określenie zasad certyfikacji programów, jak również jednostek badawczych wykorzystujących te programy. Aktualnie w tym zakresie prowadzone są prace w ramach europejskiego grantu EURNEX, w którym Katedra Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej bierze aktywny udział.
- Stosowane dotychczas zalecenia odnośnie do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej kół kolejowych z wykorzystaniem metod numerycznych nie określają jednoznacznie metodyki obliczeń, co może powodować błąd obliczeń dochodzący do 50 %
- Na wartość wytrzymałości zmęczeniowej kół kolejowych oprócz obciążeń zewnętrznych (eksploatacyjnych) duży wpływ mają również obciążenia montażowe (wcisk koło-oś) i dlatego w obliczeniach numerycznych powinny być uwzględniane.

Literatura

1. Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1993.
2. Sitarz M., Sładkowski A., Chrużik K.: Metody Numeryczne w projektowaniu kół kolejowych zestawów kołowych. Monografia Nr 60, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003, s.128.
3. Sitarz M., Bizon K, Chrużik K.: Numerical – Experimental Strength Analysis of Wheels of Railway Wheelsets. W: 14 th International Wheelset Congress, 17 – 21 Październik 2004, CD.

4. Sitarz M., Chruzik K.: Durability of railway wheelsets – a systematic approach. Rozdział w Railway Wheelsets, Monografia Nr 59, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003, s.7-21.
5. Sitarz M., Sładkowski A., Bizoń K., Chruzik K.: Design and investigation of railway wheelsets. Rozdział w Railway Wheelsets, Monografia Nr 59, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003, s. 21-61.
6. Raport ERRI B 169. Termische grenzen der raden und bremsklotze. MTEL P 98005 Utrecht 1987.
7. Cocheteux F., Lament Y., Viet J.J.: Towards wheels calculation and validation in multiaxial fatigue. W: 14 th International Wheelset Congress, 17 – 21 października 2004, CD.
8. Okagata Y., Yamamoto M., Yamamura Y., Hirakawa K.: The fatigue design method of high-speed railway wheel. W: 14 th International Wheelset Congress, 17 – 21 października 2004, CD.
9. Raport ERRI B169.1. Entwurf zum UIC-merkblatt. 1998.
10. Sitarz M., Chruzik K., John A.: Analiza numeryczna wytrzymałości zmęczeniowej kół kolejowych, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(60)/2006, Politechnika Warszawska, s. 234-242.

Recenzent: Dr hab. inż. Paweł Piec Prof. Politechniki Krakowskiej

Praca wykonana w ramach badań BK-258/RT4/2006