

*Dr inż. Antoni JOHN,
Mgr inż. Bogna MRÓWCZYŃSKA,
Dr hab. inż., prof. Politechniki Śl. Marek SITARZ
Politechnika Śląska*

Zastosowanie pakietu programów metody elementów skończonych KOŁO_PC do komputerowego wspomagania projektowania

W procesie projektowania kolejowych zestawów kołowych niezbędna jest znajomość rozkładu naprężeń i przemieszczeń w elementach układu. Wyznaczenie tych wielkości metodą analityczną jest niemożliwe, dlatego stosuje się metody komputerowe, w szczególności metodę elementów skończonych. Pakiet programów KOŁO_PC pozwala rozwiązywać zagadnienia osiowo-symetryczne metodą elementów skończonych z uwzględnieniem takich zagadnień, jak naprężenia pochodzące od wcisku, naprężenia eksploatacyjne oraz naprężenia cieplne wywołane hamowaniem. Dodatkowo pozwala przeprowadzić analizę zmęczenia zestawu kołowego.

1. WPROWADZENIE

Jednym z ważniejszych elementów układu biegowego pojazdu szynowego jest zestaw kołowy. Jest to element

konstrukcyjny mający bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Z tego powodu oś koła oraz zestaw kołowy jako całość muszą mieć zapewnioną dostateczną wytrzymałość w wymaganym okresie eksploatacyjnym.

Uszkodzenia zestawu kołowego obserwowane w trakcie eksploatacji świadczą, że zagadnienie ich właściwego wymiarowania i doboru odpowiedniego kształtu kół jest bardzo ważne i wciąż aktualne.

Zagadnienie wytrzymałości zestawu kołowego jest na tyle złożone, że nie może być rozpatrywane na podstawie dotychczasowych metod. W świetle wymagań stawianych współczesnym konstrukcjom pojazdów szynowych, wykazana niedokładność tych metod budzi wiele zastrzeżeń co do dalszego ich wykorzystania w praktycznych zastosowaniach.

Obecnie spotykane postacie konstrukcyjne są wynikiem nałożenia się doświadczeń eksploatacyjnych i technologii, a w ostatnim okresie także wyników analiz numerycznych. Analizę wytrzymałościową zestawów kołowych można przeprowadzić, korzystając z pakietu programów metody elementów skończonych koło_pc.

2. OPIS PROGRAMU KOŁO_PC

KOŁO_PC jest pakietem programów przeznaczonym do analizy wytrzymałościowej konstrukcji geometrycznie osiowo - symetrycznych w zagadnieniach sprężystych i sztywno-plastycznych. Obliczenia wykonywane są metodą elementów skończonych. Schemat blokowy programu przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy pakietu programów KOŁO_PC

Pakiet programów umożliwia wyznaczanie naprężeń i przemieszczeń spowodowanych działaniem sił skupionych i obciążeń stałych lub liniowych, sił odśrodkowych, obciążeń wywołanych wciskiem (wyznacza siły węzłowe i naciski w złączach skurczowych i wtłaczanych dla różnych kombinacji wcisków i zacisków) oraz rozwiązywanie niestacjonarnego zadania przepływu ciepła dla bryły osiowo-symetrycznej o stałych własnościach termicznych. Otrzymane wyniki dla poszczególnych ścieżek obliczeniowych można złożyć metodą superpozycji.

Pakiet umożliwia również przeprowadzanie obliczeń zmęczeniowych. Podstawą są obliczone wcześniej naprężenia redukowane dla przekrojów konstrukcji w różnych płaszczyznach. W wyniku obliczeń zmęczeniowych otrzymuje się dla każdego elementu naprężenia minimalne, maksymalne i płaszczyznę, w której występują, a następnie określony jest współczynnik stałości obciążenia oraz liczba bezpieczeństwa określona metodą Serensena w odniesieniu do uproszczonego wykresu Haigh'a lub Sodenberga.

Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają na wyznaczanie naprężeń roboczych i zmęczeniowych przy zadanej drodze i średniej prędkości [7].

We wszystkich obliczeniach stosowane są izoparametryczne osiowo - symetryczne trójkątne elementy skończone z liniowymi funkcjami kształtu. Niesymetryczne obciążenia są modelowane szeregiem Fouriera.

Program wyposażony jest w moduły ułatwiające wprowadzanie danych. Wszystkie dane są zadawane przy pomocy odpowiednich edytorów. Dane geometryczne są wprowadzane w trybie graficznym. Możliwy jest również import geometrii z systemu CAD, np. AUTOCAD'a w formacie DXF lub IGES. Pakiet wymaga podania konturów przekrojów osiowych zadawanych obiektów. Podział obszarów na elementy trójkątne lub czworokątne, wymagany przez metodę elementów skończonych, jest wykonywany automatycznie przy pomocy odpowiednich programów generowania i renumeracji.

Wyniki obliczeń przedstawiane są w postaci kolorowych map naprężeń i przemieszczeń, wykresów na wskazanym brzegu, obrazów deformacji wywołanych danym obciążeniem, wykresów zmęczeniowych. Otrzymane mapy i wykresy drukowane są bezpośrednio na drukarkach w trybie IBM_PROPRINTER lub EPSON lub pośrednio przez zapisanie obrazu ekranu do pliku w postaci mapy bitowej. Mapy bitowe można drukować na dowolnej drukarce spod odpowiednich programów pracujących w systemie Windows (np. Paint lub Corel Draw).

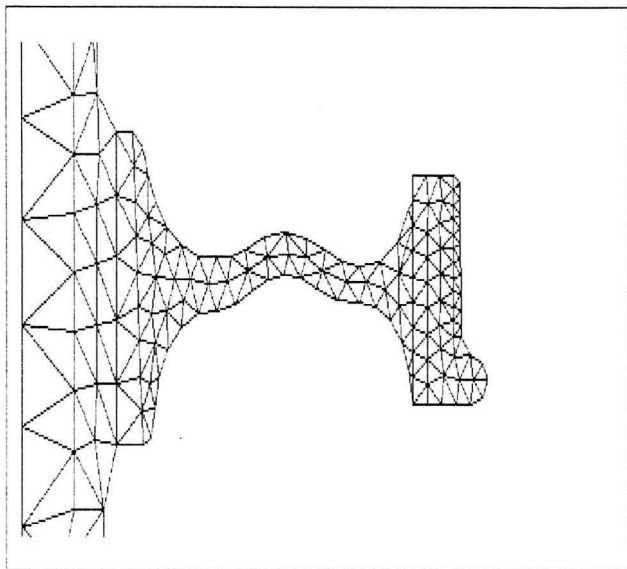
Programy pakietu KOŁO_PC są wyposażone w funkcje podpowiedzi, do których jest dostęp z programu. Do programu dołączany jest również szczegółowy opis działania programu.

Na rys.2 przedstawiono przykładową siatkę elementów skończonych wygenerowaną przez program. Rys.3 przedstawia przykładowy rozkład naprężeń redukowanych pochodzących od obciążeń eksploatacyjnych oraz ich wykres na brzegu. Kolejny rysunek (rys.4) prezentuje rozkład naprężeń redukowanych po superpozycji oraz wykres wartości brzegowych tych naprężeń.

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ PROGRAMU KOŁO_PC

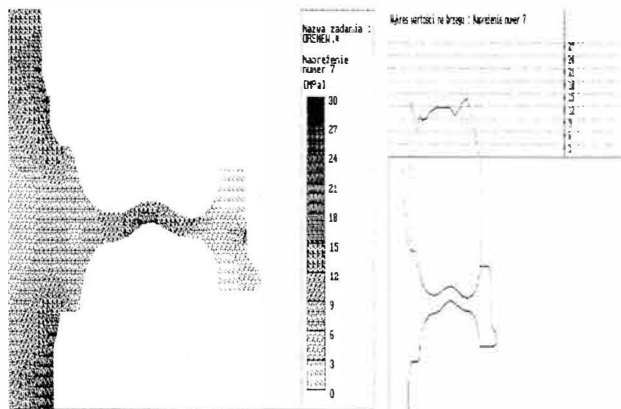
Pakiet w obecnej wersji pracuje m.in.: od 8 lat w Hucie 1 Maja w Gliwicach, w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej, Instytucie Transportu Politechniki Krakowskiej, na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śl. i w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach.

Pierwotnym zastosowaniem pakietu jest ocena wyężenia kolejowych zestawów kołowych [2, 5, 13, 14, 15]. Obliczenia są przeprowadzane dla obciążeń montażowych i eksploatacyjnych oraz temperatur powstających podczas hamowania.

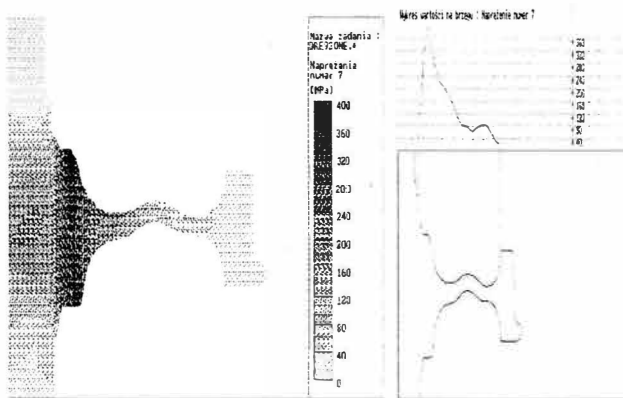


Rys.2 Siatka elementów skończonych przekroju tarczy koła

Poza podstawowym zastosowaniem, pakiet KOŁO_PC był używany do rozwiązywania wielu innych zadań. Ciekawsze z nich to np. wyznaczanie rozkładu temperatur w uzwojeniu wirnika i stojanie turbogenerators z chłodzeniem bezpośrednim [6], rozkład naprężen w procesie wytwarzania rur ożebrowanych [1, 10].



Rys.3 a) Rozkład naprężen redukowanych σ_{red} od obciążeń eksploatacyjnych b) Wykres na brzegu



Rys.4 a) Rozkład naprężen redukowanych σ_{red} po superpozycji b) Wykres na brzegu

4. WYZNACZANIE NAPRĘŻEN ROBOCZYCH I ZMĘCZENIOWYCH W KOLEJOWYCH ZESTAWACH KOŁOWYCH

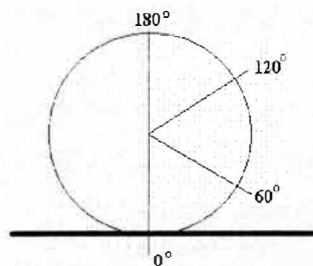
4.1 Wyznaczanie naprężen roboczych

Naprężenia, którym poddany jest zestaw kołowy w trakcie eksploatacji, wyznaczane są metodą elementów skończonych przy pomocy pakietu programów KOŁO_PC, rozwiązujących zadania geometrycznie osiowo-symetryczne. Przy wyznaczaniu naprężen roboczych uwzględniane są następujące zagadnienia:

- * naprężenia montażowe (pochodzące od wcisku),
- * obciążenia eksploatacyjne (siły skupione pochodzące od ciężaru wagonu i ładunku),
- * naprężenia cieplne powstające podczas hamowania.

Naprężenia montażowe mogą być wywołane wciskiem na styku oś-koło oraz koło bosc - obręcz (dla kół obręczowanych). Obliczenia mają przebieg dwuetapowy. Najpierw wyznaczane są siły pochodzące od wcisku, a następnie naprężenia wywołane tymi siłami.

Naprężenia eksploatacyjne wyznaczane są dla sił skupionych modelowanych szeregami Fouriera. Obliczenia naprężen i przemieszczen można przeprowadzić w kilku płaszczyznach (rys.5) - maksymalnie 18.



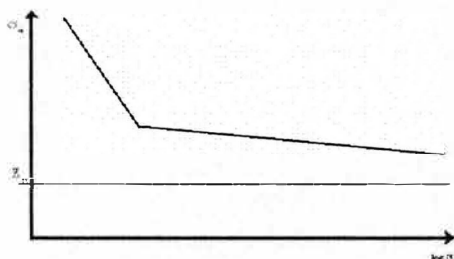
Rys.5 Przykładowe płaszczyzny przekroju dla obliczeń eksploatacyjnych

Naprężenia cieplne wyznaczane są również dwuetapowo. W etapie pierwszym wyznaczany jest rozkład temperatur po zadanym czasie hamowania, w etapie drugim - rozkład naprężen wywołany powstałym polem temperatur.

Po wyznaczeniu naprężeń pochodzących od wyżej wymienionych oddziaływań, wyliczane są naprężenia wypadkowe metodą superpozycji, a następnie naprężenia redukowane według hipotezy energii odkształcenia postaciowego Hubera - Misesa - Hencky'ego.

4.2 Wyznaczanie naprężeń zmęczeniowych i ocena trwałości

Dla materiału, z którego wykonane są zestawy kołowe można sporządzić wykres zmęczeniowy Wöhlera (rys.6).



Rys.6 Wykres Wöhlera

Dla zadanych obliczeń zestawu kołowego można wyznaczyć naprężenia średnie σ_m oraz amplitudalne σ_a . Wyznacza się również współczynniki asymetrii cyklu

$$R = \sigma_d / \sigma_g \quad (1)$$

oraz współczynnik stałości obciążeń

$$\kappa = \sigma_m / \sigma_a \quad (2)$$

gdzie

$$\sigma_d = \sigma_m - \sigma_a \quad (3)$$

$$\sigma_g = \sigma_m + \sigma_a \quad (4)$$

Obliczenia można wykonać dla przekrojów w płaszczyznach pod kątem 0°, 60°, 120°, 180° (rys.5) - maksymalnie dla 18 przekrojów. Wszystkie potrzebne wielkości są wyznaczane dla każdego elementu skończonego, na które podzielony jest przekrój koła. Znajac wykres Haigha lub Smitha można określić wytrzymałość zmęczeniową każdego elementu. W programie wykorzystano wykres Haigha.

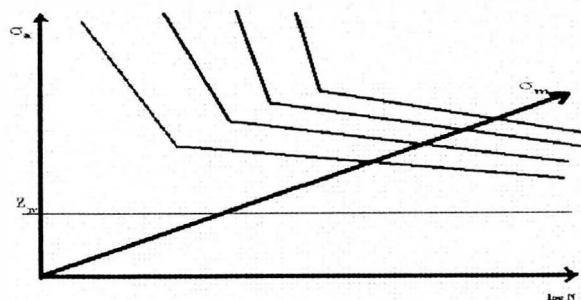
Jeżeli zostanie określona liczba cykli naprężeń N_C , którym poddano zestaw kołowy, to z wykresu Wöhlera można odczytać wartość wytrzymałości zmęczeniowej. Jeżeli liczba cykli N_C jest mniejsza od granicznej liczby cykli N_0 (równej około 10×10^6 lub 2×10^6), to określa się ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową, czyli podaje naprężenia, które wytrzyma materiał przy zadanej liczbie cykli. Ograniczona wytrzymałość zmęczeniowa jest większa od wytrzymałości zmęczeniowej.

Wykres Wöhlera jest sporządzony dla danego σ_m . W przypadku różnych wartości σ_m , jak to ma miejsce w rozważanym tutaj zagadnieniu, niezbędna jest znajomość wykresów zmęczeniowych dla różnych wartości σ_m . Powstaje wtedy przestrzenny wykres Wöhlera (rys.7), analogiczny z wykresem Smitha, jednak w odróżnieniu od tego ostatniego przedstawia w sposób jawny zależność od ilości cykli obciążenia.

Liczbę cykli określa się na podstawie zadanej drogi i geometrii zestawu kołowego. Mając wyznaczone naprężenia robocze (eksploatacyjne) przy zadanej drodze i średniej prędkości, można je porównać z ograniczoną wytrzymałością zmęczeniową i wyznaczyć przewidywaną trwałość zestawu.

5. DALSZE MOŻLIWOŚCI

- Planowane jest poszerzenie pakietu KOŁO_PC o programy płaskiej analizy metodą elementów skończonych oraz elementów brzegowych.
- Jako odrębną ścieżkę obliczeniową można włączyć do pakietu ocenę trwałości zmęczeniowej.
- Na bazie oprogramowania, w które wyposażono KOŁO_PC, przeprowadzono analizę wrażliwości i optymalizację rozkładu obciążenia na brzegu tarczy koła ze względu na minimalizację wienca koła [8, 9, 12]. Można również podjąć się zadania optymalizacji kształtu tarczy koła zestawu kołowego.



Rys.7 Przestrzenny wykres Wöhlera

LITERATURA

- [1] Adamiec P., John A., Mrówczyńska B. „Wyznaczanie rozkładu naprężeń w procesie wytwarzania rur ożebrowanych.” *Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Technicznej, Politechniki Śląskiej, Zeszyt nr 2, Gliwice 1996*
- [2] Bąk R., Grajek K., Zacharski M.: „Metoda numeryczna analizy statycznej stanu naprężenia w kolejowych zestawach kołowych.” *Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn. Politechnika Śląska, Zeszyt 27/61, Gliwice - 1977*
- [3] Bąk R., Mrówczyńska B., „Optymalne kształtowanie brzegu tarczy koła kolejowego zestawu kołowego.” *XII Sympozjon Modelowanie w Mechanice, PTMTS, Gliwice-Wisła 1983.*
- [4] Bąk R., Mrówczyńska B., „Zastosowanie metody analizy wrażliwości w projektowaniu kształtu tarczy koła kolejowego.” *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport, Z.7, Gliwice 1987.*
- [5] Iwanow J., Bąk R., Biezenarow S., Sitarz M., Zabołotniew A.G., Mrówczyńska B.: „Powyszenie wynosliwości koles skorostnego podwijnego sostawa.” *Sbornik trudov : Lokomotivy i mietody ich ekspluatacji, Sbornik Naucznyh Trudov, Uniwersytet Transportu w St.Petersburgu 1994.*

[6] John A., Mrówczyńska B. "Wyznaczanie rozkładu temperatur w stojanie i wirniku turbogenerators z chłodzeniem bezpośrednim." XII Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Rzeszów, wrzesień 1996.

[7] John A., Mrówczyńska B.: „Wyznaczanie naprężeń roboczych i zmęzeniowych w kolejowych zestawach kołowych przy zadanej drodze i średniej prędkości.” Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport, z.27, Gliwice 1995

[8] John A., Mrówczyńska B.: „Analiza wrażliwości przemieszczeń osiowych kół zestawów kołowych ze względu na miejsce przyłożenia siły do obręczy koła.” Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Technicznej, Zeszyt nr 3, Gliwice 1997

[9] John A., Mrówczyńska B.: „Minimalizacja przemieszczeń wieńca koła ze względu na rozkład obciążenia na obręczy koła.”, Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji i Specjalistycznej Wystawy, Ostrawa – Katowice 29.04 – 06.05.1997

[10] John A., Mrówczyńska B.: „Finite Element Method Applied to Stress and Strain Analysis During Finned Pipes Production”, XIII Polish Conference on Computer Methods in Mechanics, 5-8 May 1997 Poznań,

[11] John A., Mrówczyńska B.: „Computer aided engineering using finite element method program KOŁO_PC”, 3rd International Scientific Colloquium “CAE TECHNIQUES”, Rzeszów, 24-27 IX 1997,

[12] John A., Mrówczyńska B.: „Optymalizacja rozkładu obciążenia na obręczy koła ze względu na minimalizację

przemieszczeń wieńca koła”, XXXVII Sympozjon Modelowanie w Mechanice, Wisła'98, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, Politechniki Śląskiej, Zeszyt nr 6, Gliwice 1998

[13] John A., Mrówczyńska B., Sitarz M.: „Numeryczna ocena wytrzymałości kolejowych zestawów kołowych dla kół o różnym kształcie tarczy.” Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Technicznej, Politechniki Śląskiej, Zeszyt nr 2, Gliwice 1996

[14] John A., Mrówczyńska B., Sitarz M.: „Wytrzymałość kół kolejowych zestawów kołowych o różnym kształcie tarczy.” XII Konferencja Naukowa „Pojazdy szynowe”, Poznań 1996

[15] John A., Mrówczyńska B., Pośpiech P., Sitarz M.: „Analiza wytrzymałościowa kolejowego zestawu kołowego ORE920 wózka trakcyjnego metodą elementów skończonych” Konferencja Naukowa Napędy Maszyn Transportowych, Ustroń Śląski, wrzesień 1996

[16] John A., Mrówczyńska B., Pośpiech P., Sitarz M.: „Przykłady zastosowań pakietu KOŁO_PC do komputerowego wspomagania projektowania”, Seminarium z zakresu wytwarzania i eksploatacji obręczy zorganizowane przez Hutę 1 Maja i Hutę Bankową 29 października 1996.

[17] Stasiak L. "Wnioski i zalecenia konstrukcyjne wynikające z eksploatacji programów KOŁO w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu." Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport. Zeszyt nr 7, Gliwice 1987.