

Katarzyna CHRUZIK, Antoni JOHN, Marek SITARZ

ZASTOSOWANIE METOD NUMERYCZNYCH W PROJEKTOWANIU I OPTYMALIZACJI KONSTRUKCJI KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH – CZĘŚĆ I

Streszczenie. Kolejowy zestaw kołowy to element konstrukcyjny mający bezpośredni wpływ nie tylko na ruch pojazdu, ale i na bezpieczeństwo pasażerów. Dlatego oś i koło oraz zestaw kołowy jako całość muszą mieć zapewnioną dostateczną wytrzymałość w wymaganym okresie eksploatacji. Obecnie spotykane postacie konstrukcyjne tych elementów są wynikiem nałożenia się doświadczeń eksploatacyjnych i technologii wykonania, a w ostatnim okresie także wyników analiz numerycznych wykorzystywanych przy ich projektowaniu. Przedmiotem rozważań jest numeryczna analiza wytrzymałości różnych postaci konstrukcyjnych kolejowych zestawów kołowych oparta na metodzie elementów skończonych (ANSYS, NASTRAN, COSMOS, KOLO_PC). Porównanie tych czterech programów było poprzedzone ustaleniem identycznych danych wejściowych do analizy numerycznej (geometria, materiał, warunki brzegowe, podział na elementy skończone). Część I opracowania dotyczy podstaw teoretycznych zagadnienia doboru danych wejściowych oraz wstępnych analiz (porównawczych) możliwości obliczeniowych i przydatności.

NUMERICAL METHODS IN COMPUTER AIDED OPTIMAL DESIGN OF RAILWAY WHEEL SET – PART I

Summary. The wheel set is one of the most important part of railway car and railway traffic safety depend on it. It causes the effort of axle, wheel and wheel set should satisfy assumed conditions during working time. Currently, structures form of wheel set is a result coming from operating and engineering experience and (lately) from numerical calculations. Numerical analysis of different form of railway set structures using FEM codes (ANSYS, PATRAN/NASTRAN, COSMOS, KOLO_PC) is applied. Preliminary comparison of four numerical codes assumes identical initial data for numerical calculations. In part I theoretical background, initial conditions selection and preliminary comparison of possibilities and helpfulness of using FEM codes are presented.

1. WPROWADZENIE

Przy obecnym poziomie techniki i wiedzy proces projektowania można znacznie uprościć stosując komputerowe symulacje oparte na metodzie elementów skończonych

(MES). Przedmiotem rozważań są obliczenia numeryczne wytrzymałości różnych postaci konstrukcyjnych kolejowych zestawów kołowych oparte na metodzie elementów skończonych. Zastosowanie czterech programów wykorzystujących MES (ANSYS, NASTRAN, COSMOS, KOLO_PC) umożliwi sprawdzenie zbieżności uzyskanych wyników (dokładność, czas obliczeń, porównanie modelu płaskiego i przestrzennego) przy założeniu że dane wejściowe (geometria, materiał, warunki brzegowe, podział na elementy skończone) będą takie same. Przed przystąpieniem do badań należy więc ustalić dane wejściowe do obliczeń tak, aby możliwe było porównanie tych metod obliczeń.

Po porównaniu wyników symulacji numerycznej przemieszczeń i naprężeń w kolejowych zestawach kołowych z wynikami doświadczalnymi można będzie wybrać programy obciążone najmniejszym błędem obliczeń oraz pozwalające na najsprawniejsze uzyskanie wyników końcowych.

Uzasadnieniem podjęcia tego problemu jest brak w kraju i na świecie metodologii projektowania kolejowych zestawów kołowych i możliwości optymalizacji ich cech konstrukcyjnych w zależności od procesu wytwarzania i warunków eksploatacji. Analiza tego problemu pozwoli:

- porównać dotychczas stosowane programy do obliczeń wyężenia kolejowych zestawów kołowych;
- opracować metodologię projektowania kolejowych zestawów kołowych;
- zwiększyć trwałość kolejowych zestawów kołowych;
- zwiększyć bezpieczeństwo transportu szynowego;
- zmniejszyć koszty wytwarzania i eksploatacji kolejowych zestawów kołowych.

2. ANALIZA BŁĘDÓW I ZBIEŻNOŚCI ROZWIĄZAŃ

Metoda elementów skończonych jest metodą przybliżoną. Wobec coraz powszechniejszego stosowania MES i opierania na jej wynikach różnorodnych decyzji technicznych i ekonomicznych nabiera znaczenia wiarygodność tych wyników. W szczególności ważne jest, jak duże błędy zawierają obliczenia MES i w jaki sposób można je zredukować do założonych przedziałów. Różne są źródła błędów obliczeń komputerowych, np. w przygotowaniu bazy danych. Tego rodzaju błędy są możliwe do wykrycia i usunięcia, jeżeli posiadamy dostęp do programu źródłowego. Zakładając że program nie posiada błędów ukrytych i realizuje 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. Nie do ominięcia są także błędy obciążenia, różne dla danego komputera.

Błąd dyskretyzacji zależy głównie od liczby parametrów węzłowych, użytych do opisu modelu [1]. Liczba tych parametrów N , zwana liczbą stopni swobody (LSS), zależy od liczby elementów (LE), co przy ograniczonym obszarze podziału prowadzi do zależności wartości błędu od największego wymiaru elementu h_{\max} oraz od liczby węzłów (LW) i liczby stopni swobody w węźle (LSSW). Zarówno jednak LW, jak i LSSW zależą od funkcji interpolacyjnych, czyli np. przy wielomianach od ich stopnia p . Można zatem mówić, że $N=f(h,p)$. Ponieważ błąd dyskretyzacji e powinien dążyć do zera przy N dążącym do nieskończoności, więc wobec $N=f(h,p)$ może to mieć miejsce w dwóch przypadkach:

$$\lim e = 0 \quad \text{przy} \quad h_{\max} \rightarrow 0 \quad (2.1)$$

albo

$$\lim e = 0 \quad \text{przy} \quad p_{\max} \rightarrow \infty. \quad (2.2)$$

W praktyce zwiększamy N do skończonej, dużej liczby.

Rozwiązując problemy mechaniki wyznaczamy funkcje opisujące pola różnych wielkości, np. przemieszczeń, naprężeń. W metodzie elementów skończonych obliczamy wartości parametrów w węzłach, a na ich podstawie ustalamy odpowiednie funkcje w obszarze elementów. Tak więc wyniki obliczeń MES dotyczą funkcji. Jeśli zatem mówimy o błędach obliczeń w MES, to znaczy, że chodzi o błędy odnoszące się do wielkości funkcyjnych. Należy więc określić miarę błędu funkcji.

Weźmy funkcje jednej zmiennej. Jeżeli $u(x)$ jest dokładnym opisem, a $u_h(x)$ opisem przybliżonym, to błąd może odnosić się do poszczególnych wartości funkcji, określając go jako różnicę wartości wspomnianych opisów albo odległość między nimi:

$$e = \|u - u_h\| = \max |u(x) - u_h(x)| \quad x \in (a, h) \quad (2.3)$$

Tego rodzaju miara błędu nazywa się miarą supmetryczną i ma najprostszą postać. Zwykle stosuje się miary bardziej złożone

Jak wspomniano w mechanice kontinuum operujemy polem przemieszczeń, odkształceń i naprężeń. Jeżeli składowe tych pól zapiszemy w postaci macierzy u , e , σ , wtedy miara w odniesieniu do poszczególnych pól wyraża się jako:

$$\|u\| = \left(\int_{\Omega} u^T u \, d\Omega \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \|e\| = \left(\int_{\Omega} e^T e \, d\Omega \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \|\sigma\| = \left(\int_{\Omega} \sigma^T \sigma \, d\Omega \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Miara błędów jest niewygodna do wykorzystania praktycznego. Łatwiejszy w interpretacji jest błąd względny

$$e_w = \frac{\|U\| - \|U^h\|}{\|U\|} \quad (2.5)$$

Bądź wyrażony w procentach

$$e_{w,p} = e_w \cdot 100 \quad (2.6)$$

Najczęściej oblicza się błąd energii wyrażonej w naprężeniach [1].

W naszym przypadku podstawą do oszacowania błędu będzie porównanie wyników doświadczalnych z wynikami analizy numerycznej.

3. PROGRAM BADAŃ

Symulacja komputerowa rozkładu przemieszczeń i naprężeń w kolejowych zestawach kołowych będzie przeprowadzana na najbardziej rozpowszechnionych programach obliczeniowych bazujących na metodzie elementów skończonych:

- PATRAN/NASTRAN,
 - ANSYS,
 - COSMOS
- oraz na programie
- KOŁO_PC.

PATRAN/NASTRAN jest pakietem programów służących do rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich z wielu gałęzi przemysłowych, bazujący na metodzie elementów skończonych.

Użytkownik ma do dyspozycji pełną bibliotekę powszechnie używanych elementów w jednym, dwóch i trzech wymiarach oraz różnego rodzaju elementów specjalnych. Aby zagwarantować szybkość algorytmów stosowane są między innymi solwery dla rzadkich macierzy i automatyczna redukcja szerokości macierzy. Możliwe są obliczenia równoległe i wektorowe.

Obliczenia przeprowadzone pakietem PATRAN/NASTRAN mogą uwzględniać następujące zagadnienia:

- liniową statykę z obciążeniami bezwładnościowymi;
- analizę dynamiczną;
- przewodnictwo cieplne;
- statykę nieliniową (nieliniowości geometryczne i fizyczne);
- optymalizację.

W roli preprocesora i postprocesora występuje program PATRAN. NASTRAN jest programem liczącym dla PATRANA i programów stowarzyszonych. Typowy plik wejściowy do systemu PATRAN zawiera pełny opis modelu, w tym: geometrię obiektu, własności materiałowe, zbiór elementów skończonych, obciążenia, warunki brzegowe, rodzaje i kolejność analiz, format pliku wyjściowego [3]. Etapy postępowania w trakcie przeprowadzania analiz w PATRAN/NASTRAN przedstawia schemat na rys. 1.

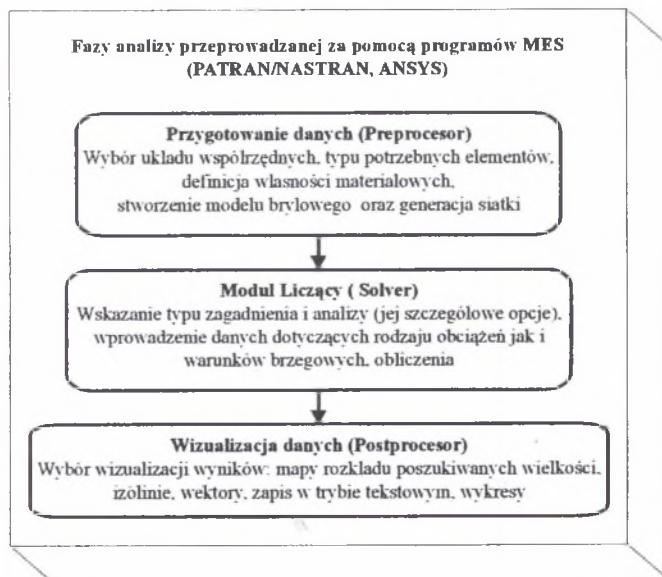
Produkt firmy ANSYS/MULTIPHYSICS jest bardzo obszernym i wyczerpującym programem do analizy metodą MES - od zagadnień strukturalnych (pracy i wytrzymałości konstrukcji), przez analizę przepływów, do zagadnień elektromagnetycznych. Program ANSYS umożliwia analizę wspólnego oddziaływania czynników o różnym charakterze, ich interakcji i wpływu na zachowanie się danego ustroju.

Niektóre moduły są dostępne jako samodzielne programy. Są to:

ANSYS/FLOTRAN - umożliwia szeroką analizę zagadnień dotyczących przepływów (przepływy laminarne i turbulenty, ściśliwe i nieściśliwe);

ANSYS/EMAG - pakiet do analizy elektromagnetycznej (pola elektromagnetyczne, prąd przewodzenia, obwody);

ANSYS/LS-DYNA - zawiera solwery wyspecjalizowane w rozwiązywaniu wysoce nieliniowych zagadnień dynamiki ustrojów; może symulować procesy formowania materiałów, efekty i przebieg zderzeń ciał (np. crash-test) oraz zagadnienia kontaktu.



Rys. 1. Fazy analizy przeprowadzanej w programie MES
Fig. 1. The phases of analysis leaded in FEM-programme

Każda analiza przeprowadzana za pomocą programu ANSYS składa się z trzech głównych faz, do których przypisano odpowiednie procesory (rys.1).

ANSYS dysponuje własnym parametrycznym programem do generacji układów bryłowych, umożliwiającym szybkie tworzenie modeli nawet bardzo skomplikowanych obiektów. Do dyspozycji są trzy sposoby generacji modelu MES:

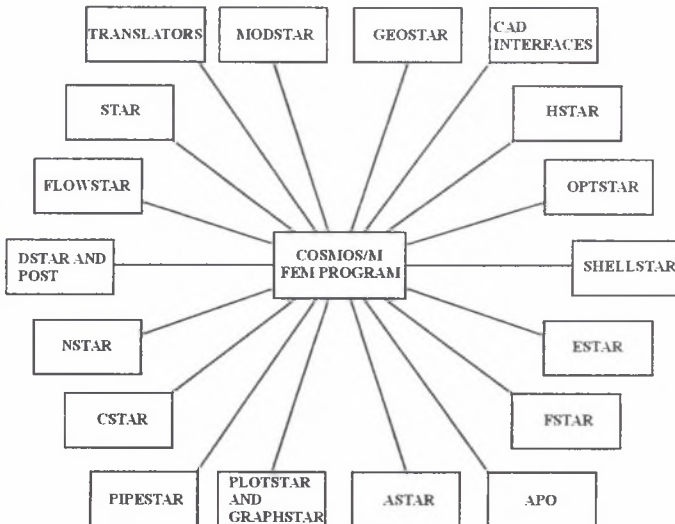
- - wczytanie zbioru przygotowanego w innym programie, np. CAD,
- - modelowanie bryłowe z generacją siatki,
- - bezpośrednia generacja.

Każda z tych metod ma swoje wady i zalety, np. import gotowych modeli jest dużo szybszym rozwiązaniem, ale może spowodować błędy geometrii. Użytkownik może wybrać jedną z nich lub zastosować ich kombinację, która zapewni najszybsze uzyskanie modelu gotowego do analizy.

W przypadku modelu bryłowego jest możliwy transfer geometrii z takich systemów, jak: CADDs, Pro/Engineer i Unigraphics. Wymiana z innymi systemami CAD może również odbywać się w standardowych formatach STEP, SAT, IGES. Dodatkowo jest możliwa komunikacja z innymi pakietami MES. Dane z tych programów mogą zawierać tylko opis modelu dyskretnego (lokalizacja węzłów, położenie elementów, warunki brzegowe, dane materiałowe). Po wczytaniu takiego pliku prowadzi się dalszą obróbkę modelu przy wykorzystaniu całego zestawu narzędzi preprocesora. Taki dwukierunkowy import-eksport dotyczy PATRAN/NASTRAN, Algor, COSMOS, I-DEAS oraz ABAQUS [4].

System **COSMOS/M** zaliczał się do najbardziej rozpowszechnionych systemów na świecie. Obecnie konkuruje na naszym rynku z programami NASTRAN i ANSYS. Głównymi jego zaletami są: łatwość prowadzenia konwersacji z użytkownikiem oraz bardzo dobrze opracowane procedury graficzne.

Struktura systemu jest oparta na budowie modułowej, a w ramach poszczególnych modułów realizuje się interdyscyplinarne zagadnienia. Na rysunku 2 przedstawiono poszczególne moduły systemu COSMOS/M.



Rys.2. Moduły wchodzące w skład systemu COSMOS/M
 Fig.2. Modules composing the system COSMOS/M

Filozofia modułowej budowy systemu oznacza, że jest on systemem otwartym i łatwym do ciągłego uzupełniania, poprawiania oraz dołączania nowych bloków. System składa się z następujących modułów:

MODSTAR	- kontrola wejściowego pakietu COSMOS/M, umożliwiająca czytanie danych z możliwością ich bieżącej kontroli oraz wywołanie innych modułów potrzebnych do analizy,
STAR	- statyka liniowa,
DSTAR	- analiza dynamiczna układu, drgania własne i wymuszone,
GEOSTAR	- modelowanie geometryczne schematów obliczeniowych na zasadzie CAD, pre- i postprocesor, możliwość komunikacji z innymi systemami CAD,
CAD INTERFACE	- połączenie z systemami CAD poprzez zapis graficzny IGES i DXF,
PLOTSTAR AND GRAPHSTAR	- postprocesor graficzny danych i wyników,
TRANSLATOR	- możliwość współpracy z innymi systemami, tj. ANSYS, NASTRAN, PATRAN i CAOSS,
ASTAR	- zaawansowana analiza dynamiczna, dynamika nieliniowa,
HSTAR	- analiza cieplna układów, przepływy ciepła,
NSTAR	- statyka nieliniowa i nieliniowa analiza układów dynamicznych,
ESTAR	- analiza elektrostatyczna i magnetyczna w układach dwu- i trójwymiarowych,
FLOWSTAR	- analiza przepływów laminarnych dwu- i trójwymiarowych,
FLOWPLUS	- analiza przepływów turbulentnych i dwuwymiarowych,
OPSTAR	- optymalizacja konstrukcji,
SHELLSTAR	- analiza statyczna i dynamiczna układów osiowosymetrycznych obciążonych niesymetrycznie,
FSTAR	- analiza zmęczeniowa konstrukcji,
CSTAR	- analiza dynamiczna zniszczeń - katastrofy,
PIPESTAR	- analiza sieci rurowych,
APO	- obliczanie charakterystyk geometrycznych dowolnych przekrojów otwartych i zamkniętych według teorii belek cienkościennych [5].

KOŁO_PC jest programem przeznaczonym do oceny wytrzymałości oraz nośności złączy w kolejowych zestawach kołowych. Pakietem programów KOŁO-PC można również wykonywać obliczenia wytrzymałości obiektów osiowosymetrycznych poddanych dowolnym obciążeniom fizycznym.

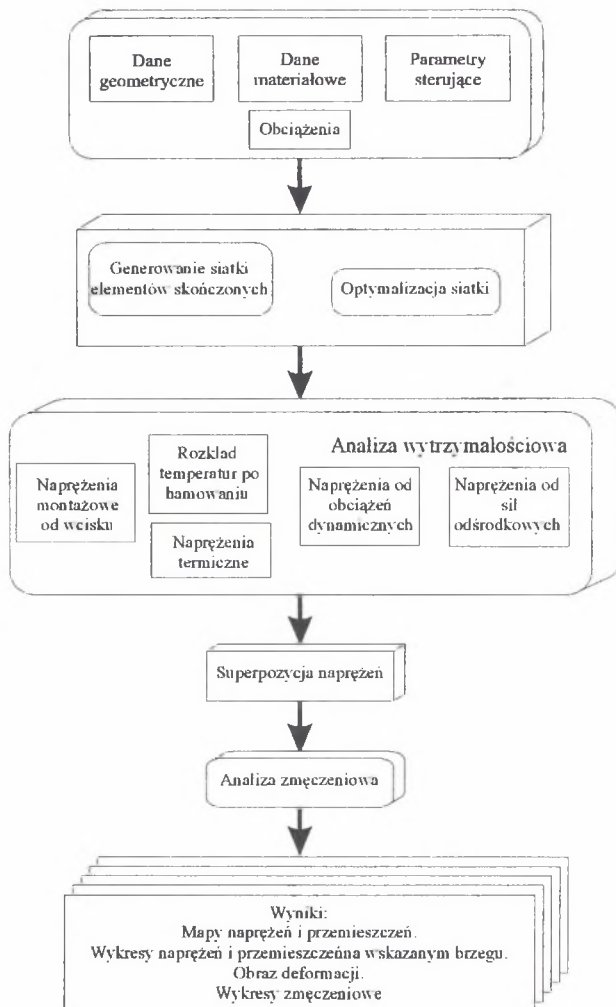
Program umożliwia wyznaczanie naprężeń i przemieszczeń spowodowanych hamowaniem, działaniem sił eksploatacyjnych oraz montażem - wyznacza siły węzłowe i naciski w złączach skurczowych i włączanych dla różnych kombinacji wcisków i zacisków. Pozwala również przeprowadzić obliczenia zmęczeniowe. W programie uwzględnia się zalecenia ORE. Obliczenia wykonywane są metodą elementów skończonych.

Program wyposażony jest w moduły edycji danych i wizualizacji wyników. Zawiera również automatyczny generator siatki elementów skończonych dla obszarów o dowolnym kształcie brzegu i procedurę przenumerowywania węzłów siatki minimalizującą pasmo zadania.

Po uruchomieniu programu KOŁO_PC.COM pojawia się menu główne, zawierające listę możliwych operacji. Można wyróżnić cztery podstawowe etapy pracy (rys.3):

1. Przygotowanie opisu geometrii i danych materiałowych obiektu, realizowane za pomocą programu GENOPED lub programu EDGEOM;

2. Przygotowanie danych opisujących sposób obciążenia oraz podparcia obiektu, a następnie wykonanie obliczeń, realizowane przez program EDWAR;
 - Naprężenia: montażowe, cieplne, eksploatacyjne, osiowosymetryczne, odśrodkowe, superpozycja
 - Rozkład temperatur
 - Zmęczenie
3. Analiza wyników obliczeń zmęczeniowych, realizowana przez program WZ;
4. Analizowanie pozostałych wyników, tj. rozkładu temperatur, przemieszczeń i stanu naprężenia wspomagane programem MAPA [6].



Rys. 3. Schemat działania programu KOLO_PC

Fig. 3. The scheme of activity the KOLO_PC programme

Wstępne porównanie przedstawionych programów (NASTRAN/PATRAN, ANSYS, COSMOS, KOŁO_PC) opisuje tab. 1.

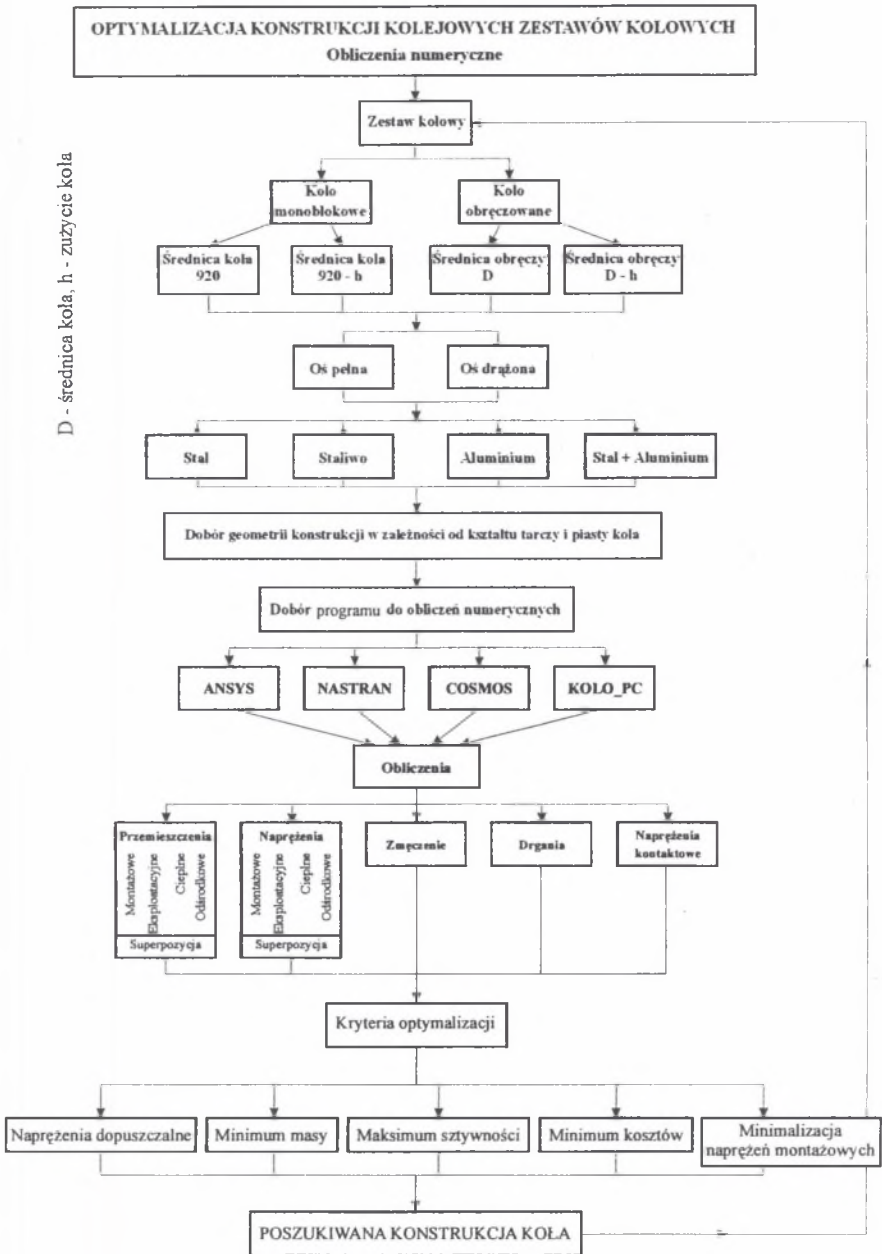
Schemat postępowania w trakcie obliczeń numerycznych wytrzymałości różnych postaci kół przedstawia rys. 4. Wynikiem pracy będzie opracowanie metodyki projektowania i doboru optymalnej postaci konstrukcji kolejowego zestawu kołowego dla zadanych warunków eksploatacyjnych (prędkość, obciążenie na oś itp.), która spełni wymagania dotyczące bezpieczeństwa, Polskich Norm oraz Kart UIC/ORE i innych kryteriów optymalizacji.

Tabela 1

Wstępne porównanie programów wykorzystywanych do analizy wyteżenia kolejowych zestawów kołowych

Parametr	Metoda			
	PATRAN/NASTRAN	ANSYS	COSMOS	KOŁO_PC
1. Łatwość przygotowania danych				
• tworzenia siatki elementów	+/-			
• zadawania stałych materiałowych	+	+/-	+/-	+
• czasochłonność		+	+	+
• zależność od temperatury	+/-	+/-	+/-	+
• określenie warunków brzegowych w przemieszczeniach	+	+	+	-
• zadawania obciążeń	+	+	+	+/-
	+/-	+/-	+/-	+
2. Czasochłonność:				
• przygotowania danych	+/-	+/-	+/-	+
• obliczeń	+/-	+/-	+/-	+
• wizualizacji wyników	+/-	+/-	+/-	+
3. Import plików	+	+/-	+/-	-
4. Zagadnienie kontaktowe	+	+	+	-
5. Zagadnienie statyczne	+	+	+	+
6. Zagadnienie dynamiczne	+	+	+	+/*
7. Niestacjonarny przepływ ciepła	-	+	+	+
8. Naprężenia termiczne dla danego pola temperatur	+	+	+	+
9. Zagadnienie naprężeń termicznych wynikających z hamowania	+	+	+	+
• czasochłonność	+/-	+/-	+/-	+
10. Łatwość uwzględnienia naprężeń montażowych (od wcisku)	-	-	-	+
11. Łatwość uwzględnienia sił odśrodkowych	-	-	-	+
12. Prosta analiza zmęczenia	-	-	+	+
13. Superpozycja naprężeń i przemieszczeń	+	+	+	+
14. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z doświadczalnymi	?	?	?	?

* - przez współczynnik dynamiczny



Rys. 4. Projektowanie i optymalizacja konstrukcji kolejowych zestawów kołowych

Fig. 4. The project and optimization the wheel sets construction

4. DANE WEJŚCIOWE DO OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Punktem wyjściowym do analizy przemieszczeń i naprężeń występujących w kolejowych zestawach kołowych pod wpływem warunków technologicznych i eksploatacji jest ustalenie danych wejściowych do obliczeń, tak aby w dalszej kolejności możliwe były porównania wyników uzyskanych przy zastosowaniu różnych programów. Dane te można podzielić na następujące grupy:

- dane opisujące geometrię konstrukcji;
- dane opisujące własności materiałów;
- dane do generowania siatki elementów skończonych;
- dane opisujące warunki brzegowe.

Geometria konstrukcji. Obliczenia przeprowadzone będą z zastosowaniem metody elementów skończonych. W zależności od stosowanego programu będą rozwiązywane zagadnienia dwuwymiarowe - 2D (model płaski) lub przestrzenne - 3D. Pierwszym etapem będzie wprowadzenie dokładnej geometrii zestawów w programie CAD-owskim lub bezpośrednio w preprocesorze danego programu w formacie umożliwiającym import do innych programów. Na rysunku 5 pokazano przykład geometrii kół monoblokowych kolejowych zestawów kołowych wprowadzonej do pierwszego etapu obliczeń. Do obliczeń przyjęto 7 rodzajów kół (krajowych i zagranicznych) o różnym kształcie tarczy i piasty koła.

W programach umożliwiających przeprowadzenie obliczeń dla zagadnień przestrzennych przekrój osiowy będzie obracany lub przesuwany względem punktu tworząc model 3D (ANSYS, NASTRAN, COSMOS). Należy uwzględnić zagęszczenie siatki elementów w odpowiednich obszarach modelu przestrzennego:

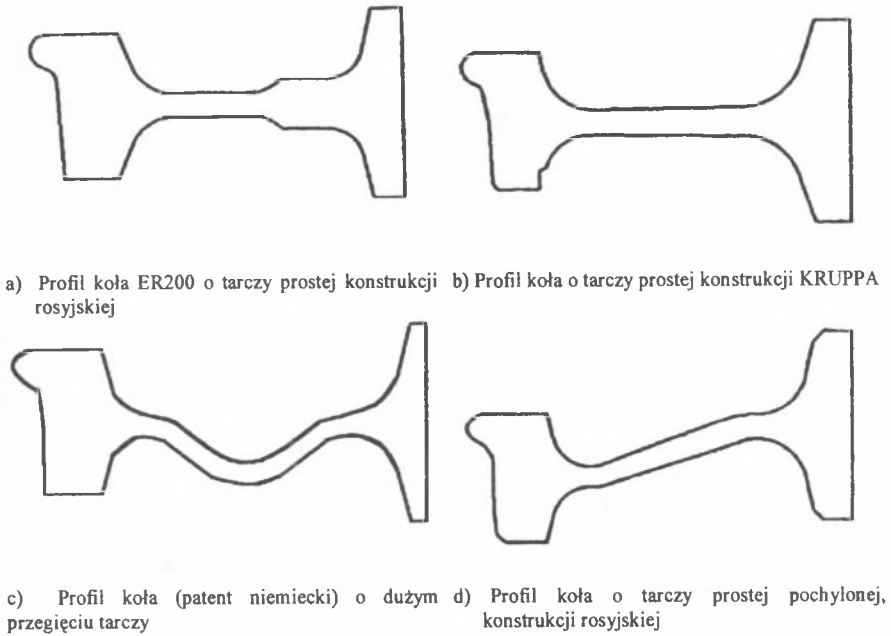
- dla koła (zagęszczenie na obwodzie);
- dla osi (zagęszczenie na przesunięciu).

Własności materiałów. Typując materiały na elementy konstrukcyjne pojazdów szynowych kierowano się zasadą, że materiały te powinny charakteryzować się niską masą właściwą przy jednoczesnym zachowaniu koniecznych własności fizykomechanicznych i technologicznych, a ponadto powinny spełniać kryteria ekonomiczne związane z kosztami wytwarzania. Na podstawie analizy danych uzyskanych z literatury (także opisane w niej badania doświadczalne) można było stwierdzić, że pod uwagę należy brać przede wszystkim trzy grupy tworzyw, do których zaliczamy: stopy aluminium, wzmocnione tworzywa sztuczne – kompozyty, stałe stopowe tzw. trudnordzewiejące.

Z analizy otrzymanych wyników możemy stwierdzić, że najlepsze efekty przy obniżaniu masy pojazdów z zachowaniem odpowiedniej ich wytrzymałości i trwałości uzyskujemy stosując do budowy pojazdów szynowych stopy aluminium.

Na podstawie badań literaturowych i przytoczonych danych, obliczenia wyężenia kół kolejowych oprócz standardowo stosowanych stopów żelaza z węglem (R7, A1N) przeprowadzone zostaną także dla stopu aluminium PA4N (tab.2).

Parametry numeryczne. W celu uzyskania siatki elementów skończonych takiej samej (lub bardzo zbliżonej) dla różnych programów należy stosować taką samą gęstość podziału siatki i sposób podziału (jednorodny) oraz należy używać tego samego rodzaju elementów skończonych.



Rys.5. Profile tarcz kół monoblokowych
Fig.5. Profiles of shields the monoblock wheels

Tabela

Wartości wskaźników własności fizyko mechanicznych [2]

Nr	Badana wielkość	Stopy Al			Kompozyty		Stale trudnordzewiejące		Stale konwencjonalne	
		P34N AlMg1Si1	PA47 AlZnMg1	K63Cu AlZn6Mg2Cu	Zywica poliestrowa zbr. szkłem ZPZS	Zywica epoksydowa zbr. szkłem ZEZS	1H18N9T	1H13	R7	AlN
1.	R_m [MPa]	341	374	608	262	292	608,0	504,0	450	320
2.	R_e [MPa]	341,0	332,0	588,0	-	-	526,0	372,0		
3.	E [MPa]	0,7e5	76,83 10 ³	81,7 10 ³	20,7 10 ³	22,0 10 ³	20,37 10 ⁴	22,17 10 ⁴	2.1e5	2.1e5
4.	Stała Poissona ν	0.34							0.29	0.29
5.	Współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K]	2.38e-5							1.6e-5	1.6e-5
6.	R_{02} [MPa]	314,0	295,0	529,0	240,0	258,0	491,0	348,5		
7.	A %	9.55	8,1	8	-	-	34	25		
8.	HB	97	95	156	100	103	158	187		
9.	Z_{90} [MPa]	95.62	109,06	169,2	70,6	83,4	133,57	115,0		
10	Z_{90} [MPa]	171.7	198,2	300,4	105,0	113,8	236,2	201,0		
11	Z_{90} [MPa]	133.4	125,6	220,7	91,7	102,5	204,5	169,2		
12	K_{Ic} [MNm ^{-3/2}]	-	-	28,2	-	-	-	-		

Warunki brzegowe. Definiując obciążenia wynikające z parametrów technologicznych i eksploatacji musimy pamiętać także o zdefiniowaniu punktów podparcia jednakowych we wszystkich obliczeniach. Podstawowe obciążenia wynikające z technologii wykonania i eksploatacji obrazuje rys. 6.

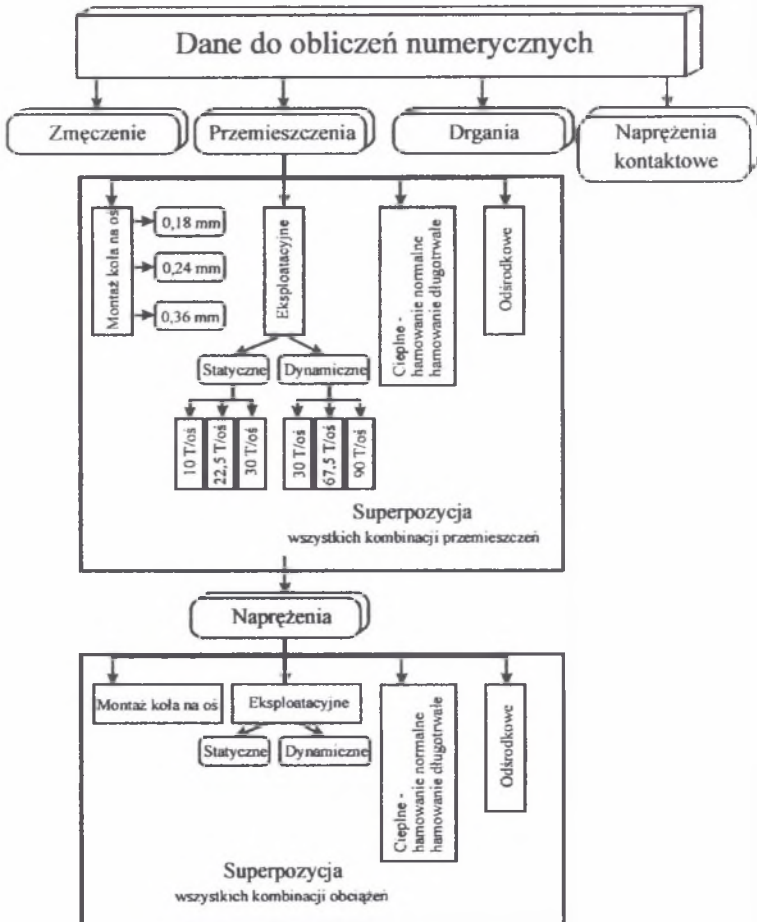
Obciążenia eksploatacyjne statyczne zestawu kołowego uwzględniają masę wagonu wraz z ładunkiem przypadającą na oś. Przeciążenia dynamiczne wynikają z ruchu masy resorowanej, a ich wartości zostały przyjęte zgodnie z zaleceniami ORE.

Dla badanych zestawów kołowych przyjęto następujące obciążenia statyczne: 10 [T/oś], 22.5 [T/oś], 30 [T/oś] oraz obciążenia dynamiczne: 30 [T/oś], 67.5 [T/oś], 90 [T/oś] (rys. 6).

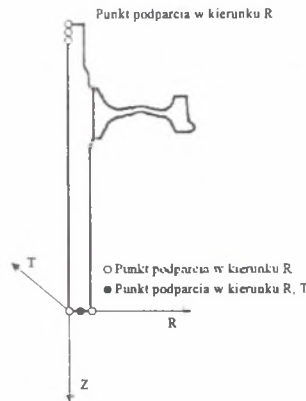
Podparcia osi w trakcie obliczeń eksploatacyjnych schematycznie obrazuje rys. 7.

Dodatkowe dane potrzebne do obliczeń:

- odległość środka ciężkości od osi [mm] 1600
- odległość prostych działania sił [mm] 2000
- odległość płaszczyzny okręgów toczych [mm] 1900



Rys. 6. Rodzaje obciążeń, dla których będą przeprowadzone obliczenia numeryczne przemieszczeń i naprężeń
Fig. 6. Kinds of loads to which there will be carried out numerical calculation of displacement and stresses



Rys. 7. Podparcia osi przy analizie numerycznej naprężeń eksploatacyjnych
 Fig. 7. Supports of axle by numerical analysis of exploitation stresses

Na zestaw kołowy w czasie eksploatacji działają obciążenia mechaniczne będące funkcją stanu toru i jego rodzaju, prędkości jazdy, cech konstrukcyjnych pojazdu. Te przyczyny powodują, iż najlepszym modelem tych obciążeń są procesy stochastyczne [3].

Stosowana do obliczeń zestawów kołowych numeryczna metoda analizy statycznej stanu naprężeń, oparta na metodzie elementów skończonych, narzuca sposób modelowania stanu obciążenia. Rzeczywisty stan obciążenia zestawu modelowany jest układem deterministycznym sił skupionych. Wartość tych sił określa się uwzględniając masy elementów wagonu oraz przeciążenia dynamiczne będące wynikiem drgań pojazdu i jazdy po łuku.

Zestaw kołowy i jego elementy są pod działaniem znacznych dynamicznych obciążeń, dlatego też powinny one charakteryzować się odpowiednią wytrzymałością podczas całego okresu eksploatacji.

Schemat sił działających na cały zestaw oraz oś przedstawia rys. 8. Statyczne obciążenia pochodzące od masy brutto wagonu działają na zestaw kołowy w płaszczyźnie pionowej i rozkładają się równomiernie na długości zestawu. Ich oddziaływanie przedstawione jest za pomocą sił skupionych $P_{1,2}$:

$$P_{1,2} = \frac{m_{br} - m_o \cdot m_{zk} + 2 \cdot m_o \cdot m_m}{2 \cdot \eta_o} \cdot g \cdot \frac{1 + \bar{\lambda}}{2}, [T] \quad (4.1)$$

gdzie:

m_{br} – masa wagonu brutto, [kg],

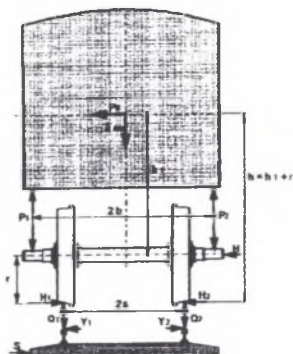
η_o – liczba osi w wagonie,

m_{zk} – masa zestawu kołowego, [kg],

m_m – masa części zestawu kołowego, licząc od czoła osi do płaszczyzny okręgu tocznego, [kg],

g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²],

$\bar{\lambda}$ – średnia wartość współczynnika wykorzystania ładowności wagonu [9].



Rys. 8. Siły działające na zestaw
Fig. 8. The forces acting on set

Normalizowane obciążenia statyczne, uwzględniające ładunek wagonu, ruch wagonu po łuku oraz nadwyżki dynamiczne wynikające z drgań odsprężynowanych mas pojazdu przyjęte zostały według raportów ORE i bazują na następujących danych:

m_1 – resorowana masa wagonu przypadająca na oś, [kg]

g – przyspieszenie ziemskie, [m/s^2]

$2b$ – odległość między płaszczyznami działania sił pionowych na oś, [mm]

$2s$ – odległość między płaszczyznami okręgów toczenia, [mm]

h_1 – położenie środka ciężkości wagonu nad osią zestawu kołowego, [mm]

r – promień koła, [mm]

Wartości sił działających na zestaw przedstawiony na rys. 8 oblicza się przy użyciu następujących wzorów:

$$P_1 = (0,625 + 0,075 \frac{h_1}{b}) m_1 g \quad (4.2)$$

$$P_2 = (0,625 + 0,075 \frac{h_1}{b}) m_1 g \quad (4.3)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2s} [P_1 (b+s) - P_2 (b-s) + H \cdot r] \quad (4.4)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2s} [P_2 (b+s) - P_1 (b-s) - H \cdot r] \quad (4.5)$$

$$H = 0,15 m_1 g \quad (4.6)$$

$$Y_1 = 0,30 m_1 g \quad (4.7)$$

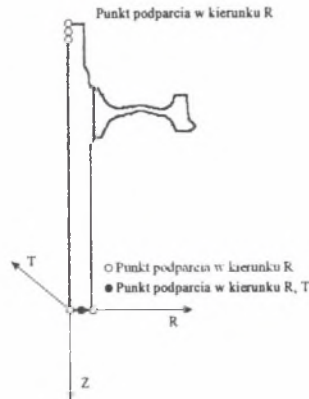
$$Y_2 = 0,15 m_1 g \quad (4.8)$$

W celu dokonania analizy numerycznej stanu naprężenia wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi rozważa się przemieszczenia osi zestawu. Traktuje się ją jako pręt obciążony siłami P_1 , P_2 , Y_1 , Y_2 , Q_1 , Q_2 , H oraz podporą przegubową przesuwną poziomo w punkcie przecięcia linii działania siły P_1 z osią geometryczną. Dotychczasowe przykłady obliczeń numerycznych pozwalają stwierdzić, że można zaniedbać kąt obrotu przekroju leżącego w środku długości osi zestawu kołowego i przemieszczenia poosiowe spowodowane rozciąganiem w porównaniu z ugięciem w tymże przekroju. Dlatego do obliczeń można zestaw podzielić, zadać przemieszczenia pionowe węzłów w przekroju podziału i tę połowę zestawu poddać analizie. Rozważa się dwa warianty stanu obciążenia:

1 - siłami czynnymi Y_1 , Q_1 oraz siłą bierną P_1 ,

2 - siłami czynnymi Y_2 , Q_2 oraz biernymi P_2 i H .

W każdym z wariantów składową poosiową Z i promieniową R siły na styku koła z szyną zastępuje się równoważnym statycznie obciążeniem, rozłożonym wzdłuż skończonego odcinka obwodu powierzchni tocznej koła. Dokonuje się tego przez rozwinięcie obciążenia w szereg Fouriera, co, jak wynika z zasady de Saint Venanta, powoduje tylko lokalne zaburzenia stanu naprężenia i to w strefie, która i tak wymaga dodatkowej analizy właściwej dla zagadnień stykowych [9].



Rys. 9. Podparcia zestawu przy analizie numerycznej naprężeń montażowych
Fig. 9. Supports of axle by numerical analysis of assembly stresses

Przyjęto następujące wartości **wciszków montażowych** pomiędzy kołem a osią: 0.18 [mm] – dolna granica dopuszczalna norma, 0.24 [mm] – wartość wciśku stosowana przy montażu w Hucie Gliwice, 0.36 [mm] – górna granica dopuszczalna norma. Podparcia osi w trakcie obliczeń naprężeń montażowych obrazuje rys. 9.

Obciążenia termiczne będą obliczane dla hamowania normalnego oraz dla długotrwałego hamowania według zaleceń ORE. Przedziały czasowe przedstawia tab. 3.

Tabela 3
Przedziały czasowe do obliczeń naprężeń wynikających z hamowania zestawu

Nr	Hamowanie normalne [s]	Długotrwałe hamowanie [s]
1.	5,094	30
2.	4,77	40
3.	6,675	60
4.	8,455	100
5.	8,465	180
6.	9,175	240
7.	7,054	550

Warunki mocy i wnikania dla przedziałów opisuje tab. 4.

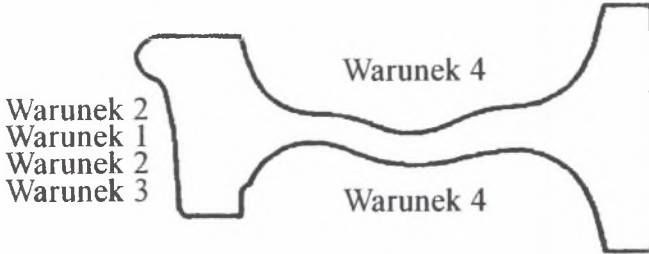
Tabela 4

Dane do obliczeń naprężeń wynikających z hamowania zestawu

Nr	Przedziały czasowe	Hamowanie normalne [W/m ² K]	Długotrwałe hamowanie [W/m ² K]
1.	1...7	Moc 6000	1200
2.	1...7	Moc 3000	6000
3.	1...7	Moc 2000	4000
4.	1...7	Wnikanie 2,8e-5	2,8e-5

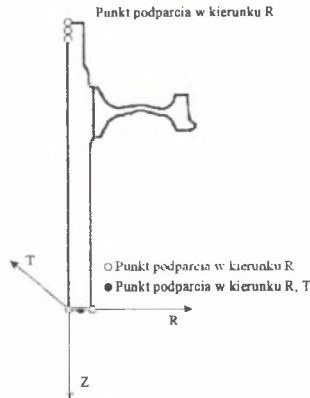
Temperaturę otoczenia dla obliczeń przyjęto 20 °C.

Zadawanie termicznych warunków brzegowych obrazuje rys. 10.



Rys.10. Rozkład warunków wynikających z hamowania na obrzeżu koła kolejowego zestawu kołowego
Fig. 10. The disposition of conditions result from brake on wheel periphery of wheel set

Naprężenia od sił odśrodkowych obliczane są dla prędkości obrotowej kół 72,46 rad/s (dla prędkości 100 km/h) i gęstości zależnej od rodzaju materiału (tab.2), przy podparciu jak na rys. 11.



Rys. 11. Podparcia osi przy analizie numerycznej naprężeń wynikających z sił odśrodkowych
Fig. 11. Supports of axle by numerical analysis of stresses results from centrifugal forces

Literatura

1. Rakowski G., Metoda Elementów Skończonych. Wybrane problemy. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
2. Żmuda – Sroka M. M., Możliwości obniżenia masy pojazdów dzięki stosowaniu specjalnych materiałów konstrukcyjnych. Materiały Konferencji "Transport'97", Ostrawa-Katowice 1997, str. 671-676.
3. Instrukcja obsługi programu NASTRAN.
4. Ćwikła K., ANSYS 5.3, CAD/CAM Forum, grudzień 1997.
5. Rusiński E., Metoda Elementów Skończonych. System COSMOS/M. WKŁ, Warszawa 1994.

6. Instrukcja obsługi programu KOŁO_PC, Zakład Usług Technicznych Formica, Katowice 1999.
7. John A., Mrówczyńska B., Pośpiech P., Sitarz M., Some applications of KOŁO_PC system to CAD, Proceeding of seminar organised by Steelworks 1 Maj and Steelworks Bankowa within the domain of production and working of the rim, Gliwice 1996.
8. John A., Mrówczyńska B., Sitarz M., Wytyczenie kół kolejowych zestawów kołowych o różnym kształcie tarczy. Proc. Conference XII Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe'96”, Poznań – Rydzyna 21-24 października 1996, t. 2, str. 115-120.
9. John A., Mrówczyńska B., Sitarz M., Numerical estimation of the wheel sets effort for the different shaped wheels. Scientific Papers of Department of Applied Mechanics, vol.2, Gliwice 1996, pp.91-96.
10. John A., Mrówczyńska B., Sitarz M., Computer aided design of railway wheel sets by means of finite element method KOŁO_PC program. Proceedings of the International Conference Numerical Method in Continuum Mechanics, Slovakia University of Žylyna 1998, pp. 398-403.
11. John A., Mrówczyńska B., Computer aided engineering using finite element method program KOŁO_PC. Proceedings of the 3rd International Scientific Colloquium CAE Techniques '97, Rzeszów 1997, pp.506-513.

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

Abstract

At present technical and knowledge level we can simplify the projecting process making computer simulations based on finite elements method. We consider about numerical calculations of endurance many forms of constructional wheel set based on finite elements method.

Using four computer programs which are taking advantage of finite elements method (ANSYS, PATRAN/NASTRAN, COSMOS, KOŁO_PC) makes possible to check obtain results (precision, calculations time, compare flat and space model) to assume that input data (geometry, material, margin conditions, division on finite elements) will be the same. Before starting to research it's necessary to settle input data to calculations to compare these counting methods. After comparing results of numerical simulation of dislocations and stress in wheel set with experimental results there will be possible to choose programs which are burden least calculation mistake which let on most efficient receiving final results. The motivation of taking this problem is lack the methodologies of projecting wheel set in native land and abroad and possibility of optimization their constructive features according to manufacture process and conditions of exploitation.

Analysis of this problem let:

- compare hitherto used programs to count effort wheel sets,
- to elaborate the methodologies of projecting wheel set,
- to increase the lasting wheel sets,
- to increase safety of rail transport,
- to reduce costs of manufacture and exploitation wheel sets.