

Leszek STASIAK

## WNIOSKI I ZALECENIA KONSTRUKCYJNE WYNIKAJĄCE Z EKSPLOATACJI PROGRAMÓW "KOŁO" W OŚRODKU BADAWCZO-ROZWOJOWYM POJAZDÓW SZYNOWYCH W POZNANIU

**Streszczenie.** W pracy zamieszczono ogólny opis systemu programów "KOŁO" służącego do numerycznej analizy stanu naprężenia w kolejowych zestawach kołowych. Omówiono wykorzystanie tej metody do oceny wytrzymałości połączenia wciskowego koła z osią. Przeanalizowano zagadnienie karbu technologicznego wywołanego nasadzeniem koła na oś, zwiśu piasty koła poza podpiască osi oraz naprężeń termicznych w zestawie kołowym w świetle możliwości stworzonych przez metodę numeryczną. Sformułowano wnioski i zalecenia wynikające z praktycznego zastosowania systemu programów "KOŁO" w procesie projektowo-konstrukcyjnym kolejowych zestawów kołowych.

### 1. WPROWADZENIE

Zestaw kołowy pojazdu szynowego jest elementem konstrukcyjnym wpływającym bezpośrednio na bezpieczeństwo ruchu kolejowego, dlatego oś koła oraz zestaw kołowy jako całość muszą mieć zapewnioną dostateczną wytrzymałość w wymaganym okresie eksploatacji.

Złożoność tego zagadnienia wynika ze zmęczeniowego charakteru stanu naprężenia zestawu kołowego, jaki w nim występuje pod wpływem zmiennych obciążeń dynamicznych, obciążeń termicznych powstających przy hamowaniu pojazdu, jak również stanu naprężenia wywołanego przy montażu zestawu kołowego.

W takich warunkach obciążenia występują w eksploatacji przypadki uszkodzeń zmęczeniowych koła i osi, a znaczna ilość zestawów kołowych jest przedwcześnie wycofywana z ruchu w wyniku wykrytych ognisk zmęczeniowych w czasie defektoskopowania na przeglądach rewizyjnych wagonów i lokomotyw [1].

Przypadki takie występują nie tylko na PKP, ale jeszcze w większych rozmiarach w innych, nawet wysoko rozwiniętych krajach.

Jak wynika z materiałów 8 Kongresu Zestawów Kołowych [2], Koleje Amerykańskie (AAR) w roku 1981 wycofały z eksploatacji zestawy kołowe na łączną sumę 76 mln dolarów, a w roku 1982 na sumę 102 mln dolarów. Obecnie wycofuje się rocznie około 8000 zestawów. Bezpośrednią przyczyną tych kosztów są uszkodzenia kół w wyniku nagrzewania się przy hamowaniu. Wymienione przypadki uszkodzeń zestawów kołowych w eksploatacji świadczą, że zagadnienie ich właściwego wymiarowania i doboru odpowiedniego kształtu

kół jest bardzo ważne i wciąż aktualne. Świadcza również, że stosowane dotychczas normatywy oraz metody obliczeń wytrzymałościowych zestawów kołowych nie są doskonałe i dostatecznie ścisłe dla analizy stanu naprężenia tych konstrukcji.

Wobec takich zastrzeżeń powstały nowatorskie tendencje zrezygnowania z konwencjonalnych metod i rozwiązania zagadnienia na drodze współczesnych obliczeń numerycznych, opartych na teorii elementów skończonych.

Doceniając potrzebę udoskonalania metod projektowania zestawów kołowych, Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej był jako pierwszy w Polsce inicjatorem realizacji takich tendencji.

## 2. OGÓLNY OPIS METODY NUMERYCZNEJ ANALIZY STANU NAPRĘŻENIA W KOLEJOWYCH ZESTAWACH KOŁOWYCH

Metoda ta została opracowana w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w roku 1976 pod bezpośrednim kierownictwem doc. dr inż. Romana Baka [3]. Oparta jest ona na aparacie matematyczno-numerycznym (metoda elementów skończonych), który został powszechnie uznany za nowoczesne narzędzie inżynierskie i oprogramowana w języku FORTRAN na maszynę cyfrową ODRA-1305.

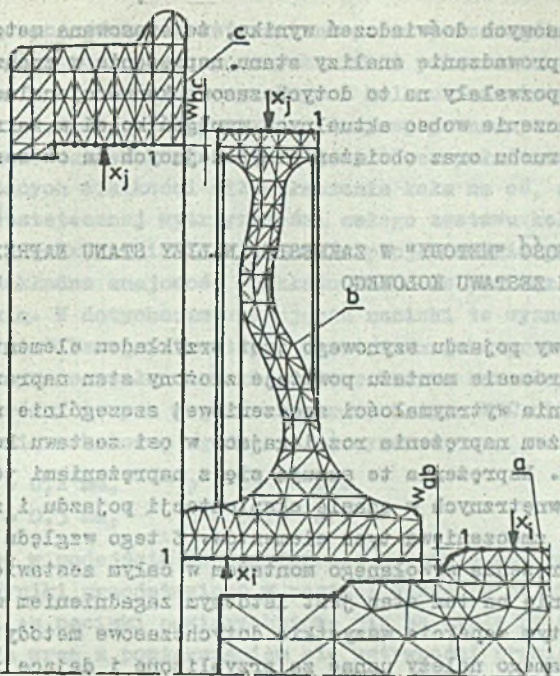
Programy analizy wytrzymałościowej uzupełnione są programami przygotowania i kontroli danych oraz opracowania wyników. W sumie tworzą one jeden system, który otrzymał nazwę programu "KOŁO".

Metoda była wielokrotnie doskonalona do aktualnej jej postaci. Dyskretyzacja elementów skończonych polega na tym, że poszczególne części składowe, tj. koło bosc, obręcz i oś zostaną podzielone na pierścieniowe elementy o przekrojach trójkątnych, jak to pokazano na rys. 1. Elementy te połączone są ze sobą w tzw. węzłach, stanowiących krawędzie poszczególnych pierścieni. W wyniku takiego podziału można wyznaczyć przemieszczenia wszystkich węzłów, siły w węzłach oraz stan odkształcenia i naprężenia w każdym elemencie skończonym.

## 3. WYKORZYSTYWANIE METODY W PRACACH KONSTRUKCYJNYCH OBRPS

Doceniając przydatność metody przy konstrukcji nowych zestawów kołowych, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych w Poznaniu od roku 1977 współpracuje z Politechniką Śląską. Współpraca ta doprowadziła do zawarcia porozumienia, w wyniku którego Ośrodek uzyskał możliwość wykorzystywania metody w bieżących pracach konstrukcyjnych.

Na podstawie przekazanych przez IPKM materiałów i programów wykonano cały szereg analiz stanu naprężenia w zestawach kołowych, które następnie stały się podstawą następujących konstrukcji:



Rys. 1. Podział części składowych zestawu kołowego na elementy skończone oraz siły węzłowe  $X_1$  i  $X_j$  na powierzchni styku tych części

Fig. 1. The division of components parts of wheel set to finite elements and a nodal forces  $X_1$  and  $X_j$  at the surface of contact of these parts

- napędowy zestaw monoblokowy dla lokomotyw elektrycznych (z otworami w tarczy koła),
- napędowy zestaw obręczowy dla lokomotyw elektrycznych (z otworami w tarczy koła),
- zestaw kołowy dla szybkich jednostek elektrycznych typu 3MN,
- zestaw kołowy dla wagonów osobowych o naciskach 16 t/oś i prędkości ruchu do 200 km/h,
- obręczowy zestaw kołowy o średnicy 920 mm dla wagonów towarowych na naciski 22,5 t/oś i prędkości 120 km/h,
- obręczowy zestaw kołowy o średnicy 1000 mm dla wagonów towarowych na naciski 22,5 t/oś i prędkości 120 km/h,
- zestawy monoblokowe dla kolei wąskotorowych na tor 1067, 1055, 1050 i 1000 mm,
- zestaw kołowy typu UIC dla wagonów towarowych na naciski 20 t/oś i prędkości 120 km/h.

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że stosowana metoda numeryczna umożliwia przeprowadzanie analizy stanu naprężenia w znacznie większym zakresie, niż pozwalały na to dotychczasowe konwencjonalne metody. Ma to szczególne znaczenie wobec aktualnych wymagań kolei w zakresie zwiększenia prędkości ruchu oraz obciążeń przypadających na oś zestawu kołowego.

#### 4. PRZYDATNOŚĆ "METODY" W ZAKRESIE ANALIZY STANU NAPRĘŻENIA WYWOŁANEGO MONTAŻEM ZESTAWU KOŁOWEGO

Zestaw kołowy pojazdu szynowego jest przykładem elementu nośnego, w którym już w procesie montażu powstaje złożony stan naprężeń własnych. Z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej szczególnie niekorzystne są wywołane montażem naprężenia rozciągające w osi zestawu kołowego oraz w kole bozym [5]. Naprężenia te sumują się z naprężeniami tego samego znaku od obciążeń zewnętrznych w czasie eksploatacji pojazdu i zmniejszają tym samym trwałość zmęczeniową tych elementów. Z tego względu dokładna znajomość stanu naprężenia wywołanego montażem w całym zestawie kołowym i możliwości wpływania na ten stan jest istotnym zagadnieniem w procesie projektowania. W tym aspekcie wszystkie dotychczasowe metody obliczeń oparte na "zadaniu" Lamego należy uznać za przybliżone i dające tylko ogólny pogląd na istotę zagadnienia, ponieważ:

- przy wyznaczaniu stanu naprężenia w płaszczyźnie koła nie uwzględniają sztywności tarczy i obręczy koła,
- pomijają wzajemny wpływ połączenia skurczowego koła z obręczą i wciskowego koła z osią,
- nie pozwalają na analizę wpływu kształtu koła na stan jego naprężenia,
- sprowadzają układ trójwymiarowy do układu dwuwymiarowego,
- nie pozwalają na ilościowe ujęcie skutków działania karbu technologicznego wywołanego nasadzeniem koła na oś.

Wszystkie wymienione zastrzeżenia eliminuje metoda numeryczna. Jej dodatkową zaletą jest możliwość rozwiązywania zagadnienia w taki sposób, aby zapewniona została wymagana nierozłączność połączeń wciskowych i skurczowych przy jednoczesnym zminimalizowaniu wielkości naprężeń własnych w kole, osi i obręczy.

##### 4.1. Analiza wytrzymałości połączenia wciskowego koła z osią

Połączenie wciskowe lub skurczowe koła z osią musi pozostać nierozłączne przez cały okres eksploatacji zestawu kołowego. Wynika to z potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa ruchu kolejowego i dlatego wszystkie Zarządy Kolejowe podchodzą do tego zagadnienia z dużą troską i ostrożnością, poświęcając im wiele uwagi.

Wyrazem takiego podejścia są ustanowione przez poszczególne Zarządy specjalne przepisy, określające sposoby kontroli połączenia woiskowego koła z osią. Tego typu połączenie wywołuje w kole osi zestawu kołowego wewnętrzny stan naprężenia, który wywiera duży wpływ na wytrzymałość tych elementów. Głównym zadaniem konstruktora jest więc spełnienie wymagań formalnych dotyczących wielkości sił włączania koła na oś, a jednocześnie zapewnienie dostatecznej wytrzymałości całego zestawu kołowego.

Przy analizie tego zagadnienia w procesie projektowania podstawowym czynnikiem jest dokładna znajomość rozkładu nacisków powierzchniowych między kołem a osią. W dotychczasowym ujęciu naciski te wyznaczano na podstawie tzw. "zadania" Lamego, traktując piastę koła jako grubościenną rurę.

W wyniku otrzymywano stałe naciski powierzchniowe na całej długości piasty. Dla zestawów kołowych wagonów towarowych typu UIC obliczone w ten sposób naciski powierzchniowe, zgodne z [6] wynoszą:

dla wcisku  $w = 0,2$  mm,  $p = 66$  MPa

dla wcisku  $w = 0,3$  mm,  $p = 98,5$  MPa

Istotną różnicę w podejściu do zagadnienia wykazują obliczenia numeryczne [6], których wyniki przedstawiono w postaci wykresów na rys. 2.

Wynika z nich, że naciski powierzchniowe nie są stałe na długości piasty, lecz wzrastają wraz z powiększaniem się sztywności promieniowej koła zestawu. Zależne są również od położenia piasty koła względem podpięcia osi. Znajomość wartości nacisków powierzchniowych, występujących we wspólnych węzłach leżących między kołem a osią, pozwala wyznaczyć ich średnią wartość, która wynosi:

dla wcisku  $w = 0,2$  mm,  $p = 88,7$  MPa

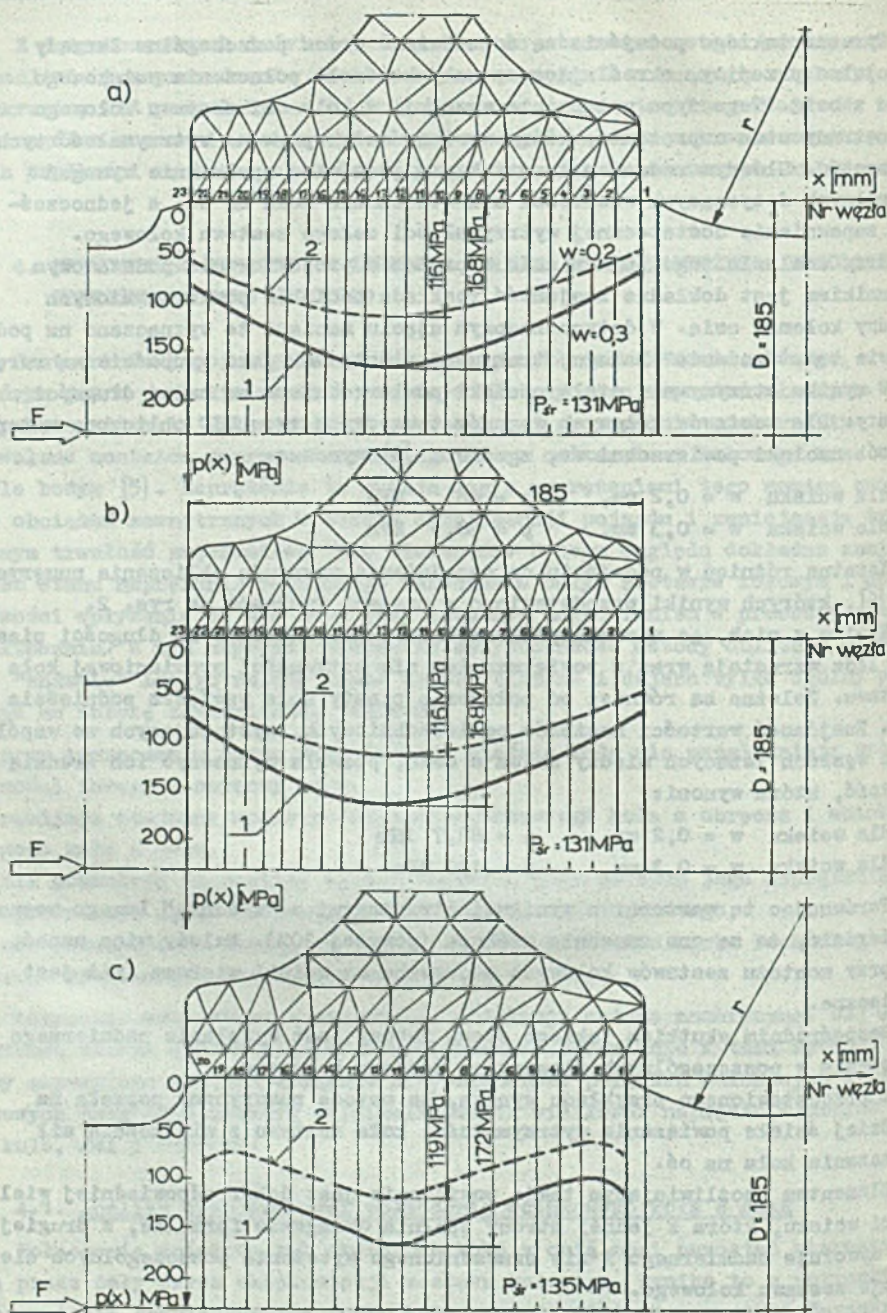
dla wcisku  $w = 0,3$  mm,  $p = 130$  MPa

Porównując te wartości z wynikami otrzymanymi z "zadania" Lamego można stwierdzić, że są one znacznie większe (powyżej 30%). Należy więc uznać, że przy montażu zestawów kołowych stosowane są wciski większe, niż jest konieczne.

Bezpośrednim skutkiem takiego stanu rzeczy jest wywołanie nadmiernego wyętwienia w poszczególnych elementach zestawu kołowego.

Z przedstawionego przykładu wynika, że metoda numeryczna pozwala na bardziej ścisłe powiązanie wytrzymałości koła zestawu z wielkością sił włączania koła na oś.

Elementem umożliwiającym takie powiązanie jest dobór odpowiedniej wielkości wcisku, która z jednej strony spełnia wymagania formalne, z drugiej nie wywołuje nadmiernego i nie uzasadnionego wyętwienia poszczególnych elementów zestawu kołowego.



Rys. 2. Naciski powierzchniowe między piastą a osią dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych

Fig. 2. A surface pressure between hub and axle for different solution of structure

#### 4.2. Zagadnienie karbu technologicznego, wywołanego nasadzeniem koła na oś

Szczególne przydatność metody numerycznej do zastosowań praktycznych wynika z faktu, że traktuje ona zestaw kołowy jako przestrzenne, odkształcalne kontinuum trójwymiarowe. Pozwala to między innymi na bardziej szczegółowe wyjaśnienie istoty karbu technologicznego, spowodowanego nasadzeniem koła na oś oraz na ilościowe ujęcie skutków jego działania.

Fizyczna interpretacja karbu polega na tym, że działające na powierzchni styku koła z osią naciski powierzchniowe wywołują w niej trójkierunkowy stan naprężenia. Składowa poosiowa tego stanu występuje w postaci normalnych naprężeń rozciągających, powstających przed i za piastą koła. Naprężenia tego rodzaju są niepożądane, gdyż w dużym stopniu obniżają trwałość zmęczeniową osi.

Znajomość wartości tych naprężeń ma zatem duże znaczenie w procesie projektowania osi. Pozwala bowiem na wybór najbardziej korzystnego rozwiązania konstrukcyjnego ukształtowania osi przed i za piastą koła.

Dla zilustrowania tego zagadnienia wyznaczono przykładowo za pomocą metody numerycznej naprężenia normalne dla trzech wariantów konstrukcyjnych ukształtowania osi. W celu uzyskania szerszego zakresu informacji wprowadzono do obliczeń dwie różne wielkości wcisków między piastą koła i osią oraz kołem bosym i obręczą. Zwiększenie dokładności obliczeń uzyskano przez odpowiednią dyskretyzację elementów skończonych, które zagęszczone specjalnie przed i za podpiąciem.

Umożliwiło to wyznaczenie przebiegu naprężeń, zbliżonego do linii ciągłej. Otrzymałoby w ten sposób wykresy normalnych naprężeń rozciągających przedstawiono na rys. 3, 4, 5.

Największe naprężenia rozciągające występują w bardzo bliskiej odległości od piasty koła i zanikają na długości równej około 0,7 D. Tego rodzaju rozkład naprężeń jest charakterystyczny dla wszystkich rozwiązań konstrukcyjnych. Istotna różnica występuje tylko w ekstremalnych wartościach naprężeń.

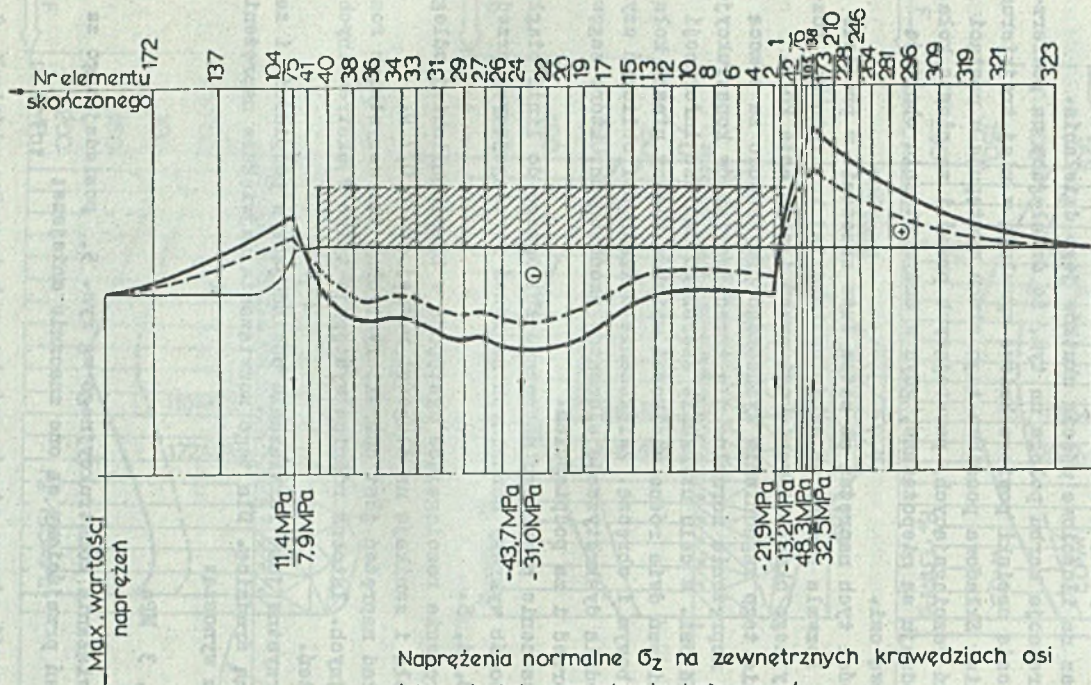
Najbardziej niekorzystne jest rozwiązanie posiadające w podpiąciu i za podpiąciem tę samą średnicę. Dla tego rozwiązania największe naprężenia przy wcisku 0,3 mm wynoszą:

$$\sigma_{(max)} = 48,3 \text{ MPa}$$

Natomiast dla rozwiązania konstrukcyjnego wg rys. 5, posiadającego za piastą koła promień przejściowy są one znacznie mniejsze:

$$\sigma_{(max)} = 37 \text{ MPa}$$

Największy wpływ na naprężenia rozciągające w osi ma wielkość zastosowanego wcisku między kołem a osią.



Naprężenia normalne  $\sigma_z$  na zewnętrznych krawędziach osi jako skutek nasadzenia koła na oś

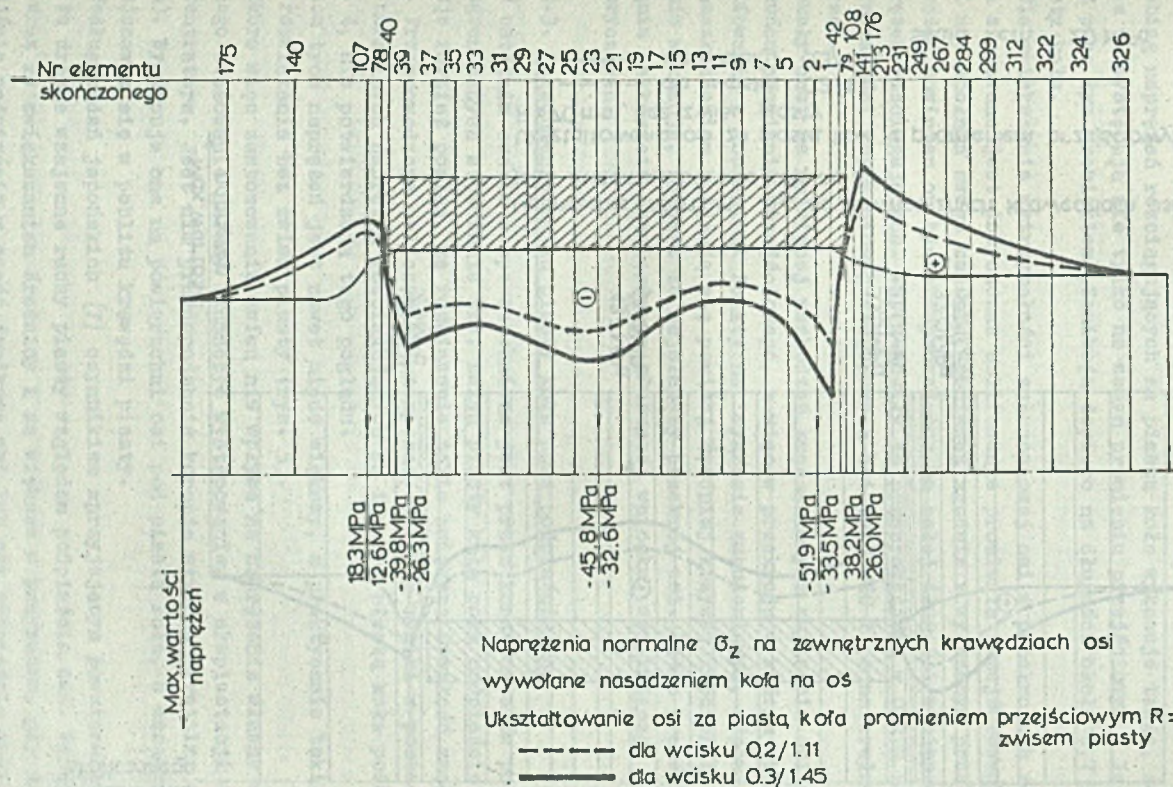
Ukształtowanie osi za piastą koła bez promienia przejściowego

- dla wcisku 0,2/1,11
- dla wcisku 0,3/1,45

Skala 1 cm - 20 MPa

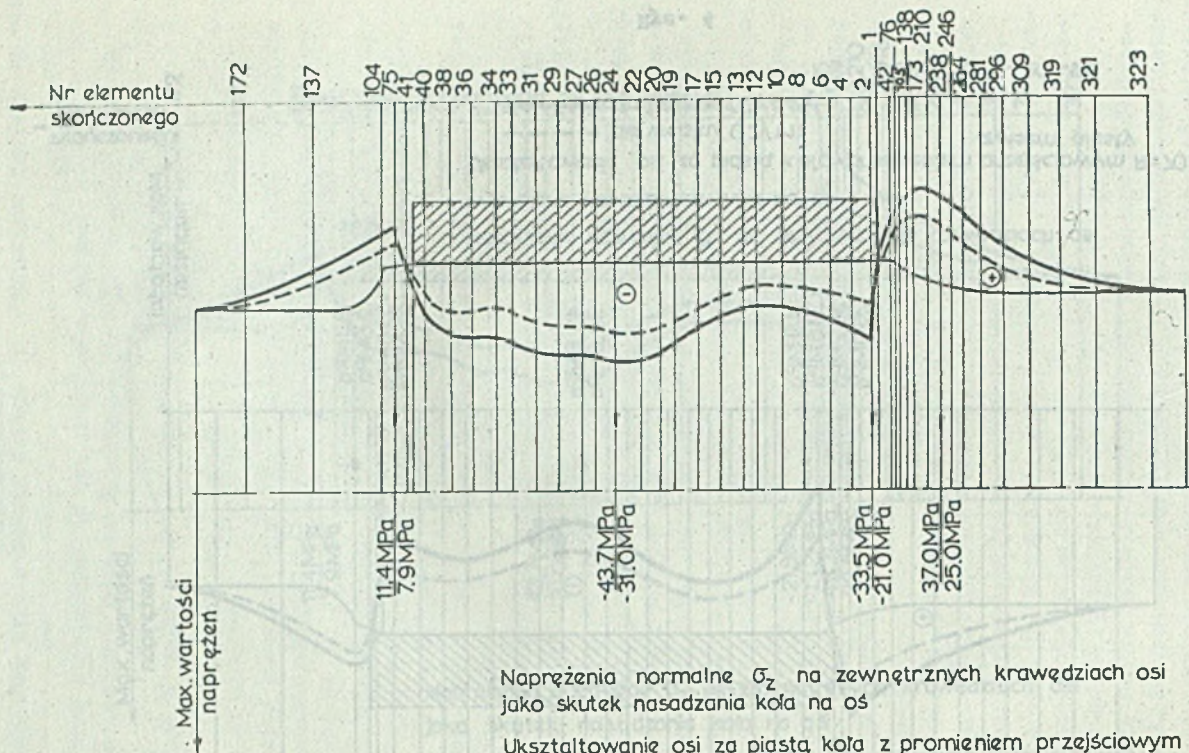
Ryb. 3  
Fig. 3





Rys. 4

Fig. 4



Naprężenia normalne  $\sigma_z$  na zewnętrznych krawędziach osi jako skutek nasadzenia koła na oś

Ukształtowanie osi za piastą koła z promieniem przejściowym  $R=70\text{mm}$ , bez zwisu piasty

----- dla wciśku 02/1.11  
 ————— dla wciśku 03/1.45

Skala 1 cm - 20 MPa

Rys. 5  
 Fig. 5

Wykresy na rysunku 3, 4, 5 wykonane linią przerywaną odnoszą się do woisku w  $\approx 0,2$  mm. Jest to minimalna wielkość wymagana przez przepisy kolejowe, zapewniająca dostateczną wytrzymałość połączenia woiskowego koła z osi. Wynika z tego, że przez ograniczenie dotychczasowych tolerancji wykonania można zmniejszyć o około 30% naprężenia własne nie tylko w osi, ale także w całym zestawie kołowym.

Przebieg naprężeń rozciągających za piastą koła wykazuje także, że naprężenia te występują nie tylko na samym promieniu przejściowym, lecz również poza tym promieniem. Zanikają dopiero na długości około  $0,7 D$  od piasty koła.

Dla zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej osi w przekrojach za piastą koła stosowane jest dotychczas szlifowanie promienia przejściowego. Zabieg taki nie spełnia swego zadania, ponieważ zgodnie z wykazanim przebiegiem naprężeń powinien on być przeprowadzony na całej długości występowania naprężeń rozciągających. Potwierdziły to przeprowadzone w OBRPS badania wytrzymałości zmęczeniowej wagonowych osi typu UIC i o naturalnych wymiarach.

Wykazały one, że najwięcej uszkodzeń zmęczeniowych zapiască osi wystąpiło na końcu promienia przejściowego, a więc w przekroju w którym zbiega się szlifowanie z toceniem. Punkty na wykresie zmęczeniowym, odpowiadające tym uszkodzeniom znajdują się poniżej średniej krzywej zmęczenia, co wyraźnie wskazuje, że jest to najsłabszy przekrój osi. Zatem przedstawione badania całkowicie potwierdzają słuszność wniosku, wynikającego z obliczeń numerycznych.

#### 4.3. Zagadnienie zwisu piasty koła poza podpiască osi

W ostatnim czasie rozpowszechnione jest przez konstruktorów polskich i zagranicznych stosowanie tzw. zwisu piasty koła poza podpiască osi. Panuje również pogląd, że rozwiązanie takie zwiększa trwałość zmęczeniową osi. Przeprowadzone obliczenia numeryczne, których wyniki w postaci wykresów normalnych naprężeń rozciągających za i przed piastą koła podano na rys. 4, nie potwierdzają tego poglądu.

Poziom tych naprężeń jest nawet nieco większy, a praktycznie taki sam jak dla rozwiązania bez zwisu piasty (rys. 5).

Skoro więc zastosowanie zwisu nie wpływa na naprężenia własne w osi, to jego stosowanie należy tłumaczyć występowaniem w eksploatacji innego koncentratora. Jest nim prawdopodobnie korozja stykowa (fretting corrosion). Występuje ona na powierzchni osi pod piastą koła, a szczególnie umiejscawia się w pobliżu krawędzi piasty.

Według badań japońskich [7] czynnikiem sprzyjającym powstawaniu korozji są drobne wzajemne ruchy piasty względem podpiască osi. Wzrastają one wraz ze zwiększaniem średnicy i są większe w przypadku, gdy nie ma przejścia podpiască w część środkową osi lub gdy podpiască wystaje poza krawędź piasty.

Badania japońskie wykazały również, że zwis piasty koła poza podpiască osi znacznie opóźnia powstawanie korozji stykowej, przy czym zwis 5 mm jest najbardziej korzystny.

Przedstawiony pogląd na zjawisko korozji stykowej potwierdzają w pewnym stopniu obliczenia numeryczne nacisków powierzchniowych między kołem a osią, których wyniki przedstawiono na rys. 2.

Obliczenia te wykazują mianowicie, że w przypadku zastosowania zwisu naciski powierzchniowe na początku styku krawędzi piasty z osią są znacznie większe niż w innych rozwiązaniach.

Występuje więc dodatkowy zaosk piasty koła na jej krawędziach. Tym samym ruchy względne piasty i osi są bardziej ograniczone.

#### 4.4. Zagadnienie naprężeń własnych w kole bosym

Trójwymiarowy stan naprężeń, jaki zostaje wywołany w kole bosym w procesie wytwarzania zestawu kołowego, wyznaczono metodą numeryczną na przykładzie wagonowego zestawu kołowego typu UIC.

Wyniki obliczeń zestawiono w postaci wykresów przedstawiających przebieg poszczególnych składowych stanu naprężenia na zewnętrznej i wewnętrznej krawędzi koła oraz map umożliwiających oszacowanie ich wartości w całym przekroju / Koła.

Rysunek 6 ilustruje przebieg naprężeń dla składowej promieniowej. Składowa ta posiada największy wpływ na wyężenie materiału koła bosego. W miejscach przegięcia tarczy wywołuje ona bardzo duże naprężenia ściskające, które są na poziomie doraźnej granicy wytrzymałości materiału ( $R_m = 400 - 500$  MPa).

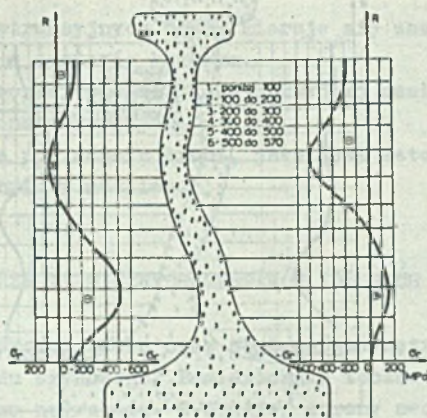
Znacznie mniejsze są naprężenia rozciągające, które występują na przeciwnych krawędziach przegięcia tarczy koła. Analogiczny przebieg, lecz o dużo mniejszych wartościach, wykazuje składowa stanu naprężenia w kierunku obwodowym (rys. 7).

Pozostałe składowe, tj.  $\sigma_z$  oraz  $\tau_{rz}$ , nie mają istotnego znaczenia dla analizy stanu naprężenia, ponieważ wartości ich są tak małe, że praktycznie mogą być pominięte. Niemniej jednak na rys. 8 przedstawiono przebieg naprężeń zredukowanych, obliczonych z uwzględnieniem wszystkich składowych trójkierunkowego stanu naprężenia zgodnie z hipotezą Hubera, Misesa, Hanky'ego:

$$\sigma_{red}^I = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + 6(\tau_{rz}^2 + \tau_{zt}^2 + \tau_{rt}^2)}$$

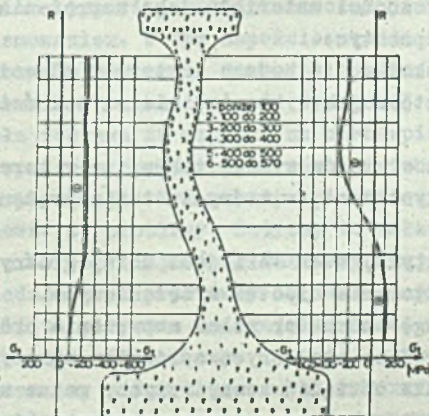
Z przedstawionych na rys. 8 wykresów wynika, że w miejscach przegięcia tarczy koła naprężenia zredukowane przekraczają znacznie granicę plastyczności materiału.

Taki przebieg naprężeń jest charakterystyczny nie tylko dla koła zestawu kołowego typu UIC, ale również innych analizowanych numerycznie zestawów



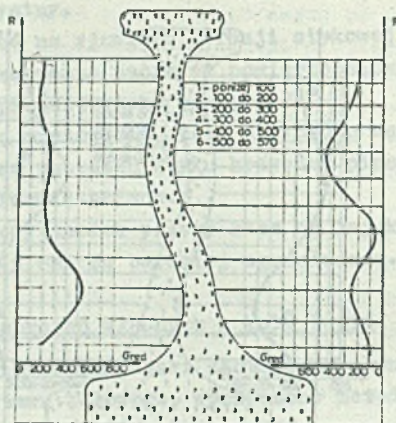
Rys. 6. Mapa naprężeń promieniowych  $\sigma_r$  (MPa) w kole bosym oraz przebieg tych naprężeń na krawędziach tarczy koła

Fig. 6. A map of radial stresses  $\sigma_r$  (MPa) in wheel centre and distribution of that stresses at the boundary of the of wheel plate



Rys. 7. Mapa naprężeń obwodowych  $\sigma_t$  w kole bosym oraz przebieg tych naprężeń na krawędziach tarczy koła

Fig. 7. A map of circumferential stresses  $\sigma_t$  in wheel centre and distribution of the stresses at the boundary of wheel plate



Mapa naprężeń promiennych  $\sigma_r$  MPa  
 oraz ich przebieg na krzywiznach tarczy koła

$$\sigma_{red} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{6 \cdot \sigma_r^2 + 6 \cdot \sigma_r \cdot \sigma_{\theta} + 6 \cdot \sigma_{\theta}^2}$$

Rys. 8

Fig. 8

kołowych, nie wyłączając tych, które przeszły długotrwałą eksploatację. Należy więc uznać, że kryterium oceny konstrukcji koła [4], które określa granicę plastyczności materiału jako naprężenia dopuszczalne, nie posiada pokrycia w praktyce.

Można także wnioskować, że podane kryterium odnosi się do dotychczasowych metod obliczeń, które jak wykazano, nie są tak ścisłe jak metoda numeryczna.

Z przedstawionych wykresów wynika także, że w tarczy koła występują lokalne obszary uplastycznione, w których stan naprężenia jest typu dwukierunkowego ściskania.

Jak wykazuje praktyka, stan taki jest mniej groźny, niż wynikałoby to z formalnego potraktowania hipotez wyciężeniowych.

Biorąc pod uwagę charakter stanu naprężenia oraz fakt, że materiał rzeczywisty w strefach otoczonych ośrodkiem sprężystym ulega wzmocnieniu na skutek działania obciążeń zewnętrznych, można uznać, że lokalne uplastycznienie nie jest zjawiskiem zagrażającym bezpieczeństwu.

Słuszność takiego podejścia potwierdzają również dane z literatury fachowej [8] oraz długotrwała eksploatacja zestawów kołowych typu UIC.

Niezależnie od wykazanych poglądów w praktyce konstrukcyjnej odczuwa się wyraźnie brak formalnego kryterium oceny istniejącego stanu naprężenia w zestawach kołowych.

Uważa się, że zagadnienie to powinno być rozwiązane w ramach prac UIC-ORE i PKP jako stały członek tych organizacji powinien z takim wnioskiem wystąpić.

W bieżących pracach konstrukcyjnych OBRPS kieruje się zasada najmniejszych naprężeń własnych w zestawie kołowym.

Decyzja dotycząca ostatecznej postaci konstrukcyjnej następuje po analizie szeregu wariantów konstrukcyjnych.

Należy zaznaczyć, że bez posiadania broni, jaką jest metoda numeryczna, postępowanie takie nie byłoby możliwe.

## 5. ZAGADNIENIE OBCIĄŻEŃ TERMICZNYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Wraz ze wzrostem prędkości ruchu oraz obciążeń zewnętrznych zwiększa się moc hamowania pojazdu szynowego. Powierzchnia toczna kół zestawu ulega coraz bardziej silnemu nagrzananiu. Z drugiej strony swobodna ekspansja termiczna jest częściowo lub całkowicie ograniczona przez chłodniejszy, leżący poniżej materiał. Doprowadza to niesjednokrotnie do trwałych odkształceń materiału powierzchniowego, które z kolei powodują powstanie resztkowych (szczałkowych) naprężeń rozciągających. Wraz ze wzrostem ilości cykli naprężenia te mogą doprowadzić do pęknięcia zmęczeniowego koła. Ograniczenie ekspansji termicznej materiału jest zatem podstawowym elementem w termicznym procesie zmęczenia.

Stosunkowo małą ilość cykli, przy której występują pęknięcia termiczne, tłumaczy definicję procesu jako "zmęczenie niskocykliczne".

W celu zapobiegania takiemu typowi pęknięć konieczna jest znajomość stanu naprężenia wywołanego hamowaniem. W tym aspekcie metoda numeryczna ma szczególne znaczenie. Pozwala bowiem na dokładną analizę tego zagadnienia już w procesie projektowania w zależności od wymaganej mocy hamowania. Należy zaznaczyć, że koła zestawu ze względu na niebezpieczeństwo wynikające z luzowania się i spadania obręczy, jak również ich pęknięcia stwarzają wiele problemów w eksploatacji. Wykorzystywanie metody numerycznej powinno znacznie wyeliminować te problemy. Dotyczy to zwłaszcza zagadnienia spadania i luzowania się obręczy. Zjawiska takie wynikają z faktu, że naprężenia termiczne posiadają znak przeciwny do znaku naprężeń wywołanych zaciskiem obręczy. Jeżeli te pierwsze osiągają wartości większe od drugich, musi nastąpić luzowanie się obręczy.

Jak wykazały doświadczenia, z dotychczasowych wykorzystywał metody numerycznej, znajomość termicznego i montażowego stanu naprężenia pozwala na taki dobór wcisku między kołem bosym a obręczą, aby zapewnić dostateczną nośność połączenia. Z doświadczeń tych wynika także, że pole odkształceń i naprężeń wywołanych hamowaniem ma lokalny wpływ na stan wyężenia obręczy, osiąga jednak wartości przekraczające granicę plastyczności ma-

teriału. Nie jest to bez znaczenia wobec opisanego mechanizmu pęknięć termicznych.

Należy jednak zaznaczyć, że obliczenia wykonywano przy założeniu mocy hamowania 40 kW w ciągu 20 min. Jest to więc bardzo ciężki warunek, który zdaniem autora nie zachodzi w warunkach krajowej eksploatacji. Niemniej jednak należy uznać za konieczne przeprowadzenie odpowiednich prac naukowo-badawczych, mających na celu ustalenie rzeczywistych obciążeń termicznych.

#### 6. DOTYCHCZASOWE DOŚWIADCZENIA, WYTYCZNE I WNIOSKI, WYNIKAJĄCE Z WYKORZYSTYWANIA METODY NUMERYCZNEJ W PROCESIE PROJEKTOWANIA ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Z dotychczasowego wykorzystywania metody numerycznej wynika, że wiele zagadnień związanych z trwałością i niezawodnością zestawów kołowych może być rozwiązywanych w sposób bardziej ścisły i w szerszym zakresie, niż pozwalają na to metody konwencjonalne. Najważniejsze z tych zagadnień starano się możliwie zwięźle przedstawić. Wykazane duże możliwości badawcze metody numerycznej sprawiły, że weszła ona na stałe do praktyki konstrukcyjnej OBRPS, z której wynika szereg konstruktywnych wniosków, a mianowicie:

- Proces projektowania przy udziale metody numerycznej powinien być ukierunkowany na analizę stanu naprężenia różnych rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych elementów zestawu kołowego. Postępowanie takie daje bowiem uzasadnioną podstawę do podjęcia ostatecznej decyzji wyboru najbardziej właściwego rozwiązania.
- W zakresie konstrukcji obręczowanych zestawów kołowych za najbardziej korzystne rozwiązanie należy uznać zestaw, posiadający tarczę koła w kształcie litery S ze znacznym wyobleniem oraz symetryczną względem osi tocznej piastę koła.

Rozwiązanie takie jest zalecane, ale nie wyklucza się możliwości, że dalsze doświadczenia doprowadzą do lepszego rozwiązania.

- W istniejących zestawach kołowych występują bardzo duże wciski w połączeniu wciskowym koła z osią oraz skurczowym koła bosego z obręczą. Dlatego przy konstrukcji nowych zestawów kołowych należy na to zagadnienie zwrócić szczególną uwagę i kierować się zasadą jak najmniejszych naprężeń własnych w zestawie kołowym.

Zaleca się przyjmować co najwyżej średnią wartość wcisku, wynikająca z dolnej i górnej granic, określonych przez przepisy kolejowe.

- Znaczny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową zestawu kołowego posiada karb technologiczny wywołany nasadzeniem koła na oś. Kształt zapięcia osi powinien zatem wynikać z dokładnej analizy wielkości normalnych naprężeń



rozciągających, charakterystycznych dla tego typu karbu. Należy zaznaczyć, że ukasztowanie zapiaścia promieniem przejściowym  $R = 75$  mm jest rozwiązaniem wskazanym, ale nie wyklucza się istnienia innego, lepszego rozwiązania.

Ważnym elementem w zmniejszaniu skutków działania tego karbu jest również zastosowanie odpowiedniej obróbki wykańczającej w zapiaściu osi. Rolowanie wygładzające lub szlifowanie powinno być zastosowane nie tylko na promieniu przejściowym, lecz na całej długości występowania naprężeń rozciągających, jakie wynikają z obliczeń numerycznych.

- Bardzo dużą rolę w procesie projektowania odgrywa analiza naprężeń termicznych, wywołanych hamowaniem pojazdu. Niejednokrotnie obliczenia numeryczne wykazały, że może dochodzić do luzowania się obręczy na skutek niewłaściwego doboru wcisku w połączeniu skurczowym koła bosego z obręczą. Pozwoliło to na wyeliminowanie tego zjawiska już w procesie projektowania. Zaznacza się, że ze względu na bezpieczeństwo zjawisko luzowania obręczy nie powinno mieć miejsca nawet przy działaniu mocy hamowania 40 kW w ciągu 20 min.

- W tarczy koła i obręczy występują obszary uplastycznione, charakteryzujące się dwuosiowym ściskaniem. Obszary takie występują szczególnie w zestawach kołowych będących w długotrwałej eksploatacji, nie można ich również wyeliminować całkowicie przy konstrukcji nowych zestawów kołowych.

Z dotychczasowych doświadczeń z eksploatacji można wnioskować, że zjawisko to jest mniej groźne, niż wynikałoby to z formalnego potraktowania hipotez wyciężeniowych.

Niemniej jednak należy uznać za konieczne przeprowadzenie odpowiednich prac naukowo-badawczych, które miałyby na celu opracowanie kryterium oceny takiego stanu naprężenia.

- Dotkliwie odczuwa się brak odpowiednich danych w zakresie obciążeń termicznych, wynikających z hamowania pojazdu. Prace w tym aspekcie powinny być uznane za szczególnie pilne.

- Przy praktycznym wykorzystywaniu metody numerycznej zaleca się zwrócić szczególną uwagę na geometryczną dyskretyzację siatek elementów skończonych. Wielkość tych elementów nie powinna być zbyt duża, a wszystkie przejścia z większych do mniejszych elementów powinny być wykonane w sposób możliwie ciągły.

W wielu przypadkach bardzo dobre i dokładne wyniki osiąga się przez zastosowanie metody trepanacji.

- Mimo wykazanych zalet metody numerycznej, w praktycznych zastosowaniach wymaga ona znacznej pracochłonności i kosztów związanych ze stosunkowo długim czasem pracy maszyny cyfrowej.

W tym aspekcie należałoby postulować dalsze prace nad udoskonaleniem metody. Za szczególnie przydatne uważa się opracowanie odpowiednich programów na komputery osobiste.

## 7. PRZEWIDYWANE WYKORZYSTANIE METODY NUMERYCZNEJ W PRZYSZŁOŚCI

Nowoczesne konstrukcje eliminują całkowicie obciążone zestawy kołowe, które nie sprostają współczesnym wymaganiom w zakresie zwiększenia obciążeń, wzrostu prędkości ruchu, bezpieczeństwa i komfortu podróżowania.

Rozwijana jest natomiast konstrukcja zestawów z kołami monoblokowymi w kierunku minimalizacji ciężaru własnego, zwiększania odporności na obciążenia termiczne, zmniejszania zużycia powierzchni tocznych itp.

Z dotychczasowych doświadczeń produkujących kolei na świecie (Japonia, Francja, RFN) wynika, że supremacja monoblokowych zestawów kołowych nad obciążonymi jest tak duża, że koleje te od wielu lat eksploatują na głównych magistralach wyłącznie zestawy monoblokowe z wynikiem bardzo pozytywnym. W celu zapewnienia wysokiej odporności na zużycie stosuje się powszechnie w tego typu zestawach tzw. powierzchniowe ulepszenie cieplne wieńca na głębokości około 40 mm i twardości rzędu 290 do 300 HB. W ten sposób powstaje twarda powierzchnia toczna koła powiązana z bardziej miękką tarczą koła. Pozwala to jednocześnie na zmniejszenie zapasu na zużycie do wielkości 25 do 30 mm, co z kolei powoduje znaczne obniżenie ciężaru własnego kół.

Niezależnie od tego w wyniku obróbki cieplnej powstają w wieńcu koła naprężenia ściskające, które znacznie przeciwdziałają nagłym pęknięciom zmęczeniowym, rozpoczynającym się na powierzchni tocznej w wyniku obciążeń cieplnych przy hamowaniu.

Wobec wykazanych tendencji rozwoju oraz bezspornych zalet konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, stworzenie możliwości produkcji kół monoblokowych z ulepszonym cieplnie wieńcem w warunkach krajowych staje się techniczną i ekonomiczną koniecznością.

Zatem równolegle z przygotowaniem, dotyczącymi bazy produkcyjnej tego typu zestawów kołowych, powinny być podjęte odpowiednie prace konstrukcyjne i badawcze, zabezpieczające przyszłą produkcję seryjną przebadanych, a więc niezawodnych zestawów kołowych.

Wobec braku doświadczeń w tym zakresie należy uznać, że metody numeryczna, wzbogacona wynikami odpowiednich badań, będzie stanowić podstawę konstrukcji takich zestawów. Prace badawcze powinny być ukierunkowane głównie na:

- wyznaczenie ilości ciepła wprowadzonej do kół zestawu w procesie obróbki cieplnej wieńca i określenie stanu naprężenia w kole w wyniku takiej obróbki,
- wyznaczenie rzeczywistych obciążeń termicznych, wywołanych hamowaniem w różnych warunkach eksploatacji.

## LITERATURA

- [1] Prace naukowo-badawcze COBiRTK, temat 3315/11.
- [2] Materiały 8 Kongresu Zestawów Kołowych. Madryt, kwiecień 1985.
- [3] Bąk R., Grajek K., Zachorski M.: Metoda numeryczna analizy statycznej stanu naprężenia w kolejowych zestawach kołowych. IPKM. Zeszyt 27/61. Gliwice 1977.
- [4] Gasowski W., Stasiak L.: Wytrzymałość połączeń wciskanych w zestawach kołowych pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe nr 1/1980.
- [5] Stasiak L.: Ocena wytrzymałości zmęczeniowej elementów nośnych pojazdów szynowych na przykładzie osi zestawów kołowych. Pojazdy Szynowe nr 2/78.
- [6] Stasiak L.: Obliczenia osi zestawów kołowych typu UIC metody elementów skończonych. Prace OBRPS nr OR-6381.
- [7] Tanaka S., Hatsuno K., Mohri B.: Fretting Corrosion and Fatigue Streight of Wheel - Seat of Car - Axle. Quarterly Reports, Vol 17, Nr 1, 1976.
- [8] Zottman W.: Absuchazung der Betriebssicherheit von bereiften Eisenbahnradkorpem aufgrund statischer und dynamischer Untersuchungen. Międzynarodowy Kongres Zestawów Kołowych, München 1966.

Recenzent: Doc. dr inż. Roman BĄK

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ЯВЛЯЮЩИЕСЯ РЕЗУЛЬТАТОМ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОГРАММЫ "КОЛО" В ПОЗНАНСКОМ НАУЧНОИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ЦЕНТРЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

## Р е з ю м е

В работе помещено общее описание системы программы "КОЛО" использованных для померного анализа, напряжении в железнодорожных колесных парах. Обсуждено использование этого метода для оценки прочности прессового соединения колеса с осью. Проанализировано вопросы технологического рифла получаемого в результате напраессовки колеса на ось, провисания ступицы колеса за подступичную часть оси а также термических напряжкки в условиях созданных вомерными методами. Сформупировано предложения и рекомендации будудие ре-зультатом практического использования системы програм "КОЛО" в процессе проектно-конструкторских разработек железнодорожных колесных пар.

INFERENCES AND PRESCRIPTIONS FOR DESIGNING AS A RESULT OF USING SYSTEM OF COMPUTER PROGRAM "KOLO" IN RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTRE OF RAIL VEHICLE IN POZNAN

Summary

The paper inserts a general description of system of computer programs "KOLO", which is used for numerical analysis of state of stress in railway wheel sets. This method has been applied for evaluation resistance of force joint of axle with wheel.

A production notch caused by forcing wheel on axle was analysed, as well as overhung wheel hub over subhub of axle and thermal stresses. It new facilities was created by a numerical method.

Inferences and prescriptions have been resulted of applying programs "KOLO" to designing railway wheel sets.