

Adam DACKO, Andrzej WÓJTOWICZ

## ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA KOŁA BEZOBREŃCZOWEGO DLA NACISKÓW 25,5 T NA OŚ PODDANEGO OBCIĄŻENIOM TERMICZNYM

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono sposób przeprowadzenia i wyniki numerycznej symulacji badań kół bezobreczowych wykonywanych na stanowisku hamulcowym. Obliczenia wykonano dla koła nowego o średnicy nominalnej 920 mm i dla koła maksymalnie zużytego, którego średnicę wyznacza położenie rowka kontrolnego na bocznej zewnętrznej powierzchni wieńca koła. Otrzymanie pozytywnego wyniku obliczeń komputerowych pozwala oczekiwać pozytywnego wyniku testu.

## STRENGTH ANALYSIS OF A SOLID 25,5 T AXLE LOAD WHEEL SUBJECT TO THERMAL LOADS

**Summary.** The paper presents the modeling approach and the results of numerical simulation of the thermal loads acting on a solid wheel during the bench tests. The numerical (FEM) analysis was performed for two sets of geometry of the wheel: a new wheel (nominal diameter of 920 mm) and a used one, where the worn-out portion of material reaches the control groove at the side surface of the wheel. The acceptable result of numerical simulation of the thermal load allows expecting the favorable results of the bench tests.

### 1. WSTĘP

Koła bezobreczowe eksploatowane w ruchu międzynarodowym spełniać muszą liczne wymagania, które szczegółowo opisane są między innymi w opracowanym przez Komitet ERRI B-169 projekcie nowej karty UIC p.t. "Aprobata techniczna kół bezobreczowych" (Technical Approval of Solid Wheels) [1]. Dokument zawiera między innymi szczegółowy opis badań stanowiskowych, jakim poddane musi być koło w celu określenia jego odporności na obciążenia cieplne, wywołane hamowaniem klockami. W niniejszym referacie przedstawiono sposób przeprowadzenia i wyniki numerycznej symulacji takich właśnie testów. Otrzymanie pozytywnego wyniku obliczeń komputerowych pozwala oczekiwać pozytywnego wyniku testu. Analizę wykonano przy użyciu systemu MSC.NASTRAN współpracującego z pre/post procesorem MSC.PATRAN na komputerze Silicon Graphics O2. Obliczenia wyko-

nano dla koła nowego o średnicy nominalnej 920 mm i dla koła maksymalnie zużytego, którego średnicę wyznacza położenie rowka kontrolnego na bocznej zewnętrznej powierzchni wieńca koła.

## 2. DANE WEJŚCIOWE DO OBLICZEŃ

Zestawienia danych wyjściowych do obliczeń dokonano odpowiednio do przyjętej za [1] metodyki. Obejmują one parametry cyklu hamowania oraz charakterystyczne dane materiałowe w zależności od temperatury:

- |   |   |
|---|---|
| 1) masa przypadająca na oś (wywierająca nacisk)                             | $m = 25.5 \text{ t}$ ,                      |
| 2) stała prędkość symulowanej jazdy   | $v = 60 \text{ km/h} = 16.67 \text{ m/s}$ , |
| 3) gradient nachylenia zbrocza na którym symuluje się jazdę                 | $f = 0.021$ ,                               |
| 4) czas hamowania   | $t_h = 45 \text{ min}$ ,                    |
| 5) czas chłodzenia koła pomiędzy kolejnymi hamowaniami                      | $t_s = 5 \text{ h}$ ,                       |
| 6) opory toczenia koła przy nacisku 22.5 t/oś (do ekstrapolacji)            | $T_{22.5} = 0.68 \text{ kN}$ ,              |
| 7) materiał koła: stal R7 o granicy plastyczności w normalnej temperaturze: |   |
| - dla tarczy  | $R_e = 430 \text{ MPa}$ ,                   |
| - dla wieńca  | $R_e = 520 \text{ MPa}$ ,                   |
| 8) właściwości materiałowe stali w podwyższonych temperaturach wg [2]:      |   |

Tablica 1

Wielkość Fizyczna	Temperatura T [ $^{\circ}\text{C}$ ]						
	20	100	200	300	400	500	600
Masa właściwa $R_o \text{ [kg/m}^3\text{]}$	7847.5	7827.5	7797.5	7770.0	7730.0	7700.0	7660.0
Moduł Younga $E \text{ [Mpa} \cdot 10^6\text{]}$	0.2075	0.2020	0.1995	0.1875	0.1795	0.1710	0.1615
Ciepło właściwe $C_p \text{ [J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}]\text{]}$	470	480	500	520	540	565	595
Przewodność cieplna $K \text{ [J/s} \cdot \text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}]\text{]}$	52.0	50.0	48.8	45.0	42.0	38.5	34.5
Współczynnik Poissona $\nu$	0.330	0.335	0.340	0.345	0.350	0.360	0.370
Współczynnik rozszerzalności $\alpha \text{ [} 10^{-6}/^{\circ}\text{C}]\text{]}$	10.90	11.45	12.25	12.85	13.45	14.05	14.55

### 3. OBCIĄŻENIA KOŁA I KRYTERIA OCENY

#### 3.1. Wyznaczenie obciążenia cieplnego koła

Wyznaczenie obciążenia cieplnego koła sprowadza się do obliczenia tej części mocy sił tarcia klocków o koło, która w postaci strumienia ciepła wprowadzana jest w materiał koła podczas symulowanej jazdy. Moc hamowania przypadająca na jedno koło, potrzebna do zachowania stałej prędkości  $v$  przy jeździe w dół po torze o nachyleniu  $f$ , przy nacisku na oś  $m$  i uwzględnieniu oporów toczenia wynosi  $P = 39.7 \text{ kW}$ . Ponieważ część ciepła wytworzonego na powierzchni kontaktu koła i klocków przejmowana jest przez klocki i bezpośrednio przez otoczenie, zakłada się [2], że tylko 75% mocy hamowania przejmowana jest przez koło, co w rezultacie daje jego obciążenie na poziomie 29.8 kW.

#### 3.2. Kryteria oceny

Kryteria oceny wg [1] sformułowano dla nowego wieńca i dla wieńca o maksymalnym dopuszczalnym zużyciu. Obejmują one:

- wartości przemieszczeń w kierunku osi zestawu tego punktu leżącego na obrzeżu koła, w którym mierzy się grubość obrzeża: na gorąco w stanie maksymalnego nagrzania po zakończeniu pojedynczego hamowania i na zimno po zakończeniu całej próby, obejmującej dziesięć cykli hamowań,
- wartości pozostających naprężeń obwodowych w wieńcu po zakończeniu całej próby i wychłodzeniu wieńca do temperatury otoczenia.

Dla nowego wieńca:

- wartość przemieszczenia na gorąco nie może przekraczać zakresu +3.0 / -1.0 mm,
- przemieszczenia pozostające po wychłodzeniu koła do temperatury otoczenia nie mogą przekraczać zakresu +1.5/ -0.5 mm,
- poziom naprężeń obwodowych po zakończeniu próby i wychłodzeniu koła nie może przekraczać +200 N/mm<sup>2</sup>.

Dla koła o granicznym zużyciu:

- wartość przemieszczenia na gorąco nie może przekraczać zakresu +3.0 / -1.0 mm,
- przemieszczenia pozostające po wychłodzeniu koła do temperatury otoczenia nie mogą przekraczać zakresu +1.5/ -0.5 mm,
- poziom naprężeń obwodowych po zakończeniu próby i wychłodzeniu koła nie może przekraczać +250 N/mm<sup>2</sup>.

Dodatnia wartość przemieszczenia wieńca oznacza wzrost rozstawu kół, ujemna - jego zmniejszenia. Graniczna wartość naprężeń pozostających jest wartością uśrednioną na całej grubości wieńca [1].

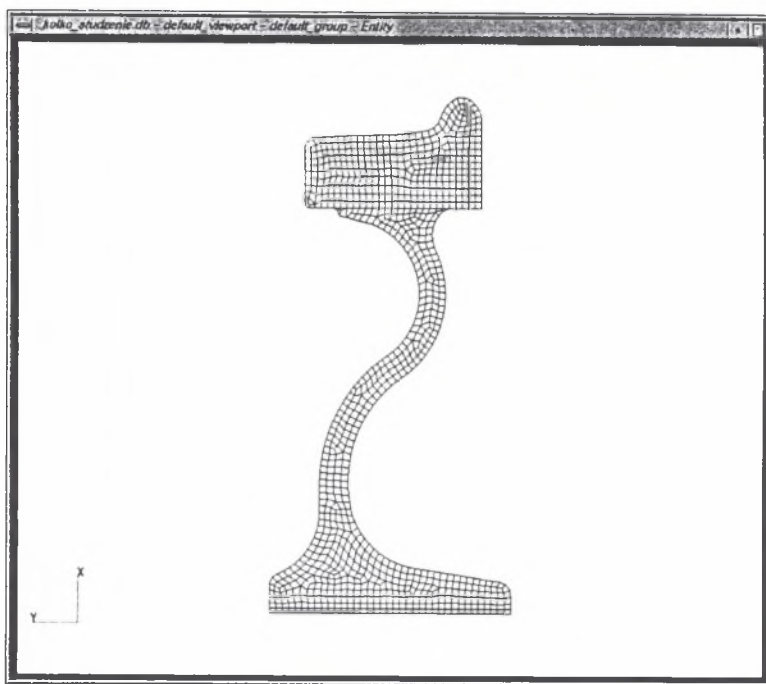
## 4. PRZYGOTOWANIE DANYCH DO OBLICZEŃ

### 4.1. Budowa modelu obliczeniowego

Ze względu na osiową symetrię koła i jego obciążenia, zamodelowano tylko wycinek koła o kącie rozwarcia wynoszącym 1°, używając w tym celu ponad 900 ośmiowęzłowych elementów bryłowych typu CHEXA8 mających łącznie 2080 węzłów. Własności materiałowe

stali w podwyższonych temperaturach przyjęto za [2], wyspecyfikowano je w 1. Siatkę elementów modelu pokazano na rys. 1.

#### 4.2. Obciążenia modelu obliczeniowego i warunki brzegowe



Rys. 1. Siatka elementów modelu obliczeniowego

Fig. 1. Net of the elements used in model

Analizowana struktura pracuje w złożonych warunkach obciążeniowych, umożliwiających jednak rozseparowanie obliczeń termicznych i mechanicznych (brak sprzężeń termomechanicznych). W związku z tym merytorycznie poprawne jest osobne analizowanie nieustalonych stanów termicznych (przewodzenie, promieniowanie i unoszenie ciepła) oraz mechanicznych (obciążenia strukturalne od wyznaczonych pól temperatury) z jednoczesnym uwzględnieniem zmienności własności mechanicznych od temperatury oraz nieliniowości fizycznych (stany sprężysto-plastyczne). Analiza składa się zatem z dwóch rozdzielnych przebiegów:

- analiza termiczna (stany nieustalone),
- analiza mechaniczna (strukturalna, nieliniowa).

#### 4.3. Analiza termiczna

Model obliczeniowy struktury (koła) został poddany obciążeniom / warunkom brzegowym wynikającym z charakteru obciążeń wymaganych przepisami i próbami laboratoryjnymi. Przyjęto, iż obciążenia termiczne od tarcia klocków hamulcowych o wieniec koła przykładane są do wienca koła w postaci strumienia energii cieplnej (o wartości wyznaczonej na podstawie przepisów). Założono, iż 75% tej energii jest przejmowane przez wieniec koła, zaś pozostałe 25% jest przejmowane przez klocek lub rozpraszane. Płaszczyzny symetrii konstrukcji i

obciążenia (a zatem i rozwiązania termicznego) określone zostały jako powierzchnie adiabatyczne (brak wymiany ciepła przez te powierzchnie). Na powierzchnie wymieniające energię z otoczeniem przez konwekcję (powierzchnie zewnętrzne modelu z wyłączeniem płaszczyzn symetrii) nałożono warunki brzegowe trzeciego rodzaju (warunki konwekcji swobodnej oraz wymuszonej). Na te same powierzchnie nałożono warunki promieniowania do otoczenia. Zmienność współczynników przewodzenia ciepła, konwekcji i radiacji z temperaturą przyjęto według literatury [2].

Przyjęto obciążenie węzłowymi źródłami ciepła (a nie strumień przypadający na jednostkę powierzchni), ponieważ podejście takie nie wymaga sprawdzania/określania odpowiednich pól ścianek obciążanych cieplnie elementów, natomiast jest merytorycznie równoważne strumieniowi wprowadzanemu w ścianki elementów.

Wyznaczany rozkład temperatur jest zmienny w czasie, a zatem zastosowano analizę tzw. stanów nieustalonych. Polega ona na wyznaczeniu zmiennego w czasie pola temperatury, przy starcie od temperatury otoczenia (temperatura "pokojowa"). Na podstawie znanego wydatku energii w czasie oraz przy istniejących warunkach termicznych przewodzenia, konwekcji i radiacji wyznaczane zostają rozkłady temperatury w czasie. W analizowanym przypadku sama zmienność rozkładu temperatury w czasie nie jest istotna, ważny natomiast jest wynikowy rozkład temperatury po zadanym przepisami czasie hamowania koła (nagrzanie po 45 minutach).

Jako drugi krok analizy termicznej przyjęto stopniowe schładzanie rozgrzanego koła. Przyjęto zatem zerowy strumień dostarczanej energii cieplnej ("zdjęcie" obciążenia termicznego wprowadzanego w wieniec), przy zachowaniu warunków wymiany ciepła (przewodzenie, unoszenie i promieniowanie do otoczenia). W wyniku otrzymano także zmienny w czasie rozkład pola temperatury. Zachowano zmienność współczynników wymiany ciepła z temperaturą.

W obu krokach analizy termicznej przyjęto, iż pojemność cieplna otoczenia jest nieskończenie wielka, co oznaczało przyjęcie stałej temperatury otoczenia (równej  $19^{\circ}\text{C}$  w czasie nagrzewania koła oraz  $0^{\circ}\text{C}$  w czasie studzenia). W wyniku analizy nieustalonych stanów termicznych otrzymano rozkłady temperatury po określonym czasie grzania oraz po określonym czasie chłodzenia.

#### 4.4. Analiza strukturalna

Rozpatrywana struktura utwierdzona jest przez sztywne połączenie z nie podlegającą modelowaniu nieodkształcalną osią zestawu kołowego. Na geometrycznej osi zestawu kołowego odebrano swobodę przemieszczeń wzdłuż osi i nałożono warunki brzegowe właściwe dla symetrii osiowej.

Obciążenie w pierwszym kroku stanowi pole temperatury wywołane grzaniem od hamowania – wyznaczone w pierwszej części przebiegu termicznego. W analizie nieliniowej (możliwe uplastycznienie materiału) wyznaczony zostaje rozkład wielkości mechanicznych – przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w kole. Wyznaczona zostaje historia powstawania wymienionych efektów mechanicznych, ale jak i poprzednio, istotny jest ostateczny, końcowy rozkład tych wielkości, ze szczególnym uwzględnieniem odkształceń plastycznych.

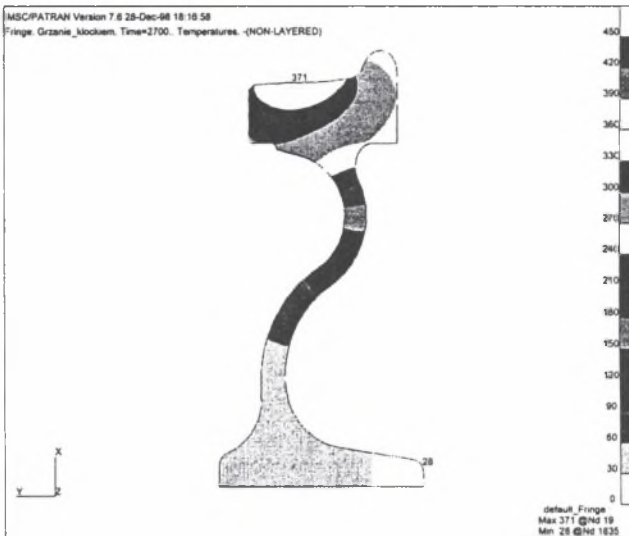
W drugim kroku obciążenia temperaturą (schłodzenie koła, czyli nałożenie pola temperatury wyznaczonego w drugim kroku przebiegu termicznego) następuje redukcja efektów mechanicznych. Jednak powstanie w pierwszym kroku obciążenia odkształceń plastycznych powoduje ustalenie się po schłodzeniu koła trwałych, residualnych stanów naprężenia, i - co za tym idzie, trwałych odkształceń i przemieszczeń. Podkreślić należy, że stan temperatury po schłodzeniu koła nie jest jeszcze w pełni jednorodny i nie osiągnął temperatury otoczenia. Efekt ten ma jednak niewielkie znaczenie praktyczne.

Cykl nagrzewania koła danym strumieniem ciepła przez 45 minut a następnie schładzania przez 5 godzin powtarzany jest dziesięciokrotnie. Wyniki otrzymane dla koła gorącego bezpośrednio po zakończeniu 45-minutowego hamowania stanowią jednocześnie warunki początkowe dla symulacji procesu schładzania koła. Wyniki otrzymane po zakończeniu schładzania stanowią jednocześnie warunki początkowe dla symulacji kolejnego hamowania.

## 5. ZESTAWIENIE I OMÓWIENIE WYNIKÓW

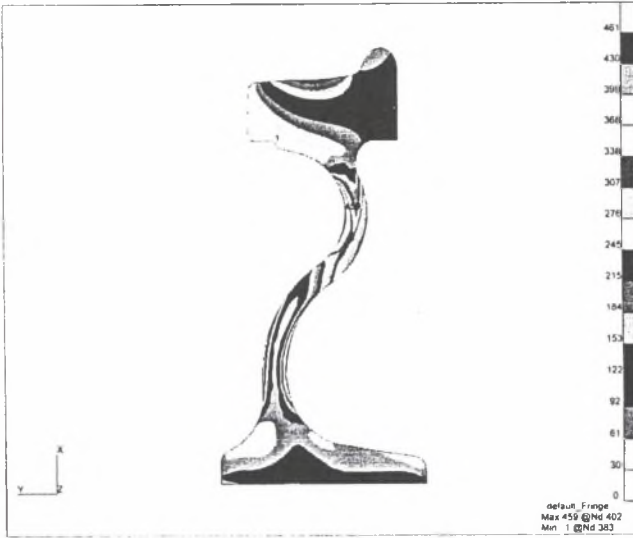
Po przeprowadzeniu symulacji każdego cyklu grzania i chłodzenia koła otrzymywano kolejne zbiory wyników obejmujące:

- rozkład temperatury na przekroju koła,
- rozkład składowych stanu odkształcenia na przekroju koła,
- rozkład składowych stanu naprężenia i naprężeń zredukowanych na przekroju koła,
- rozkład modułów i składowych przemieszczeń na przekroju koła.

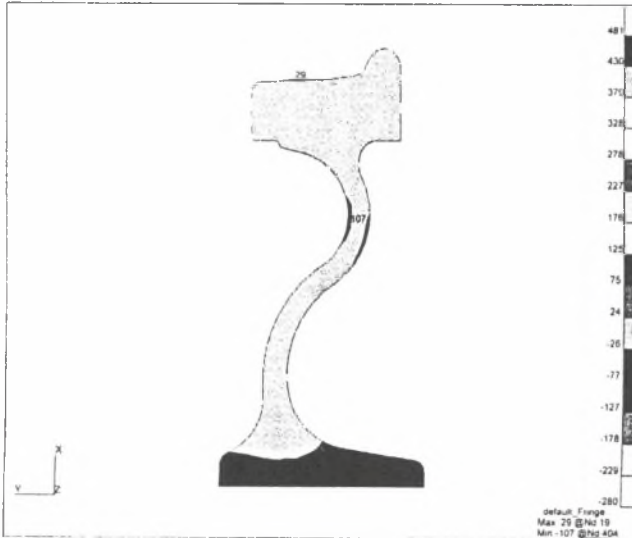


Rys.2. Rozkład temperatury w kole nowym po pierwszym hamowaniu  
Fig. 2. Temperature distribution in new wheel after first braking

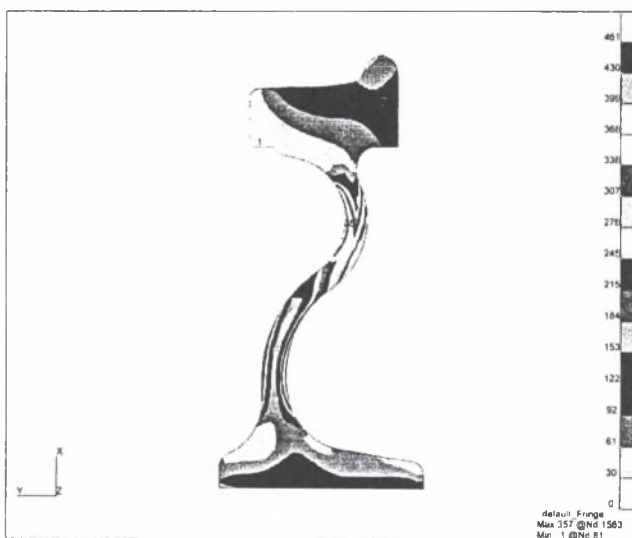
Na rys.2 pokazano rozkład temperatury na przekroju koła nowego bezpośrednio po zakończeniu fazy nagrzewania koła przez hamowanie klockiem. Widać, że maksymalna temperatura przy powierzchni kontaktu koło - klocek osiąga  $371^{\circ}\text{C}$ . W miarę oddalania się od powierzchni kontaktu temperatura maleje, na przejściu wieńca w tarczę wynosi ok.  $250^{\circ}\text{C}$ , w połowie średnicy tarczy spada do ok.  $100^{\circ}\text{C}$  i na piaście koła do  $28^{\circ}\text{C}$ . Rozkład ten jest identyczny dla każdego cyklu hamowania.



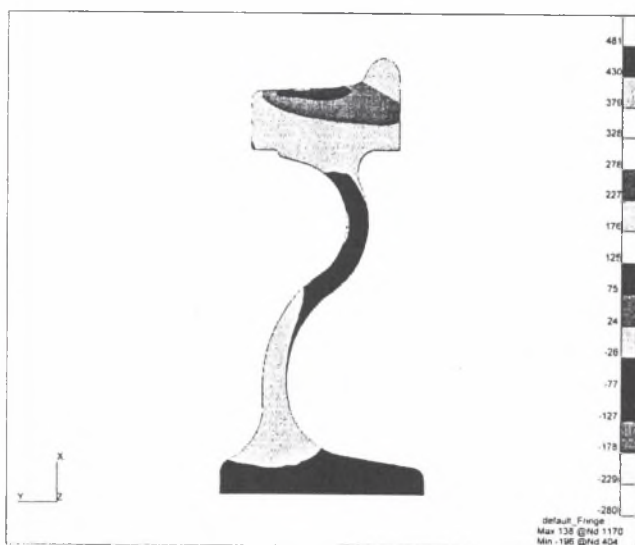
Rys.3. Rozkład naprężeń zredukowanych w kole nowym po pierwszym hamowaniu  
 Fig. 3. Reduced stress distribution in new wheel after first braking



Rys.4. Rozkład obwodowych naprężeń pozostających w kole nowym po pierwszym hamowaniu i schłodzeniu  
 Fig. 4. District stress distribution in new wheel after first braking and cooling

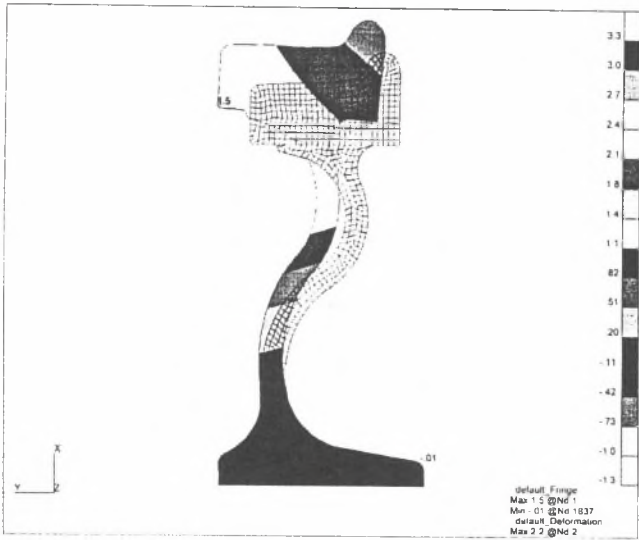


Rys.5. Rozkład naprężeń zredukowanych po dziesiątym hamowaniu  
Fig. 5. Reduced stress distribution after tenth braking

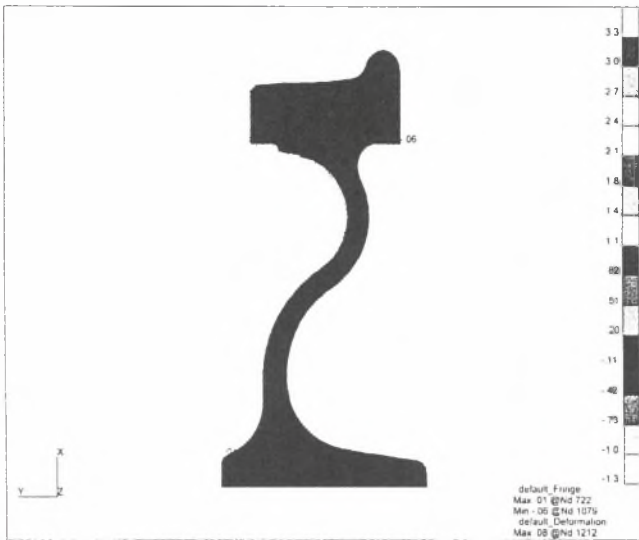


Rys.6. Rozkład obwodowych naprężeń pozostających w kole nowym po dziesiątym hamowaniu i schłodzeniu  
Fig. 6. District stress distribution in new wheel after tenth braking and cooling

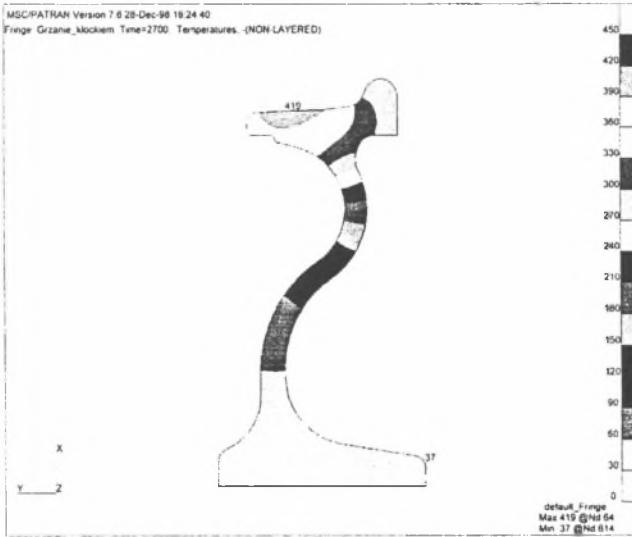




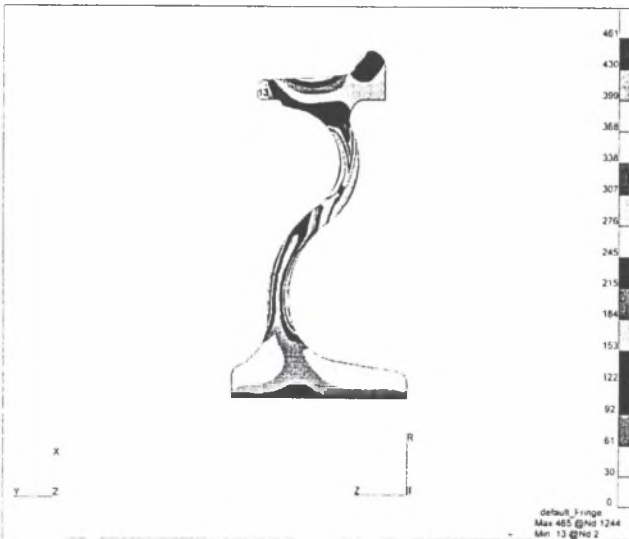
Rys.7. Obraz zdeformowanego koła nowego po zakończeniu dziesiątego hamowania (na gorąco)  
 Fig. 7. The appearance of deformed, new wheel after tenth braking (before cooling)



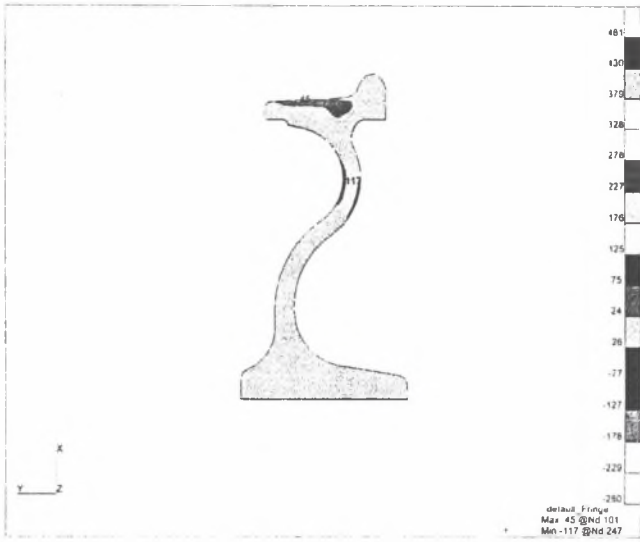
Rys.8. Obraz zdeformowanego koła nowego po dziesiątym hamowaniu i schłodzeniu  
 Fig.8. The appearance of deformed, new wheel after tenth braking and cooling



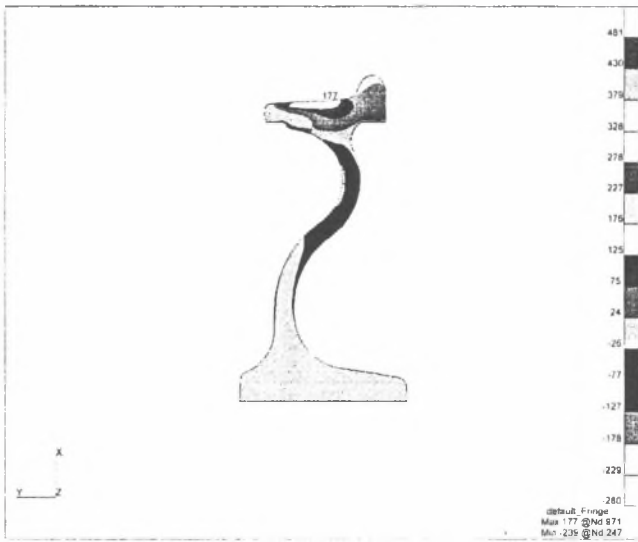
Rys.9. Rozkład temperatury w kole zużyтым po pierwszym hamowaniu  
 Fig.9. Temperature distribution in worm wheel after first braking



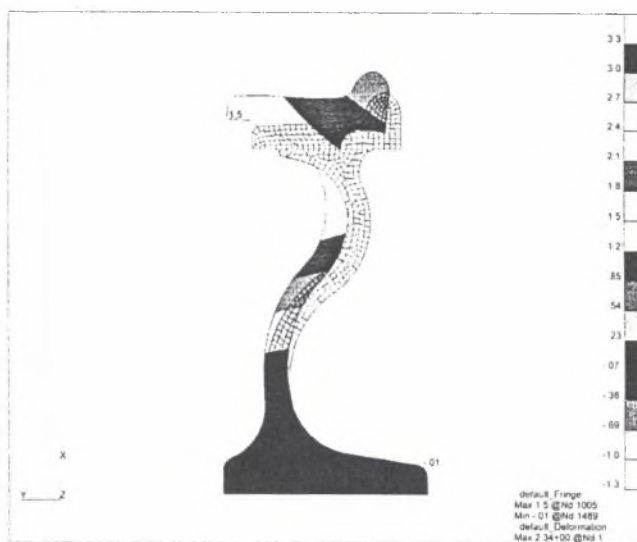
Rys.10. Rozkład naprężeń zredukowanych w kole zużyтым po pierwszym hamowaniu  
 Fig.10. Reduced stress distribution in worm wheel after first braking



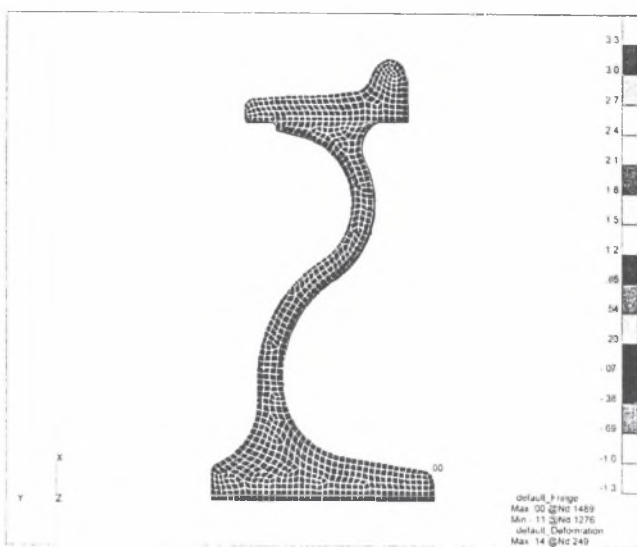
Rys.11. Rozkład obwodowych naprężeń pozostających w kole zużyтым po pierwszym hamowaniu i schłodzeniu  
Fig.11. District stress distribution in worn wheel after first braking and cooling



Rys.12. Rozkład obwodowych naprężeń pozostających w kole zużyтым po dziesiątym hamowaniu i schłodzeniu  
Fig.12. Reduced stress distribution in worn wheel after tenth braking



Rys.13. Obraz zdeformowanego koła zużytego po zakończeniu dziesiątego hamowania (na gorąco)  
 Fig.13. District stress distribution in worm wheel after tenth braking and cooling



Rys.14. Obraz zdeformowanego koła zużytego po zakończeniu dziesiątego hamowania i schłodzeniu  
 Fig.14. The appearance of deformed, heat, worm wheel after tenth braking

Na rys.3 pokazano rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju koła bezpośrednio po zakończeniu pierwszego hamowania (na gorąco). Widoczna jest strefa odkształceń plastycznych, które będą źródłem naprężeń pozostających. Odkształcenia te związane są z silnym zginaniem tarczy koła. Strefa odkształceń plastycznych usytuowana jest w obszarze gdzie temperatura koła jest na tyle niska (rys. 2), że nie trzeba uwzględniać zmienności granicy plastyczności ze wzrostem temperatury. Rozkład naprężeń pozostających po pierwszym hamowaniu i schłodzeniu koła pokazano na rys.4. W odróżnieniu od poprzedniego rysunku, tutaj pokazano naprężenia obwodowe. Dla tej składowej stanu naprężenia obowiązuje kryterium oceny sformułowane w [1].

Rozkład naprężeń zredukowanych po zakończeniu dziesiątego hamowania pokazano na rys.5. Różni się on rozkładu otrzymanego po pierwszym hamowaniu, ponieważ przed rozpoczęciem dziesiątego hamowania w kole istniało już pole naprężeń własnych, których nie było przed pierwszym cyklem hamowania. Na rys.6 pokazano rozkład pozostających naprężeń obwodowych po zakończeniu ostatniego, dziesiątego cyklu grzanie/chłodzenie.

Rys. 7 i 8 przedstawiają obrazy zdeformowanego koła po dziesiątym cyklu hamowania, odpowiednio na gorąco i na zimno, po schłodzeniu koła. Obrazy koła zdeformowanego naniesiono na obrazy nie zdeformowanej siatki modelu.

Na rys. 9 - 14 przedstawiono wyniki obliczeń uzyskane dla koła maksymalnie zużytego, w tym samym porządku, w jakim przedstawiono je dla koła nowego. Charakter wszystkich przedstawionych rozkładów jest podobny, różnią się one jedynie wartościami maksymów.

Dla koła nowego otrzymano:

- maksymalne przemieszczenie na gorąco 0.806 mm wobec dopuszczalnej wartości 3.0 mm,
- maksymalne przemieszczenie na zimno - 0.055 mm wobec dopuszczalnej wartości 0.5 mm,
- maksymalne obwodowe naprężenia pozostające w wieńcu 138 MPa wobec dopuszczalnej wartości dla średniego poziomu 200 MPa.

Dla koła maksymalnie zużytego otrzymano:

- maksymalne przemieszczenie na gorąco 0.817 mm wobec dopuszczalnej wartości 3.0 mm ,
- maksymalne przemieszczenie na zimno - 0.045 mm wobec dopuszczalnej wartości 0.5 mm ,
- maksymalne obwodowe naprężenia pozostające w wieńcu 177 MPa wobec dopuszczalnej wartości dla średniego poziomu 250 MPa (rys. 5.14).

Widać więc, że obliczone wartości zarówno przemieszczeń, jak i naprężeń mieszczą się z dużym zapasem poniżej wartości dopuszczalnych.

## Literatura

1. UIC Leaflet 6<sup>th</sup> Draft (July 1998): Technical Approval of Solid Wheels, ERRI B-169.1
2. Jean-Michel Ven, Comparative Numerical Simulation of Tread Braking on UIC Wheel and Disc-Wheel Braking at 22.5t/Axle. Proceedings of 11<sup>th</sup> International Wheelset Congress, Paris 1995. Vol. 2.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek Sitarz  
Profesor Politechniki Śląskiej

**Abstract**

The paper presents the modeling approach and the results of numerical simulation of the thermal loads acting on a solid wheel during the bench tests. The numerical (FEM) analysis was performed for two sets of geometry of the wheel: a new wheel (nominal diameter of 920 mm) and a used one, where the worn-out portion of material reaches the control groove at the side surface of the wheel. The acceptable result of numerical simulation of the thermal load allows expecting the favorable results of the bench tests.