

Józef WOJNAROWSKI, Władysław KALIŃSKI

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Politechnika Śląska

## WYZNACZANIE NAPRĘŻEN WŁASNYCH W KOŁACH KOLEJOWYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań składowych stanu naprężeń własnych w kołach kolejowych, do pomiaru których zastosowano różne metody eksperymentalne.

### 1. WSTĘP

Wzrost przewozów kolejowych, podyktowany względami ekonomicznymi i aktualnymi możliwościami technicznymi bazy transportowej, osiągnięto dzięki zwiększeniu prędkości jazdy pociągów, częstości ich przejazdów oraz obciążenia przypadającego na oś. Przy większych prędkościach i znacznych masach przewozowych wykoślenie pociągu czy też uszkodzenie jego elementów staje się bardziej niebezpieczne, jeżeli wziąć pod uwagę, że siły niszczące są proporcjonalne do kwadratu prędkości jazdy. Do szczególnie niebezpiecznych należą uszkodzenia zestawów kołowych, a w tym pęknięcia koła lub jego obręczy pod jadącym pociągiem.

Postęp w technice kolejowej i w technologii wytwarzania kół umożliwił wprowadzenie w miejsce dotychczas stosowanych kół dzielonych, składanych z kół bosych i obręczy, kół całowalcowanych, zwanych monoblokami. Koła te wytwarzane o różnych postaciach konstrukcyjnych tarcz są poddawane różnorodnym cieplno-chemicznym obróbkom.

Poszukiwanie najlepszej konstrukcji koła całowalcowanego, dobór jego optymalnych cech geometrycznych i materiałowych [3] oraz wyniki analizy przyczyn wyłamania się części koła pod jadącym pociągiem [4] wpłynęły na konieczność określania wielkości naprężeń własnych w kole a także badania sposobu kształtowania ich pola, szczególnie w obszarach powstawania złomu zmęczeniowego.

### 2. NAPRĘŻENIA WŁASNE W KOŁACH KOLEJOWYCH

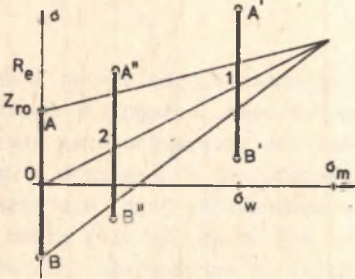
Dobierając określoną badaniami konstrukcyjnymi postać geometryczną koła i kształtując jego cechy materiałowe przez odpowiednio dobrany ciąg o-

peracji technologicznych możemy uzyskać optymalny w danych warunkach rozkład naprężeń, które, jak wykazały badania, wpływają na:

- pole naprężeń koła,
- wytrzymałość zmęczeniową koła [18, 15],
- miejsce powstawania pęknięcia i sposób jego rozprzestrzeniania [4],
- pewność połączenia koła z osią lub koła z osią i obręczy z kołem [2],
- zmianę pochylenia tarczy koła w wyniku uwalniania części naprężeń własnych z obrzeża koła, wywołanego ścieraniem powierzchni toczonej w czasie eksploatacji [11] i przy regenerowaniu obrzeża [8],
- "historię" odkształceń podczas eksploatacji, zmienianą hamowaniem [3].

W przypadku istnienia naprężeń własnych  $\sigma_w$  wskutek możliwości odkształcenia plastycznego materiału osiągniemy stan naprężenia odpowiadający położeniu [2]. Im więc tworzywo jest plastyczniejsze, tym mniejszy będzie

wpływ naprężeń własnych na wytrzymałość zmęczeniową w określonych warunkach. Praktycznie nie można jednak stosować zbyt miękkich materiałów o dużym zapasie plastyczności [12] z uwagi na określone warunki wytrzymałościowe i dobór właściwych cech geometrycznych i materiałowych. Zmiana rozkładu naprężeń własnych w obręczy, spowodowana obróbką regeneracyjną i ich ścieraniem w czasie eksploatacji, może sprzyjać a nawet doprowadzić do obłuzowania się nasadzonych na koło obręczy, zwłaszcza podczas ostrego hamowania [8]. W przypadku kół całowalcowanych zmiana naprężeń własnych w obręczy



Rys. 2.1. Wpływ naprężeń własnych na wytrzymałość zmęczeniową

proceedzi do zmiany pochylenia tarczy koła, co jest szczególnie widoczne podczas obróbki obrzeży kół zamontowanych w zestawie kołowym [11].

Odpowiedni ciąg operacji technologicznych, zapewniających wytwarzanie właściwego rozkładu naprężeń własnych, pozwala na uzyskanie najkorzystniejszego pola naprężeń w kole podczas eksploatacji pociągu. Dlatego też badanie naprężeń własnych w kołach pochodzących z różnych faz procesu technologicznego umożliwia lepsze wpływanie na ciąg operacji technologicznych pod kątem uzyskania w kole najkorzystniejszego pola naprężeń własnych.

### 3. O STOSOWANYCH METODACH WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W KOŁACH KOLEJOWYCH

Szczególnością naprężeń własnych jest to, że istnieją one w wytworze bez udziału obciążeń zewnętrznych i mają zawsze charakter czyste

sprężysty, nawet jeśli powstają w rezultacie odkształceń plastycznych. Naprężenia własne można zmieniać tymi sposobami, które prowadzą do zmniejszenia odkształceń sprężystych przez nie wywołanych. Wykorzystując powyższe własności opracowano mechaniczne metody uwalniania naprężeń własnych w celu ich zmierzenia.

Metody pomiaru naprężeń własnych pierwszego rodzaju można podzielić na:

### 1. Nieniszczące:

- rentgenograficzna [21, 11],
- kruchych pokryw [16],
- ultradźwiękowa [10],
- trepanacji jednootworowej [17, 22] (używane tylko w niektórych przypadkach),
- penetratora [5],
- magnetyczna [1],
- siatek dyfrakcyjnych (światła odbitego),

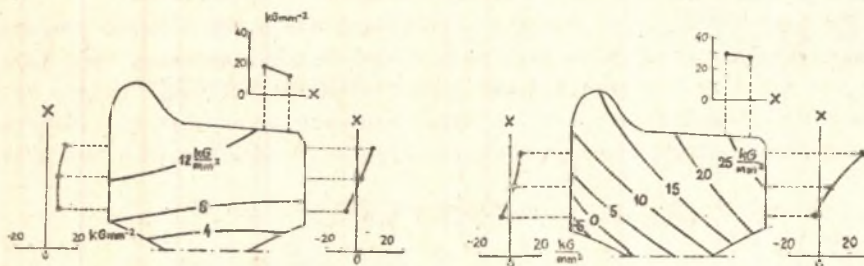
### 2. Niszczące:

- odcięcia obręczy od tarczy i rozcięcia obręczy [11, 6, 7],
- trepanacyjna obwiercenia [6, 19, 7],
- rozcinań sekcijnego [8],
- trepanacyjna słupkowa [14],
- wycinania części koła [4, 13].

Z uwagi na to, że realizacja niektórych z metod stwarza znaczne trudności technologiczne, dlatego do badania naprężeń własnych w kołach kolejowych nie wszystkie z nich mogą być zastosowane.

### 3.1. Metoda rentgenograficzna

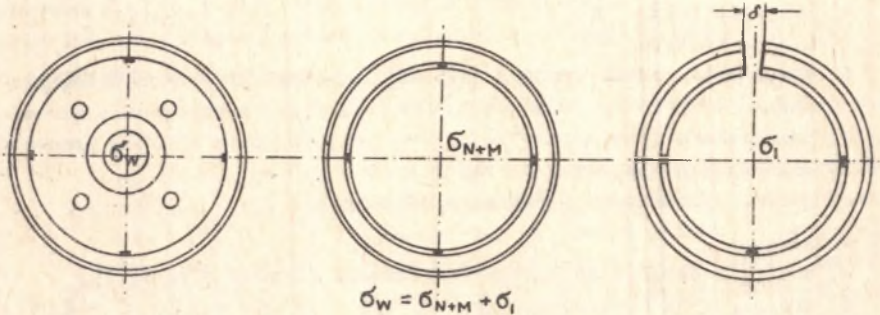
Metodę tę zastosowano w Japonii do mierzenia naprężeń własnych obwodowych w obręczy, która najpierw została odcięta obwodowo od tarczy koła a następnie rozcięta [11]. Mierzono również naprężenia własne obwodowe w obręczy od strony czołowej koła. Porównanie zgodności wyników metody rentgenograficznej z metodą odcięcia i rozcięcia obręczy przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Porównanie zgodności wyników metody rentgenograficznej-X z metodą odcięcia i rozcięcia obręczy dla dwóch typów kół

### 3.2. Metoda odcięcia obręczy od tarczy i rozcięcia obręczy

Podane metody badań umożliwiły wyznaczenie naprężeń własnych na powierzchni koła. W przypadku zastosowania metody odcięcia obręczy i jej rozcięcia (rys. 3.2) dzięki użyciu tensometrów oporowych naklejonych z obydwu stron koła można było określić siłę promieniową i moment układu sił działających na obwodzie tarczy, wywołanych naprężeniami własnymi (rys. 3.3).



Rys. 3.2. Ilustracja metody odcinania obręczy od tarczy i rozcięcia obręczy z zaznaczeniem tensometrów



Rys. 3.3. Siła promieniowa i moment układu sił na obręczy tarczy

Obręcz od koła odcinano na tokarce a następnie promieniowo rozcinano obręcz. Naprężenia własne w obręczy określano metodą Dawidienkowa [7]. Dodatkowo naprężenia własne  $\sigma_{N+M}(r, z)$  określano posługując się metodą elementów skończonych. Metoda ta i rentgenograficzna dają dość dobrą zbieżność wyników, lecz nie można stwierdzić autorytatywnie czy nie jest to zbieżność przypadkowa, związana z dość niską dokładnością metody rentgenograficznej.

### 3.3. Metoda trepanacyjnego obwiercania

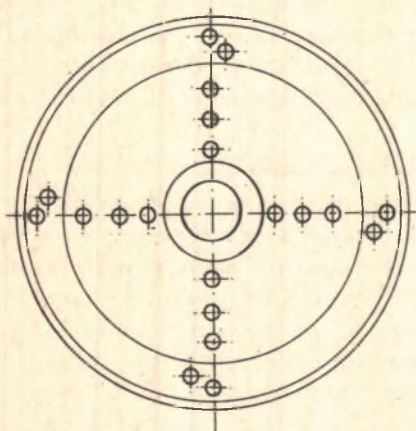
Jedną z najczęściej stosowanych metod trepanacyjnych jest metoda obwiercania trepanacyjnego walca z naklejonymi czołowo tensometrami [6]. Metodę tę stosuje się w przypadku niewielkich zmian naprężeń własnych w głąb materiału, przy czym wg danych eksperymentalnych głębokość obwiercania winna być:

$$l \leq (0,7 \div 1,5) d,$$

gdzie:

$d$  - średnica wewnętrzna freza.

Pomiar naprężeń własnych tą metodą w kołach całowalcowanych zastosowano w Dniepropietrowsku [19, 20], dla zbadania charakteru rozkładu naprężeń własnych i paczenia się kół. Na rys. 3.4 pokazano schemat wyboru punktów pomiarowych. Analiza otrzymanych danych pokazuje, że dla prawie jednakowych kół (odnośnie warunków wytwarzania i składu chemicznego) asymetria pola naprężeń własnych zależy od asymetrii koła.



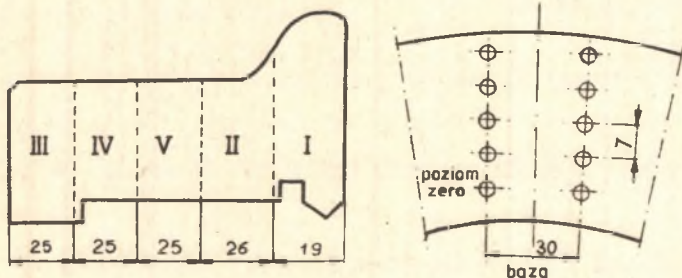
Rys. 3.4. Układ punktów pomiarowych

Metoda trepanacyjnego obwiercania jest możliwa do zastosowania, gdy dysponujemy odpowiednim frezem i badamy koła z tarczami o grubości minimalnej, spełniające poprzednio opisany warunek a także dla wolno zmieniających się w głąb tworzywa naprężeń własnych, więc jest nieprzydatna dla badania w obszarze obręczy kół całowalcowanych o małej grubości. Wymaga poza tym stosowania specjalnego sprzętu i maszyn umożliwiających dokładne ustawienie freza względem tensometrów i prostopadle do powierzchni badanej, co nie zawsze jest możliwe do zrealizowania.

#### 3.4. Metoda rozcinania sekcijnego

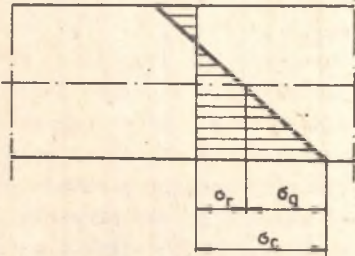
Metodę tę do badania naprężeń własnych w obręczach zestawów kołowych poddanych napawaniu na powierzchni tocznej zastosował A. Drozd [8].

Naprężenia własne wyznaczono drogą mierzenia wydłużenia i ugięć elementów pomiarowych odcinanych kolejno z obręczy i ugięć obręczy po odcięciu każdego elementu. Elementy o długości 150 mm wycinano wierząc otwory  $\varnothing 5$ . Podział części obręczy na elementy przedstawia rys. 3.5.



Rys. 3.5. Kolejność wycinania elementów pomiarowych

Naprężenia całkowite na powierzchni są sumą naprężeń od wydłużeń elementu i jego ugięcia (rys. 3.6).



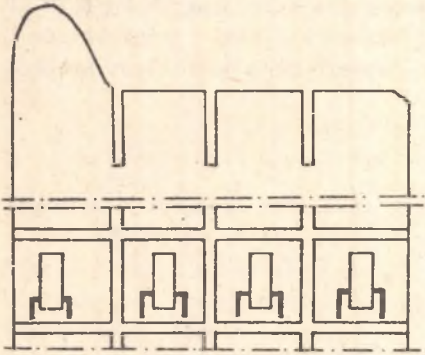
Rys. 3.6. Naprężenia w odciętym elem.

$$\sigma_c = \sigma_r + \sigma_g$$

Wykorzystując zasadę superpozycji każdorazowo wyznaczano naprężenia uwolnione z elementu i pozostałe w obręczy, przy czym strzałkę ugięcia mierzono na bazie 100 mm.

### 3.5. Metoda trepanacyjna szupkowa

Jest ona podobna do metody trepanacyjnego obwiercenia i zbliżona do metody wycinania sześciątów z naklejonymi tensometrami [6]. Metodę trepanacji szupkowej zastosowano do wyznaczania naprężeń własnych na powierzchni tocznej koła, w miejscu najczęstszego powstawania ogniska złomu zmęczeniowego. Pomiarów tą metodą przeprowadzono w Centralnym Ośrodku Badawczym Rozwoju i Techniki Kolejnictwa [14]. Na obwodzie koła naklejono tensometry oporowe i następnie frezowano obok nich rowki o odpowiedniej głębokości. Odształcenia powierzchniowe baz tensometrów były miarą uwalnianych naprężeń własnych i zależne były od głębokości rowków, co świadczy o zmianie naprężeń własnych w głąb materiału.



Rys. 3.7. Sposób uwalniania naprężeń własnych w metodzie trepanacji szupkowej

### 3.6. Metoda Sachsa

Metodę tą zastosowano do wyznaczania pozostałych i wprowadzonych naprężeń własnych w obręczach kół składanych w zależności od obróbki cieplnej obręczy. Metoda ta jest bardzo pracochłonna z uwagi na duże czasy stygnięcia obręczy po zdjęciu kolejnej warstwy i wymaga wykorzystania wiertarko-frezarki, co jest bardzo kosztowne.

## 4. BADANIE POLA NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W MONOBŁOKACH METODĄ WYCINANIA CZĘŚCI KOŁA

Do określenia rozkładu naprężeń własnych w całowalcowanych kołach kolejowych opracowano specjalny tok badań, który w fazie wstępnej wymaga wycięcia z koła promienicwo wycinka koła z naklejonymi nań tensometrami

[4, 13]. Potrzeba taka uwarunkowana jest koniecznością wyznaczenia naprężeń własnych na całej powierzchni koła oraz pod powierzchnią toczną w miejscu powstawania złomu zmęczeniowego. W celu określenia charakteru powstałych w warstwie podpowierzchniowej części tocznej koła naprężeń własnych posłużono się metodą półtrepanacji dwuotworowej, po odcięciu z wycinka części obrzeża koła.

#### 4.1. Układ pomiarowy i pomiary

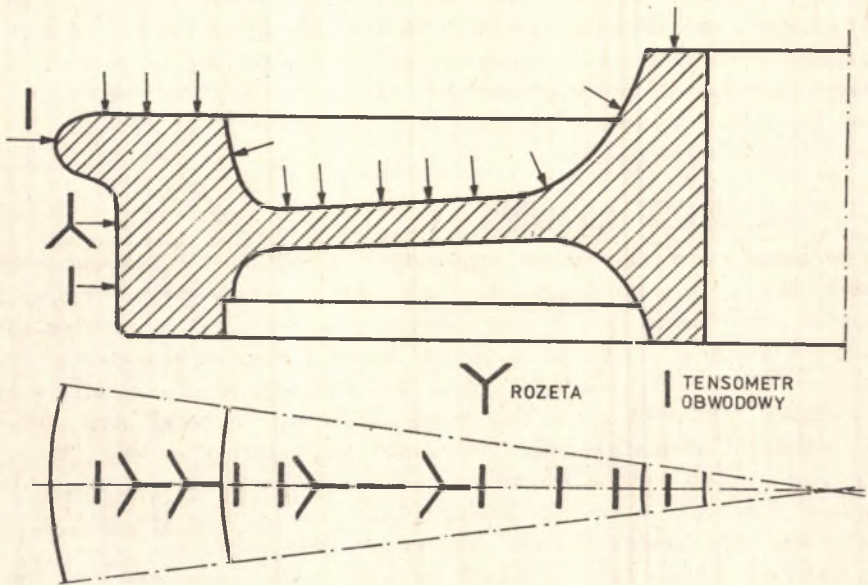
Do badań użyto tensometrów typu RL120-6 i 3xRL120-6  $\Delta$  90. Tensometry i rozety naklejono wzdłuż całej średnicy koła po jednej stronie tarczy, przy czym do opracowania wyników użyto danych wyznaczonych dla punktów pomiarowych z odciętej części koła. Typowy sposób i miejsce naklejania tensometrów i rozet przedstawiono na rys. 3.8. Operację rozcięcia koła i odjęcia części koła dokonano na dłutownicy ze stołem obrotowym przy bardzo małym posuwie i minimalnej prędkości skrawania, kontrolując stan naostrzenia noża i wpływ obróbki skrawaniem na odkształcenia koła wywołane odcinaniem. Wskazania mostka dla poszczególnych tensometrów zapisano po ustaleniu się pola temperaturowego koła po czterech godzinach.

Badaniom poddano koła produkcji polskiej, dalej oznaczone - P, pochodzące z różnych faz procesu technologicznego, koła produkcji radzieckiej - R i francuskie - F.

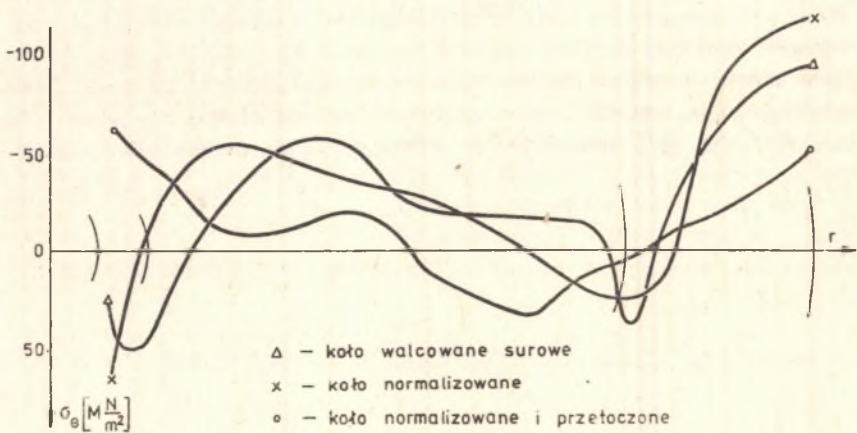
Wykresy naprężeń własnych obwodowych dla tych kół pokazano na rys. 3.9-3.11, a dla obrzeży na rys. 3.12.

Przed zastosowaniem metody półtrepanacji dwuotworowej odcięto część obrzeża od tarczy wycinka koła, co spowodowało uwolnienie części pozostałych naprężeń obwodowych  $\sigma_{\theta}$  (rys. 3.13), a ponadto ułatwiło zamocowanie części obrzeża przy zabiegu półtrepanacyjnym (rys. 3.14).

Wiercenia otworów trepanacyjnych dokonano specjalną wiertarką przy najmniejszych obrotach i małym posuwie dwustopniowo, wierząc kolejno coraz głębsze otwory wiertłem dla wybrania materiału pod frez palcowy MFPa-8. Otwory pogłębiono po obu stronach tensometru stopniowo, wiertłem i frezem. Wyniki obliczeń [17] zestawiono w formie wykresów i przedstawiono na rys. 3.15.

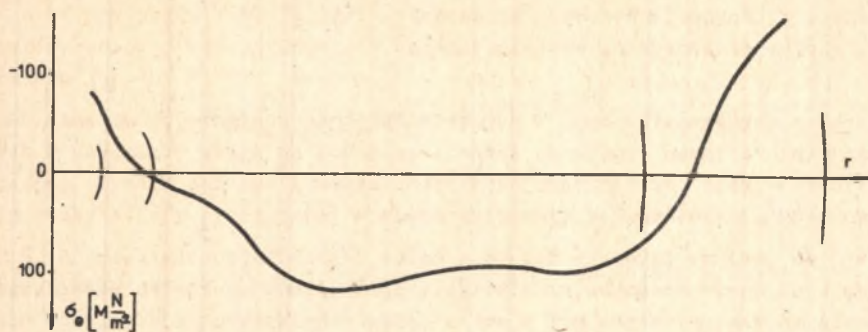


Rys. 3.8. Sposób naklejenia tensometrów i rozet na wycinku koła

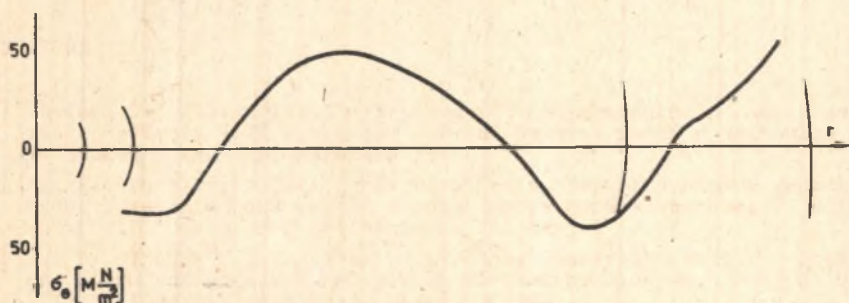


Rys. 3.9. Wykres naprężeń własnych obwodowych w kołach P

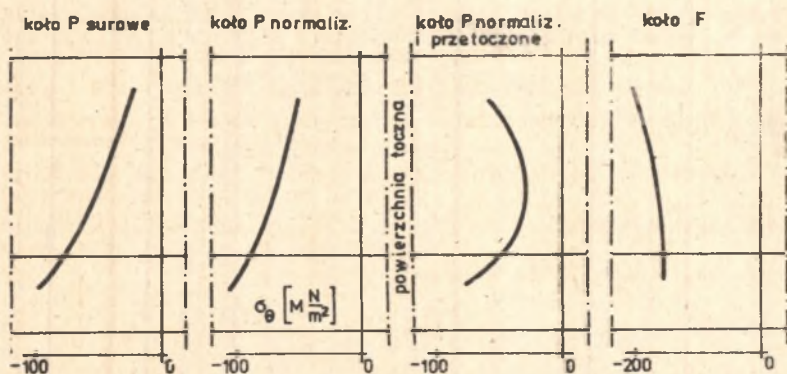




Rys. 3.10. Wykres naprężeń własnych obwodowych w kole P



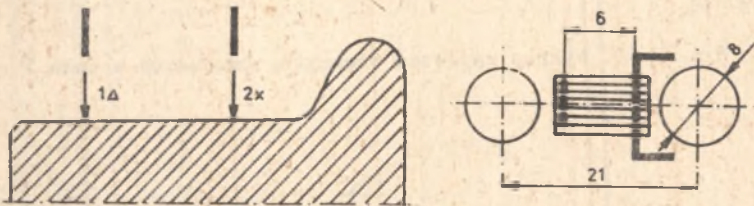
Rys. 3.11. Wykres naprężeń własnych obwodowych w kole R



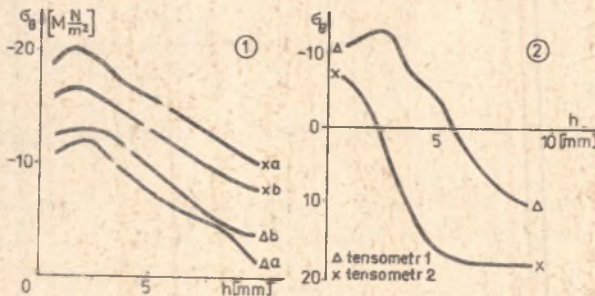
Rys. 3.12. Wykres naprężeń własnych obwodowych dla obrzeża



Rys. 3.13. Wykres uwolnionych naprężeń własnych z kół po odcięciu obrzeża



Rys. 3.14. Miejsce naklejania tensometrów do zabiegu półtrapanacji w sąsiedztwie otworów



Rys. 3.15. Uwolnione naprężenia własne metodą trepanacji

## 5. WNIOSKI

1. W wytwarzanych kołach kolejowych istnieją znaczne naprężenia własne, zależne od cech konstrukcyjnych kół i od sposobu ich obróbki cieplnej.

2. Z zestawienia metod badań naprężeń własnych wynika fakt, że jest obojętne, jaką metodą mierzymy w kole odkształcenia nimi wywołane, o ile spełnione są jej założenia w czasie pomiarów i przy analizie wyników. Sam wybór metody pomiarowej zależy jest od tego, w jakim obszarze koła zamierzamy zbadać naprężenia własne i jaką chcemy uzyskać dokładność.

3. Metoda rentgenograficzna daje zbyt małą dokładność w przypadku naprężeń własnych bliskich zera [21].

4. W przypadku konieczności wyznaczania naprężeń własnych w warstwie powierzchniowej koła wydaje się najsłuszniejsze zastosowanie metody penetratora [5].

5. Znajomość rozkładu naprężeń własnych w nowo wytwarzanych kolejowych jest konieczną z uwagi na ocenę możliwości powstania pęknięć w części tocznej obrzeża podczas hamowań (zmęczenie cieplne) lub przy utworzeniu się dużej strefy plastycznej w obszarze piasty po wprasowaniu koła na oś.

6. Z przeglądu problematyki badań naprężeń własnych wynika, że wciąż poszukiwane są metody umożliwiające określenie naprężeń własnych w obszarach lokalnych i integralnych koła, które w tym aspekcie jest układem złożonym.

#### LITERATURA

- [1] Bäcklund J., Jilken L.: Electromagnetic measurements in solid mechanics. Referaty VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, część I, Warszawa 1978.
- [2] Bąk R., Burczyński T. i inni: Określenie optymalnych cech geometrycznych połączenia koła wagonu z osią. Praca naukowo-badawcza, Gliwice 1975, Biblioteka IPKM Politechniki Śląskiej.
- [3] Bąk R., Grajek K., Zacharski M.: Metoda numeryczna analizy statycznej stanu naprężenia w kolejowych zestawach kołowych, Zeszyt 27/61 IPKM Politechniki Śląskiej, Gliwice 1977.
- [4] Bąk R., Gawryś T., Kaliński W., Wojnarowski J.: Ustalenie przyczyn wyłamania się części koła zestawu kolejowego pod jadącym pociągiem. Praca naukowo-badawcza, Gliwice 1976, Biblioteka IPKM Pol. Śląskiej.
- [5] Bijak-Żochowski M., Brzoska Z.: Badanie stanu naprężeń metodą penetratora, Referaty VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Część I, Warszawa 1978.
- [6] Birger I.A.: Ostatocznyje napriazhenja, Maszgiz, Moskwa 1963.
- [7] Dawidienkow N.N.: Ob izmierieniji ostatocznych napriazhenij, Zawodskaja Laboratorja nr 2, 1950.
- [8] Drozd A.: Naprężenia własne w napawanych obręczach zestawów kołowych: Przegląd spawalnictwa nr 3, 1970.
- [9] Dzugutow M.J.: Napriazhenja i rozrywy pri obrabotkie mietalłow dawlieniem. Mietalżurgia, Moskwa 1974.
- [10] Guszcza O.I., Guż A.N., Machort F.G.: Wwiedienie w akustouprugost. Naukowaja Dumka, Kijew 1977.
- [11] Hirooka T.M., Kasai K.M. i inni: Residual stress in the rim of a railroad solid wheel due to on tread drum braking and their effect on wheel failure, 4-th International Wheelset Congress, Paris 1972, 3<sup>e</sup> Volume.
- [12] Hoderny B., Lamber T., Wojnarowski J.: Próba oceny odporności rur wiertniczych na kruche pęknięcie, ZN Pol. Śląskiej, s. Mechanika, z. 36, 1968.
- [13] Kaliński W., Wojnarowski J.: Ustalenie przyczyn wyłamania się części koła zestawu pod jadącym pociągiem, cz. II, Praca naukowo-badawcza, Gliwice 1977, Biblioteka IPKM Pol. Śląskiej.

- [14] Knoch-Kaźmierczak H., Krasowski A., Sztencel J.: Analyse der Bruchursache des Vollrades (OBR B 136) während der Versuche auf dem Prüfstand für Bremsung, Problem 3322/11, Centr.Ośr.Bad.Rozwojowy i Tech. Kolejnictwa, Warszawa 1976.
- [15] Kudriawcew I.W.: Wnutriennye napriazhenja kak rezerv procznosti w maszynostrojenji, Maszgiz, Moskwa 1951.
- [16] Orkoś Z. i inni: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń PWN, Warszawa 1977.
- [17] Orkoś Z.: Niektóre problemy badań naprężeń własnych, Dod. do Biuletynu WAT Nr 11(123), Warszawa 1962.
- [18] Osgood W.R.: Ostateczne napriazhenja w metalech i metalicznych konstrukcjach, Izdat. Inostr. Literatury, Moskwa 1957.
- [19] Prichodko E.W., Uzłew I.G.: O charakterie raspriedielenja ostatecznych napriazhenij w ciselokatannych koliesach, Wiestnik maszynostrojenia Nr 11, 1964.
- [20] Prichodko E.W., Uzłew I.G. i inni: Koreblienje i ostateczne napriazhenja w termiłoski obrabotannych cielnokatannych koliesach, Stal nr 7, 1968.
- [21] Pszonka A., Ziaja J.: Rentgenograficzne metody pomiaru naprężeń, Praca Nauk. Instytut. Materiałoznastwa i Mech.Tech.Pol. Wrocławskiej, Nr 8, seria: Studia i Materiały Nr 6, Wrocław 1971.
- [22] Measurement of residual stresses by the blind hole drilling method, Bulletin T-403, Photoelastic Inc. Measurements Group Vishay Inter-technology, 1977.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁСАХ

##### Р е з ю м е

В работе представлены результаты исследований составляющих состояния собственных напряжений в железнодорожных колёсах. Для измерения этих напряжений были применены разные экспериментальные методы.

#### DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN RAILWAY CARRIAGES WHEELS

##### S u m m a r y

The residual stresses in a wheel in the state of superposition with exploiting stresses are of decisive influence upon the reliability of a wheel-set.

The paper discusses the methods of investigation of residual stresses occurring in the wheels of railway carriages. The obtained results concerning the distribution of stresses in wheels manufactured from BV2 (St7P) steel are presented, as well as the method of cutting the cut part of the wheel applied is dealt with in detail. Attention has been also paid to utilization of adequately planned technological production process in order to achieve the most appropriate distribution of residual stresses in solid wheels.