

Władysław Kaliński

Jan Tunk

Józef Wojnarowski

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn

CZY PRÓBA DYNAMICZNEGO ZGINANIA OBREĆZY ZESTAWÓW KOLEJOWYCH  
MOŻE BYĆ PODSTAWĄ OCENY ICH JAKOŚCI

Streszczenie. W pracy podjęto próbę analizy wpływu obróbki cieplnej i cech geometrycznych obręczy na wynik próby kafarowania jako miarę oceny ich jakości. W oparciu o analizę teoretyczną i badania doświadczalne stwierdzono, że w zależności od typu obręczy mamy do czynienia z różnym rozkładem naprężeń własnych, które mają wpływ na wynik próby kafarowania i niezawodność połączenia obręczy z kołem.

Wstęp

Celem pracy jest określenie wpływu średnicy i naprężeń własnych na wyniki prób kafarowych obręczy zestawów kolejowych. W oparciu o uzyskane dane prób odporności na uderzenie i badań własności mechanicznych, zebranych przy odbiorze technicznym oraz badań obręczy wagonowych ze stali martenowskiej zasadowej St-7P, przeprowadzono analizę wpływu różnych czynników na wyniki próby kafarowej.

Analiza [1] wykazała, że uzyskano negatywne wyniki próby kafarowej:

- 44,7% dla obręczy w stanie surowym,
- 3,45% dla obręczy w stanie normalizowanym,
- 0% dla obręczy ulepszonych cieplnie.

Bardziej szczegółowa analiza wpływu czynników na negatywne wyniki kafarowania obręczy surowych wykazała, że wymagana, zgodnie z PN-61/K-91044 strzałka ugięcia zostaje osiągnięta po 9-10 uderzeniach. Obręcz surowa pęka najczęściej po 2 uderzeniach, zatem losowa krytyczna liczba uderzeń zawarta jest w przedziale 2-6. Współczynnik restytucji przy każdym kolejnym uderzeniu ma wartość coraz większą ze względu na zmniejszenie prędkości uderzeń wtórnych, zmianę geometrii powierzchni styku oraz własności wytrzymałościowych obręczy w obszarze zetknięcia bijaka z obręczą, wskutek lokalnego utwardzenia.

Obręcze, które wytrzymały krytyczną liczbę uderzeń nie uległy zniszczeniu w dalszym ciągu kafarowania, co pozwala wnioskować, że "kruchość krytyczna" obręczy surowych występuje znacznie wcześniej, przed minimalną liczbą uderzeń, koniecznych do uzyskaniażądanego odkształcenia. Liczba zni-

szczonych w próbie kafarowania obręczy obrobionych cieplnie jest niewielka i zgodna z rozkładem prawdopodobieństwa liczby zniszczeń dla danej serii produkcyjnej.

## 2. Dynamiczne ugięcie obręczy

W ocenie nośności obręczy przy obciążeniach dynamicznych można się posłużyć modelami uproszczonymi. Według pracy [2] ugięcie dynamiczne  $\lambda_d$  wyraża się:

$$\lambda_d = k_d \cdot \lambda_s, \quad (1)$$

gdzie:

- $\lambda_s$  - ugięcie statyczne,
- $k_d$  - współczynnik dynamiczny.

Współczynnik  $k_d$  wyznacza się z zależności:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{1}{1 + \frac{Q_0}{Q}} \cdot \frac{2h}{\lambda_{st}}}, \quad (2)$$

gdzie:

- $Q_0$  - ciężar badanej obręczy,
- $Q$  - ciężar bijaka kafaru,
- $h$  - wysokość spadania bijaka.

Wskutek sprężystego podparcia obręczy kafarowanej poszczególne punkty obręczy odkształcają się nieliniowo, przemieszczając się z różnymi prędkościami. Dlatego też do wzoru (2) nie można wstawić  $Q_0$  zważonej obręczy, lecz wartość  $\alpha \cdot Q_0$ , gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem sprowadzenia masy, który zgodnie z propozycją Cox'a [3] wynosi:

$$\alpha = \frac{\int v_d^2 Q_0}{v_1^2 Q_0} \quad (3)$$

gdzie:

- $v$  - prędkość dowolnego punktu osi odkształceń obręczy,
- $v_1$  - prędkość uderzonego punktu obręczy.

Praktycznie stosuje się zmodyfikowany współczynnik dynamiczny:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{1}{1 + \alpha \frac{Q_0}{Q}} \cdot \frac{2h}{\lambda_{st}}}, \quad (4)$$

gdzie:

$$\alpha = 0,975 - 36,51 \frac{J}{A \cdot r^2} + 6,37 \frac{J^2}{A^2 \cdot r^4},$$

- J - główny centralny moment bezwładności przekroju obręczy,  
 A - powierzchnia przekroju obręczy,  
 r - promień mierzony do środka powierzchni przekroju obręczy.

### 3. Naprężenia własne w elementach walcowych

Teoretyczne podstawy wyznaczania naprężeń własnych w elementach cylindrycznych opracował Sachs [4]. Dawidenko oraz Whitman [5] podali sposoby wyznaczenia naprężeń własnych w rurach grubo i cienkościennych. Wielkość naprężeń własnych można określić przez naruszenie ich równowagi. Przejście do nowego stanu równowagi związane jest ze zmianą cech geometrycznych elementu i pozwala w zależności od metody wyznaczyć tensor naprężeń własnych  $\sigma^{ij}$  bądź tylko jedną z jego składowych [5].

Pole naprężeń własnych liniowej statycznej teorii sprężystości w inwariantnej formie opisuje się:

- równaniami równowagi:

$$\nabla_j \sigma^{ij} = 0, \quad \sigma^{ij} = \sigma^{ji}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

gdzie:

$\nabla_j$  - pochodna kowariantna;

- równaniami wiążącymi tensor odkształceń z tensorem gęstości źródeł naprężeń własnych:

$$\varepsilon^{ikm} \varepsilon^{jln} \nabla_k \nabla_l \varepsilon_{mn} = \gamma^{ij} \quad (6)$$

gdzie:

$\varepsilon^{ikm}, \varepsilon^{jln}$  - symbole Ricci'ego [6];

- równaniami fizycznymi określającymi związek między tensorem odkształceń i naprężeń:

$$\varepsilon_{mn} = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \varepsilon_{im} \varepsilon_{jn} - \varepsilon_{ij} \varepsilon_{mn} \right] \sigma^{ij}, \quad (7)$$

gdzie:

- E - moduł Younga,  
 $\nu$  - liczba Poissona,  
 $\varepsilon_{im}$  - kowariantny tensor metryczny,

- warunkami brzegowymi

$$n_j \sigma^{1j} = 0, \quad (8)$$

gdzie:

$n_j$  - współrzędne jednostkowe wektora normalnego do powierzchni zewnętrznej.

Wyznaczenie tensora naprężeń własnych wymaga określenia tensora nierozdzielności odkształceń i jest możliwe w przypadku zastosowania metod fizycznych.

Dla wyznaczania tylko niektórych składowych tensora naprężeń własnych można zastosować mechaniczne metody określania tych naprężeń. W metodach tych wykorzystuje się również fakt, że naprężenia wewnętrzne w nieobciążonym z zewnątrz ośrodku ciągłym mogą występować gdy warunki geometrycznej zgodności nie są spełnione.

Pomiar naprężeń własnych tymi metodami oparty jest na wykorzystaniu ważnej cechy tych naprężeń jaką jest wyrównowanie się ich w makroobjętościach pod wpływem naruszenia ciągłości geometrycznej elementu a więc stanu równowagi naprężeń własnych w badanym ośrodku ciągłym.

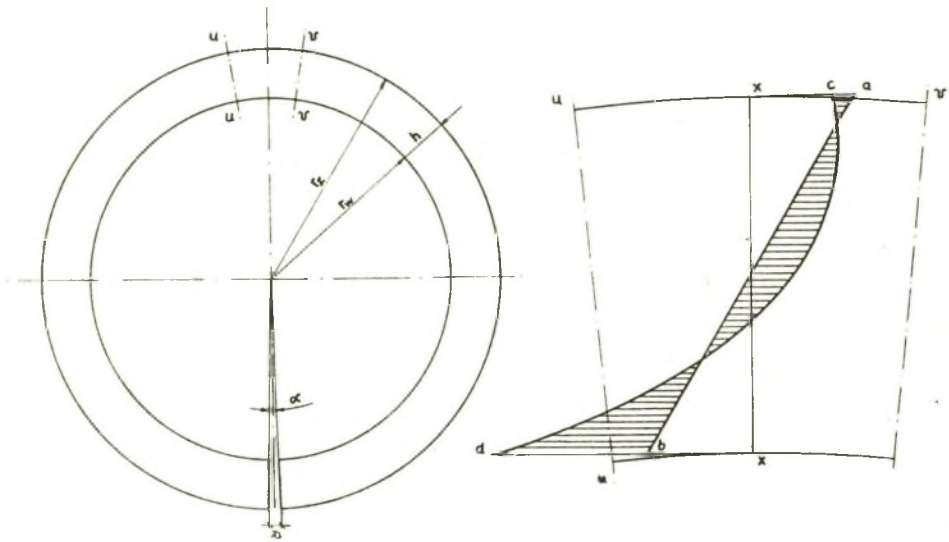
W przypadku obręczy naprężenia własne obwodowe  $\sigma_t$  mają decydujący wpływ na wynik próby kafarowania. Świadczy o tym nawet charakter szczelin zniszczonych obręczy. Dlatego w pracy przeprowadzono pomiar naprężeń poprzez zaburzenie ich stanu równowagi w obręczy.

#### 4. Wyznaczanie naprężeń własnych w obręczy

Przy wyznaczaniu naprężeń własnych, wykorzystano teoretyczne założenia F. Neumanna [7], zgodnie z którymi kierunki głównych odkształceń plastycznych pokrywają się z kierunkami głównych odkształceń sprężystych a ich wielkości są funkcjami liniowymi składowych głównych odkształceń sprężystych.

W celu wyznaczenia obwodowych naprężeń własnych obręczy zastosowano metodę przecięcia promieniowego, wywołującego nieciągłość obręczy, umożliwiającą częściową redukcję naprężeń własnych obwodowych. Rozcięcie obręczy prowadzi do uwolnienia obręczy od naprężeń wzdłuż powierzchni przecięcia i zmniejsza ogólną wartość energii odkształcenia, odpowiadającej naprężeniom własnym, choć nie zawsze zmniejsza maksymalne naprężenia własne. Zależy to od wielkości odkształcenia plastycznego i obróbki cieplnej obręczy.

Przyjmując, że obręcz posiada naprężenia własne rozłożone kołowo-symetrycznie, naprężenia własne obwodowe zmieniają się w przekroju poprzecznym liniowo - prosta a-b (rys. 1). Przecięcia obręczy wzdłuż promienia uwalnia ten przekrój od naprężeń własnych co jest równoważne przyłożeniu



Rys. 1

do obręczy dwóch równych i przeciwnie skierowanych momentów  $M(\alpha)$ , wywołujących częste zginanie [8].

Dla

$$M(\alpha) = - \frac{\alpha \cdot E \left[ (r_z^2 - r_w^2)^2 - 4 r_z^2 r_w^2 \left( \lg \frac{r_z}{r_w} \right)^2 \right]}{16 (r_z^2 - r_w^2)},$$

naprężenia obwodowe można obliczyć z zależności:

$$\sigma_t = - \frac{4 M(\alpha)}{N} \left( - \frac{r_z^2 - r_w^2}{r^2} \lg \frac{r_z}{r_w} + r_z^2 \lg \frac{r}{r_z} + r_w^2 \lg \frac{r}{r_w} + r_z^2 - r_w^2 \right). \quad (9)$$

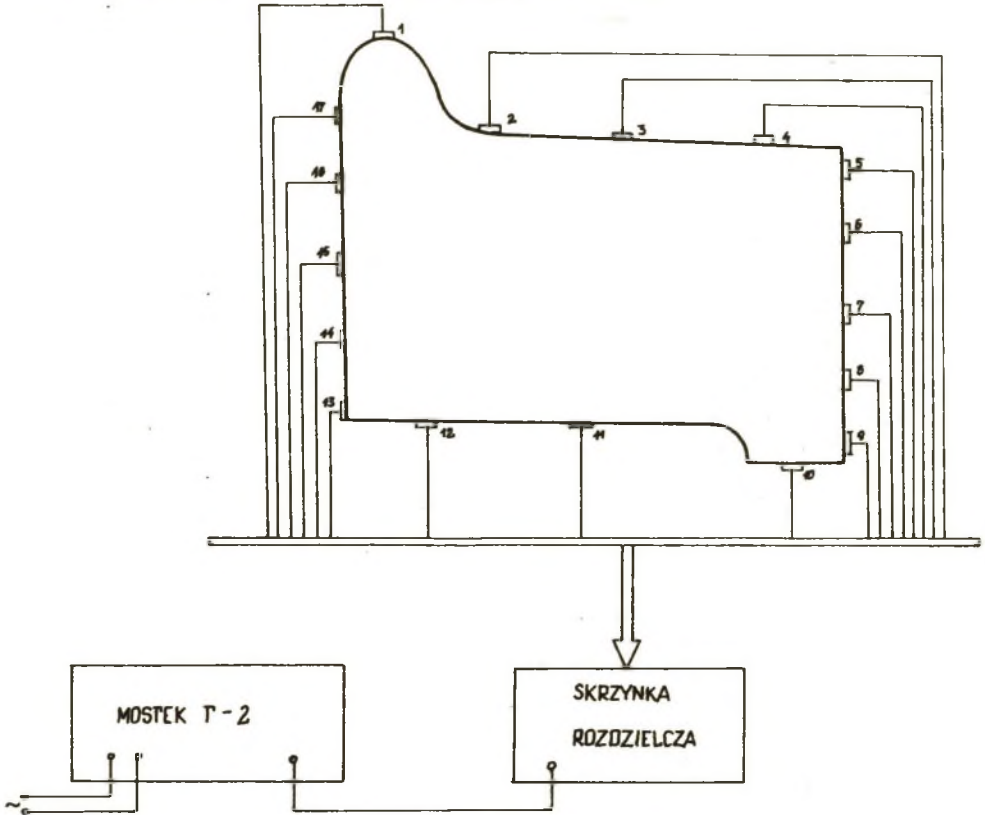
gdzie:

$$N = (r_z^2 - r_w^2)^2 - 4 r_z^2 r_w^2 \left( \lg \frac{r_z}{r_w} \right)^2.$$

Odpowiadający temu zginaniu rozkład naprężeń  $\sigma_t$  wzdłuż promienia  $x-x$  jest w przybliżeniu hiperboliczny  $c-d$  (rys. 1).

Pozostałe naprężenia, obszar zakreskowany, można uwolnić przez "skożowe" zdejmowanie warstw obręczy na średnicy wewnętrznej rozciętej obręczy, mierząc każdorazowo wielkość odkształcenia jak w metodzie rozcięcia [9].

Naprężenia własne zostały zmierzone w 17 punktach obręczy jak na (rys. 2). Do pomiarów wykorzystano czujniki oporowe typu Pb kn oraz mostek tensometryczny T-2 ze skrzynką rozdzielczą.



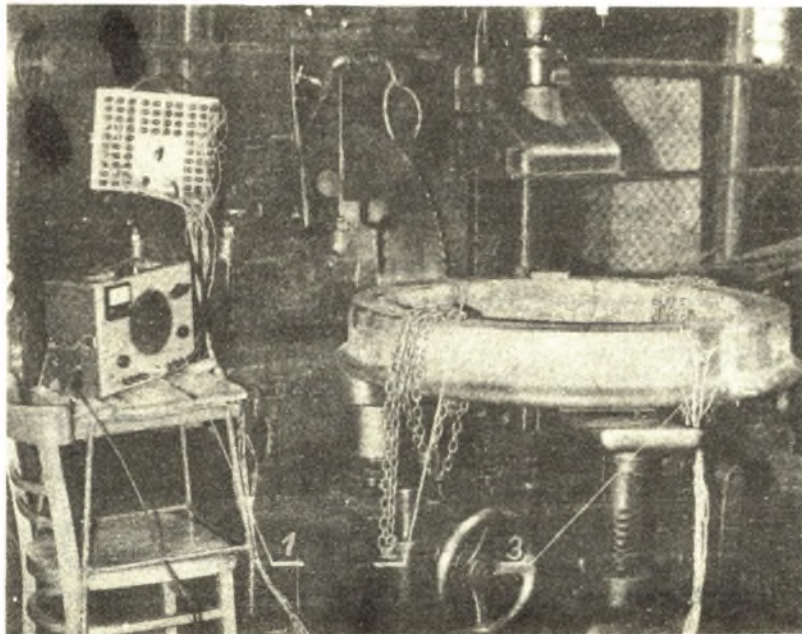
Rys. 2

Podstawą do określenia rozkładu naprężeń własnych wybranych punktów obręczy była różnica wskazań mostka:

- przed i po rozcięciu obręczy bezpośrednio na stanowisku roboczym (rys. 3),
- przed i po zdjęciu warstwy przy roztaczaniu obręczy.

W metodzie roztaczania czujniki powleczone żywicą epoksydową, a obręcz chłodzono cieczą emulsyjną.





Rys. 3

1 - mostek tensometryczny, 2 - miejsce rozcięcia obręczy, 3 - czujniki tensometryczne

##### 5. Analiza wyników

Badania wielkości naprężeń własnych dokonano na trzech obręczach o średnicy 832 mm

- a) w stanie surowym,
- b) w stanie znormalizowanym,
- c) w stanie ulepszonym cieplnie,

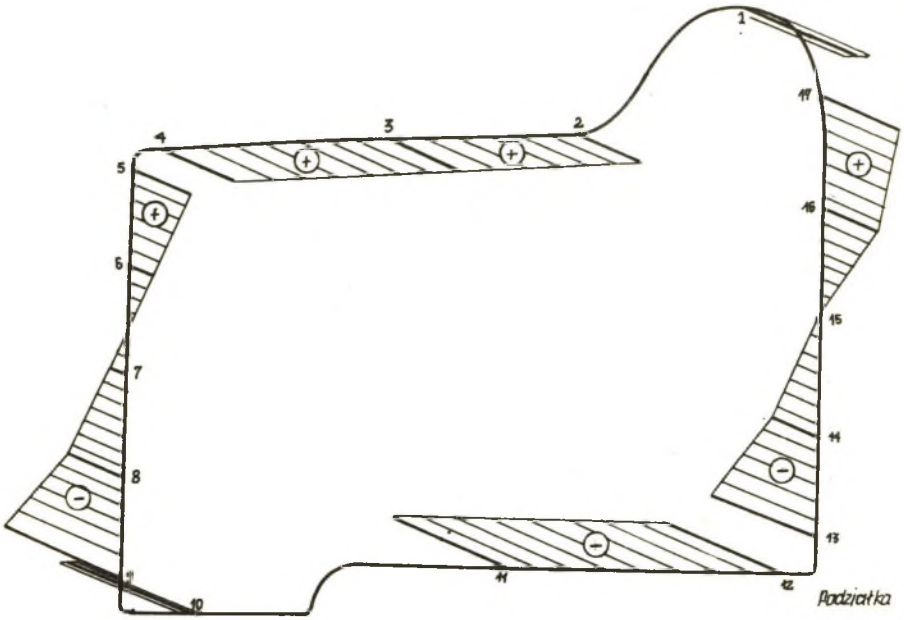
i jednej obręczy o średnicy 758 mm w stanie surowym.

Graficzną interpretację wyników przedstawiają rysunki 4 i 5.

Dla przekroju poprzecznego obręczy określono główne centralne osie bezwładności metodą przybliżoną, wykorzystując planimetr PL-1.

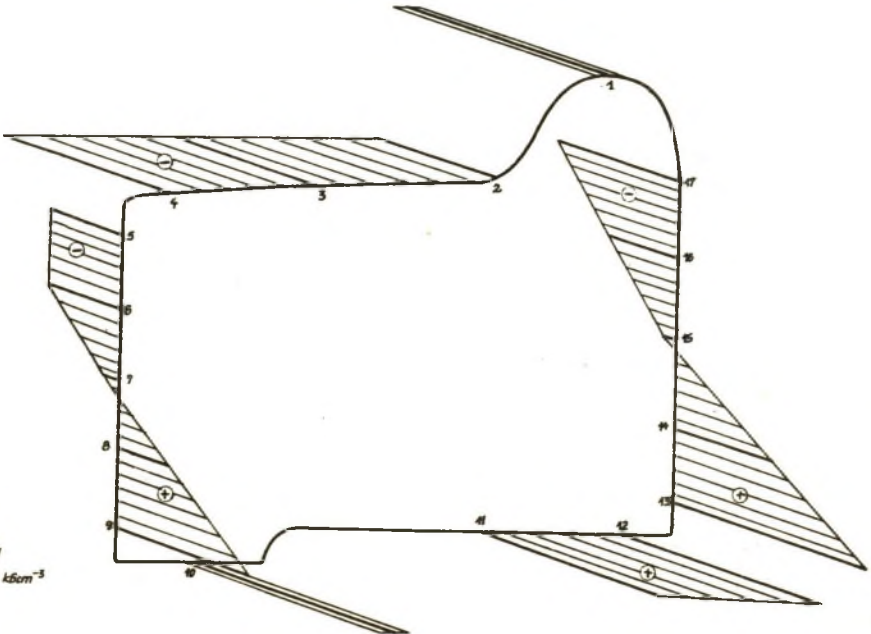
Przy uwalnianiu naprężeń własnych oraz przy próbie kafarowania, występuje zginanie ukośne.

Wielkości maksymalnych naprężeń własnych wyznaczono w oparciu o metodę rozcięcia promieniowego wykorzystując wzór (9).



Podziałka  
 $\mu_k = 1000 \text{ kg/cm}^3$

Rys. 4



Podziałka  
 $\mu_k = 840 \text{ kg/cm}^3$

Rys. 5



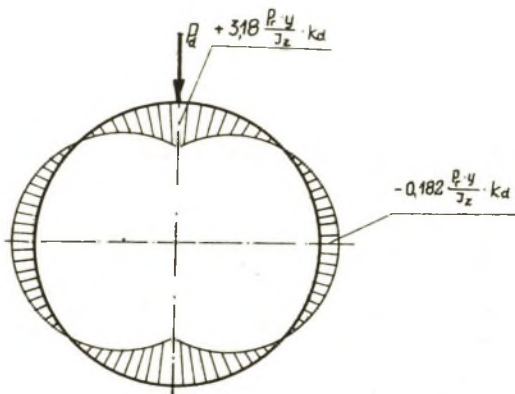
Z uwagi na małą wartość kąta dewiacji obliczenia przeprowadzono jak dla zginania prostego. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wyniki obliczeń naprężeń własnych w obręczach

Lp.	Śred- nica d [mm]	Stan stali	R [mm]	$\alpha$ [rd]	$r_z$ [mm]	$I_x$ [cm <sup>4</sup> ]	$W_x$ [cm <sup>3</sup> ]	$\sigma$ $\left[ \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2} \right]$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	758	surowy	-4,9	-0,0105	465			-1543,7
2	832	surowy	3,3	0,0065	505	1188	165	+1045,3
3	832	normalizowany	6,6	0,0131	505			+2491,5
4	832	ulepszony cieplnie	2,9	0,0057	505			+916,8

Rozkład maksymalnych naprężeń dynamicznych w próbce kafarowej przedstawia (rys. 6). W przypadku uwzględnienia w próbce kafarowej wpływu naprężeń własnych, superponowanie naprężeń daje wyniki przedstawione na (rys.7).



Rys. 6

Obręcze  $\phi 758$



Obręcze  $\phi 832$



Rys. 7

## 6. Wnioski

Na podstawie analizy teoretyczno-doświadczalnej opracowano następujące wnioski:

Wyniki ugięć wskazują, że obręcze w stanie surowym ulegają zniszczeniu w 44,7%, w stanie znormalizowanym w 3,45% a w stanie ulepszonym cieplnie w 0,0%.

Napężenie dynamiczne powstałe w wyniku próby kafarowej może lokalnie osiągnąć wartości:

4,65 Re dla obręczy w stanie surowym; 4,50 Re dla obręczy normalizowanych oraz 3,50 Re dla obręczy w stanie ulepszonym cieplnie.

W badanych obręczach występują znaczne napężenia własne, których rozkład zależy od średnicy obręczy; stąd próba kafarowania nie daje porównywalnych wyników dla całego szeregu średnic.

W przypadku gdy na średnicy wewnętrznej obręczy występuje napężenie wywołane ściskaniem, połączenie sprężyste obręczy z kołem jest pewniejsze ze względu na mniejsze odkształcenie względem stanu obojętnego.

Prawdopodobieństwo pęknięcia podczas kafarowania obręczy o większej średnicy jest większe. W obręczach o większej średnicy w warstwie obwodo-

wej zewnętrznej występują naprężenia obwodowe wywołane ścisaniem. W czasie próby kafarowania naprężenia o tym samym znaku nakładają się i dlatego obręcze pękają w miejscu uderzenia bijaka.

Próba kafarowa nie jest miarodajna dla oceny jakości wykonania obręczy z uwagi na wpływ cech geometrycznych.

#### LITERATURA

- [1] WŁ. KALIŃSKI, J. TUNK, J. WOJNAROWSKI: Praca badawcza nie publ. Bibl. Inst. Podstaw Konstrukcji Maszyn, Pol. Śląskiej Gliwice, 1973.
- [2] A. JAKUBOWICZ, Z. ORŁOŚ: Wytrzymałość materiałów, WNT, Warszawa, 1972.
- [3] R. GRYBOS: Teoria uderzenia w dyskretnych układach mechanicznych. WNT Warszawa, 1969.
- [4] E. KRONER: Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen, Berlin, 1958.
- [5] T. LAMBER, J. WOJNAROWSKI: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika 40, 1969, 19.
- [6] ST. GŁĄB: Rachunek tensorowy, PWN, 1956.
- [7] F. NEUMAN: Abhand. Akad. Wiss., Berlin, 1841.
- [8] S. TIMOSHENKO, N. GOODIER: Teoria sprężystości, Arkady, 1962.
- [9] J. WOJNAROWSKI, J. ŻMUDA: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika 52, 1973, 59.

МОЖЕТ ЛИ ПРОБА ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗГИБА ОБОДОВ  
КОЛЕСНЫХ ПАР БЫТЬ ОСНОВОЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ КАЧЕСТВА

#### Р е з ю м е

В работе предпринят анализ влияния термообработки и геометрических размеров обода на результат испытания копром как мерило оценки их качества. Спираясь на теоретический анализ и экспериментальные исследования было установлено, что в зависимости от типа обода выступает различное распределение внутренних напряжений, которые оказывают влияние на испытание копром и надежность соединения обода с колесом.

MAY THE DINAMIC TEST BENDING OF WHEEL SET HOOPS  
BE THE REASON OF THE QUALITY ESTIMATION

S u m m a r y

The paper undertakes an attempt of an influence analysis of the heat treatment and geometrical features on the drop-work test result as the quality measure estimation. Basing on the theoretical analysis and the experimental tests of hoop types the different own stress distribution was stated and their influence on the dropwork results and a connection reliability of the hoop with a wheel was found.