

Władysław Kaliński, Józef Wojnarowski

BADANIE NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W ELEMENTACH KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodykę badania naprężeń własnych w elementach kolejowych zestawów kołowych. Zastosowano pomiary tensometryczne. Naprężenia własne uwalniano poprzez rozcinanie kół i wycinanie kostek z naklejonymi tensometrami oraz w wyniku wiercenia małego otworu. Zastosowana zmodyfikowana wersja metody wiercenia małego otworu pozwoliła zmniejszyć błąd pomiaru. Uzyskane wyniki ujęte w formie wykresów rozkładu naprężeń własnych umożliwiają ocenę stanu naprężenia eksploatowanych zestawów i mogą być podstawą do zmian w procesie technologicznym kół, a także do modyfikacji ich postaci konstrukcyjnej w fazie projektowania.

INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES IN ELEMENTS OF WHEEL SETS

Summary. The paper deals with the method of investigation of residual stresses in the wheel sets elements for railway. The methods of cutting, sectioning subupper surface and modified small holes drilling were used. The modified small holes drilling method were used to eliminate some mistakes in strain gauges positioning. This method provides more exact results than the last one. Experimental results which have been obtained, presented in form of residual stress distribution diagrams, make an estimation of stress state in working wheel sets possible, also a leading of constructional shape modification in designed wheels.

1. WSTĘP

Wytwarzanie kolejowych zestawów kołowych jest przyczyną zmian energetycznych ich poszczególnych elementów, wywołując odmienne oddziaływania w odniesieniu do naturalnego stanu wyjściowego.

Powstałe w ciągu operacji technologicznych naprężenia własne wywołują podobne efekty jak analogiczny stan naprężenia innego pochodzenia, np. od obciążeń zewnętrznych.

Szczególną cechą naprężeń własnych jest to, że istnieją one w wytworze bez udziału obciążeń zewnętrznych i mają zawsze czysto sprężysty charakter, nawet jeśli powstają w rezultacie odkształceń plastycznych. Nagromadzenie w ciele energii potencjalnej odkształcenia

sprężystego może wpływać dodatnio lub ujemnie na na różne stany naprężenia. W szczególności należy dążyć do tego, aby w wyniku procesu technologicznego otrzymać w warstwie przypowierzchniowej wytworu naprężenia własne o określonej wielkości, wywołane ścisiskaniem, a przez to zmniejszyć niebezpieczeństwo powstania kruchej pęknięcia. Ma to istotne znaczenie dla taboru kolejowego, gdzie złożenie istniejącego pola naprężeń własnych z naprężeniami pochodzącymi od eksploatacji [1], może prowadzić do pęknięcia kół, ich paczenia i skrzywienia podczas obróbki skrawaniem, zwłaszcza tarczy koła, lub połużowania elementów łączonych skurczowo.

Ab jednak proces technologiczny można było prowadzić racjonalnie w poszczególnych fazach wytwarzania, niezbędna jest znajomość pól naprężeń własnych utworzonych po kolejnych operacjach technologicznych, co można zrealizować eksperymentalnie. Dlatego badanie rozkładu naprężeń własnych powinno się prowadzić po kolejnych fazach procesu technologicznego, co może ułatwić podjęcie decyzji wprowadzenia w nim zmian.

2. ZASTOSOWANA TECHNIKA POMIAROWA

Wyznaczanie naprężeń własnych w hutniczych wytworach dla taboru kolejowego jest trudne z uwagi na wielkość i kształt przeznaczonych do badania elementów oraz stan powierzchni, na której instaluje się czujniki tensometryczne. Wstępne badania rozkładu naprężeń własnych w całowalcowanych kołach kolejowych różnych typów oraz w obręczach zestawu 3XT [7,8] wykazały, że naprężenia te mają tendencję szybkiej zmiany swej wartości w głąb materiału.

Istniejące sposoby badania naprężeń własnych, zwłaszcza w tego typu elementach zestawów kołowych są albo:

- mało dokładne,
- trudne w realizacji,
- wymagają unikalnej aparatury,
- dają wyniki problematyczne; wartości średnie naprężenia, maksymalne bądź przypadkowe, zależne od zastosowanej metody badań i postaci rozkładu naprężeń albo
- nie pozwalają wyznaczyć zmiany naprężenia w głąb materiału badanego elementu.

Z tej przyczyny należy najczęściej stosować złożoną procedurę uwalniania naprężeń własnych, obejmującą metody niszczące, półniszczące oraz, jeśli jest to możliwe, dokonywać analitycznej weryfikacji uzyskanych wyników pomiarów.

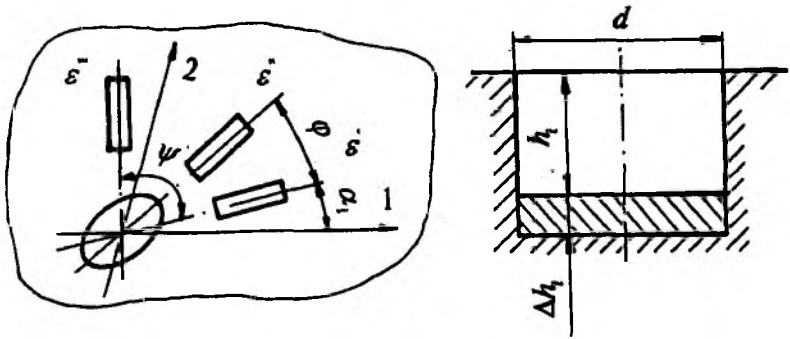
W wielu przypadkach zachodzi konieczność zbadania zmiany naprężenia w warstwach głębszych, niż to umożliwi pomiar z zastosowaniem specjalnych rozet do trepanacji, np. RY-21 firmy Hottinger Baldwin MeBład! Nie określono zakłádki.technik. Sytuacja taka wystąpiła w przypadku badania naprężeń własnych w elementach zestawów kołowych. W tym celu zmodyfikowano wzory przedstawione przez Bijak-Żochowskiego [2,3], dzięki czemu można było zastosować metodę wiercenia otworu pośrodku rozet zmontowanych z czujników tensometrycznych o dużej bazie, co pozwoliło badać naprężenia własne do głębokości kilkunastu milimetrów [4].

Ponieważ w tym przypadku mamy do czynienia z mniej precyzyjnym ułożeniem tensometrów względem frezowanego otworu, to podane we wzorach [2,3] współczynniki typu A_{in} i B_{in} należy obliczyć oddzielnie dla każdego tensometru.

Biorąc pod uwagę oznaczenia przedstawione na rys. 1, odkształcenia części pomiarowej tensometrów po wyfrezowaniu w otworze warstwy na głębokości h , można opisać zależnością

$$\varepsilon_{in} = A_{in} \Delta h_1 (\sigma_{1M} + \sigma_{2M}) + B_{in} \Delta h_1 [\sigma_{1M} \cos 2\alpha + \sigma_{2M} \cos(\alpha + 90^\circ)]$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1n}^{\cdot} &= A_{1n}^{\cdot} \Delta h_1 (\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + B_{1n}^{\cdot} \Delta h_1 [\sigma_{1n} \cos 2(\alpha_1 + \varphi) + \sigma_{2n} \cos(\alpha_1 + \varphi + 90^\circ)], \\ \varepsilon_{1n}^{\circ} &= A_{1n}^{\circ} \Delta h_1 (\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + B_{1n}^{\circ} \Delta h_1 [\sigma_{1n} \cos 2(\alpha_1 + \psi) + \sigma_{2n} \cos(\alpha_1 + \psi + 90^\circ)]. \end{aligned}$$



Rys.1. Położenie tensometrów względem otworu
Fig. 1. Strain gauges distribution towards the hole

W dalszym ciągu wykorzystuje się równania

$$\begin{aligned} \varepsilon_n^{\cdot} &= \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\cdot} + \varepsilon_n^{\cdot}, \\ \varepsilon_n^{\circ} &= \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\circ} + \varepsilon_n^{\circ}, \\ \varepsilon_{nn}^{\circ} &= \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\circ} + \varepsilon_{nn}^{\circ}, \end{aligned}$$

które rozwiązuje się ze względu na σ_{1n} , σ_{2n} oraz α_1 , obliczając wcześniej kolejno

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\cdot} &= \sum_{i=1}^{n-1} A_{in}^{\cdot} \Delta h_1 (\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + \sum_{i=1}^{n-1} B_{in}^{\cdot} \Delta h_1 [\sigma_{1n} \cos 2\alpha_i + \sigma_{2n} \cos 2(\alpha_i + 90^\circ)], \\ \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\circ} &= \sum_{i=1}^{n-1} A_{in}^{\circ} \Delta h_1 (\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + \sum_{i=1}^{n-1} B_{in}^{\circ} \Delta h_1 [\sigma_{1n} \cos 2(\alpha_i + \varphi) + \sigma_{2n} \cos 2(\alpha_i + \varphi + 90^\circ)], \\ \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\circ} &= \sum_{i=1}^{n-1} A_{in}^{\circ} \Delta h_1 (\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + \sum_{i=1}^{n-1} B_{in}^{\circ} \Delta h_1 [\sigma_{1n} \cos 2(\alpha_i + \psi) + \sigma_{2n} \cos 2(\alpha_i + \psi + 90^\circ)], \end{aligned}$$

Naprężenia własne w warstwie n-tej na kierunkach głównych 1 i 2 oblicza się z zależności

$$\begin{aligned} \sigma_{1nn} &= \frac{(\varepsilon_n^{\cdot} - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\cdot}) [A_{nn}^{\circ} - B_{nn}^{\circ} \cos 2(\alpha_n + \varphi)] - (\varepsilon_n^{\circ} - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\circ}) (A_{nn}^{\cdot} - B_{nn}^{\cdot} \cos 2\alpha_n)}{2A_{nn}^{\circ} B_{nn}^{\circ} [\cos 2\alpha_n - \cos 2(\alpha_n + \varphi)] \Delta h_n}, \\ \sigma_{2nn} &= \frac{(\varepsilon_n^{\circ} - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\circ}) (A_{nn}^{\cdot} + B_{nn}^{\cdot} \cos 2\alpha_n) - (\varepsilon_n^{\cdot} - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^{\cdot}) [A_{nn}^{\circ} + B_{nn}^{\circ} \cos 2(\alpha_n + \varphi)]}{2A_{nn}^{\cdot} B_{nn}^{\circ} [\cos 2\alpha_n - \cos 2(\alpha_n + \varphi)] \Delta h_n}, \end{aligned}$$

$$\alpha_n = \frac{1}{2} \arctg \frac{(\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i) - (\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i) + \cos 2\psi [(\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i) - (\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i)] + \cos 2\varphi [(\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i) - (\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i)]}{[(\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i) - (\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i)] \sin 2\psi + [(\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i) - (\varepsilon_n - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{in}^i)] \sin 2\varphi}$$

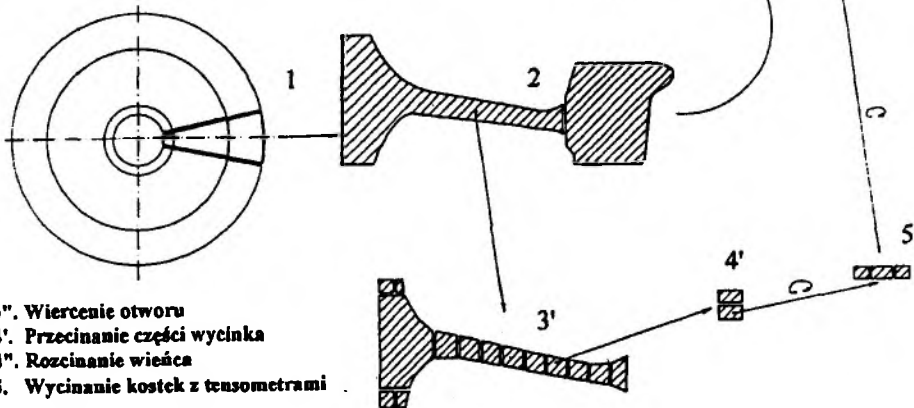
gdzie A_n oraz B_n są współczynnikami będącymi funkcją odległości od osi otworu, położenia nawierconej warstwy i liczby warstw.

Zastosowanie omówionej metody pozwala zminimalizować błąd pomiaru wynikający z różnej odległości poszczególnych tensometrów od krawędzi otworu. W tym celu można stosować rozety pomiarowe zestawione z ośmiu tensometrów i do obliczeń przyjąć wyniki pomiarów dla trzech wybranych czujników.

Badania analityczne błędu pomiaru naprężeń własnych wyznaczanych metodą wiercenia małego otworu [5], przeprowadzone przez Wang'a [6], wykazały, że najmniejszy błąd powstały wskutek niecentryczności otworu można uzyskać dla krótkich tensometrów możliwie daleko położonych od środka frezowanego otworu. Dla wymiarów geometrycznych układu tensometry - otwór, które można stosować w przypadku posługiwania się współczynnikami A_n oraz B_n , wyznaczonymi przez Bijak-Żochowskiego [2,3], błąd pomiaru nie powinien przekraczać 5 %.

Na rys.2 pokazano kolejne fazy uwalniania naprężeń własnych w całowalcowanym kole kolejowym. Podobnie można postępować podczas wyznaczania naprężeń własnych w elementach kół składanych.

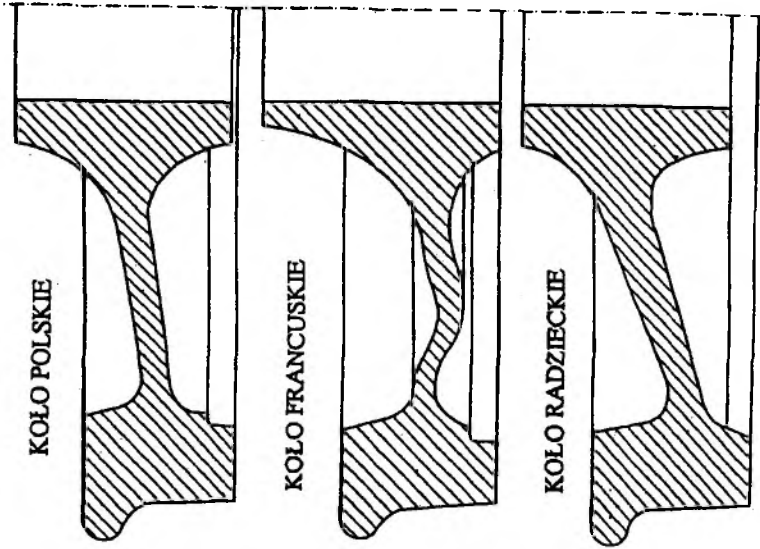
1. Wycinanie wycinka koła
2. Odcinanie wieńca
- 3'. Rozcinanie wycinka



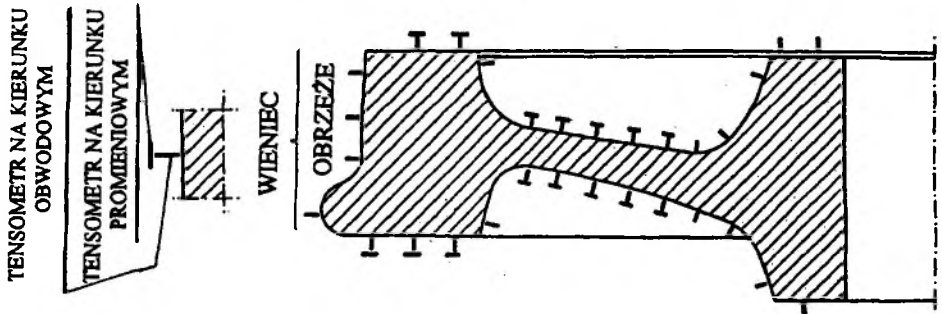
- 3". Wiercenie otworu
- 4'. Przecinanie części wycinka
- 4". Rozcinanie wieńca
5. Wycinanie kostek z tensometrami

Rys.2. Fazy uwalniania naprężeń własnych
Fig.2. Fase sequence of relieving residual stresses

Na rys.3 pokazano postacie konstrukcyjne całowalcowanych kół kolejowych, w których wyznaczono naprężenia własne stosując sposób postępowania z rys.2. Zmodyfikowaną metodę wiercenia otworu zastosowano do wyznaczenia rozkładu naprężeń w warstwach leżących pod powierzchnią toczną wieńców kół.



Rys.3. Postacie konstrukcyjne badanych kół
Fig.3. Shapes of investigated wheels



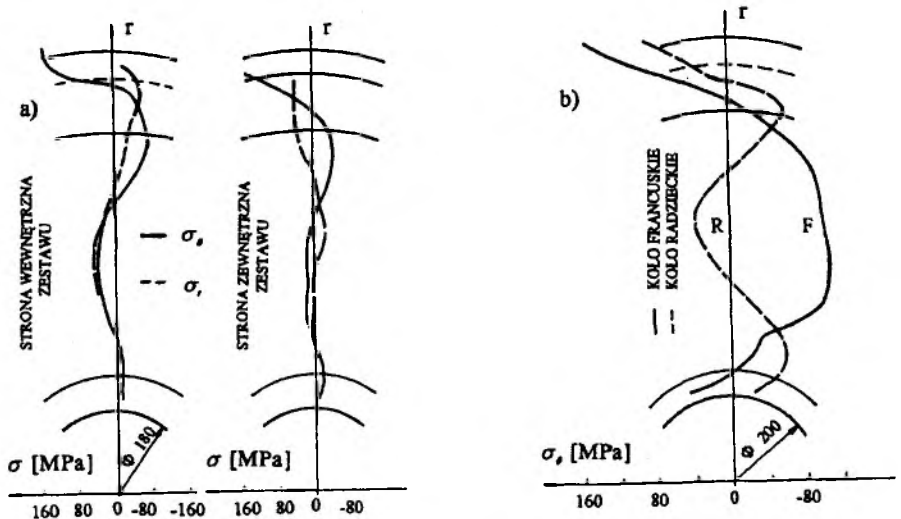
Rys.4. Układ tensometrów na powierzchni koła
Fig.4. Strain gauges distribution on a wheel

Na rys.4 przedstawiono miejsca i kierunki naklejenia czujników tensometrycznych. W kolejnych fazach uwalniania naprężeń własnych zmniejszano objętość elementów, na powierzchni których naklejone były tensometry.

Operacje rozcinania kół i wycinania kostek z naklejonymi czujnikami przeprowadzano za pomocą dłutownicy oraz piły mechanicznej i w ostatniej fazie poprzez przecinanie ręczne. Pozwoliło to zminimalizować wprowadzanie dodatkowych naprężeń w czasie tych operacji. Otwór pośrodku ośmiotensometrycznych rozet pomiarowych frezowano za pomocą frezarki sterowanej numerycznie, która umożliwiała dokładne zrealizowanie przyrostu głębokości otworu odpężającego. Wymiary układu rozeta tensometryczna-otwór odpężający mierzono mikroskopem warsztatowym. Pozwoliło to uniknąć błędów obróbki powstałych podczas frezowania otworu.

3. WYNIKI POMIARÓW

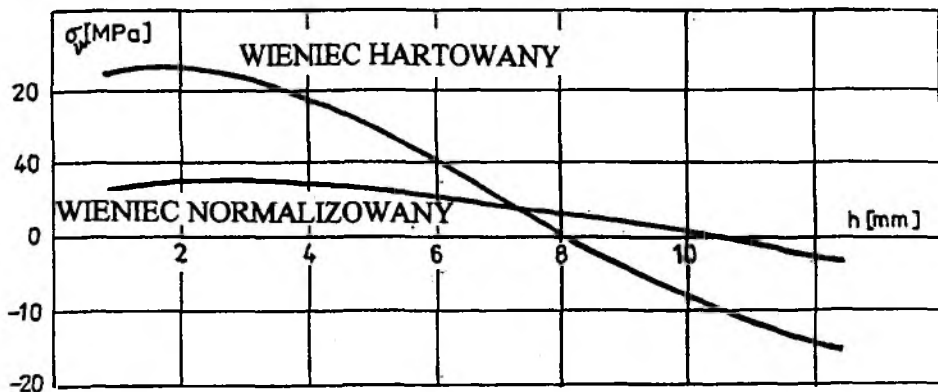
W wyniku rozcięcia wycinka koła na kostki z naklejonymi tensometrami uzyskano dane dla wyznaczenia rozkładu uwolnionych naprężeń własnych na kierunku obwodowym i promieniowym z obydwóch stron koła oraz na powierzchni toczonej wieńca. Przykładowe wyniki badań pokazano na rys.5. Naprężenia na kierunku obwodowym oznaczono σ_θ , natomiast na kierunku promieniowym σ_r .



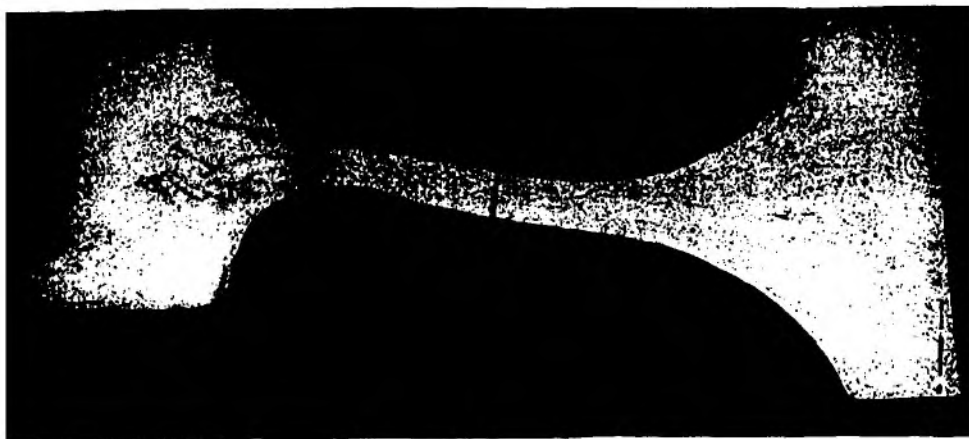
Rys.5. Rozkład naprężeń własnych σ_r i σ_θ w polskim kole z hartowanym wieńcem (a), oraz naprężeń σ_θ w kole francuskim i radzieckim (b)

Fig.5. Distribution of residual stresses σ_r and σ_θ for polish monobloc wheel with hardening ring (a) and σ_θ in french and russian wheels (b)

Na rys. 6 pokazana jest zmiana naprężeń własnych wyznaczonych w warstwach tworzywa pod powierzchnią toczną wieńca polskich kół, z hartowanym i z normalizowanym wieńcem.



Rys. 6. Zmiana naprężeń własnych w funkcji głębokości
Fig. 6. Residual stresses versus depth



Rys. 7. Pęknięcia hartownicze w kole z hartowanym wieńcem
Fig. 7. Hardening cracks in the wheel with hardening ring

Duża wartość gradientu zmian naprężeń własnych w obrzeżu koła może być przyczyną powstawania pęknięć wewnętrznych. Zjawisko takie zaobserwowano dokonując próby głębokiego trawienia wycinka przekroju poprzecznego koła z hartowanym wieńcem, rys. 7.

4. WNIOSKI

Zastosowana metoda niszcząca badań pozwoliła wyznaczyć rozkłady naprężeń własnych w warstwie przypowierzchniowej składanych i całowalcowanych kół kolejowych. Do badania zmiany naprężeń w głąb tworzywa można zastosować zmodyfikowaną metodę wiercenia otworu, która wymaga jednak specjalnych wykresów [2,3] w celu indywidualnego wyznaczenia dla każdego tensometru, stałych typu A_m oraz B_m . Wykonanie takich badań półtrepanacyjnych sposobem tradycyjnym, z użyciem miniaturowych rozet, pozwala zbadać tylko średnią wartości naprężenia, praktycznie w warstwie wierzchniej.

Wykonanie badań rozkładów naprężeń własnych umożliwia ocenę stanu napężenia w kołach po kolejnych fazach procesu technologicznego, a na tej podstawie, o ile jest to możliwe i celowe, przeprowadzić zmiany niektórych jego parametrów.

Badania dynamiczne elementów i podzespołów taboru kolejowego, np. próba kafarowania, mogą w zależności od rozkładu i wielkości naprężeń własnych dać różne wyniki, przez co wyciągnięte z takiej oceny wnioski są mało przydatne [9].

Literatura

- [1] Bąk R. i in.: Instrukcja eksploatacji systemu #KOŁO. Sprawozdanie dla Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Pojazdów Szynowych w Poznaniu. IPKM, Politechnika Śląska, Gliwice 1979.
- [2] Bijak-Żochowski M.: Pólmiszcząca metoda wiercenia małego otworu do pomiaru rozkładu naprężeń własnych w głąb materiału. Archiwum Budowy Maszyn, nr 3, 1977, nr 2, 1978.
- [3] Bijak-Żochowski M.: Metody badania naprężeń własnych. Praca habilitacyjna, Politechnika Warszawska, Warszawa 1979.
- [4] Kaliński W.: Problemy techniczne metody wiercenia małego otworu. w: Materiały Międzynarodowego Sympozjum Naukowego "Naprężenia własne - teoria i praktyka", IMiPKM Pol. Śląska, IPPT PAN, ZSP. Węgierska Górka, 1986, s.24-39.
- [5] Rendler N.J., Vigness I.: Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses. Proc. SESA, t. XXIII, nr 1, 1966.
- [6] Wang H.P.: The Alignment Error of the Hole-drilling Method. Experimental Mechanics, t. XXXVI, nr 1.
- [7] Wojnarowski J., Kaliński W.: Investigation of Residual Stresses in Rolled Metalurgic Products for Railway. W: XVII Jugoslovenski Kongres Teorijske i Primenjene Mehanike, Zadar 1986, Yugoslavia, s. 263-268.
- [8] Wojnarowski J., Kaliński W.: Investigation of Residual Stresses in Rolled Metalurgic Products for Railway. W: IV International Symposium "Creep and Coupled Processes", Publ. of Technical University of Białystok, Białystok 1992, s. 247-252.
- [9] Wojnarowski J., Kaliński W.: Wpływ procesu technologicznego kół całowalcowanych na rozkład naprężeń własnych. Inżynieria Materiałowa, nr 2 (25), 1985, s. 62-65.

Recenzent: doc. dr inż. Eugeniusz Turyk

Abstract

The paper deals with the method of investigation of residual stresses in the wheel sets elements for railway. The methods of cutting, sectioning subupper surface and modified small holes drilling were used. The modified small holes drilling method were used to eliminate some mistakes in strain gauges positioning. This method provides more exact results than the last one. Experimental results which have been obtained, presented in form of residual stress distribution diagrams, make an estimation of stress state in working wheel sets possible, also a leading of constructional shape modification in designed wheels.

The application of the considered testing method for railway wheels enables to estimate distribution of residual stresses in the range of interest for both the user and manufacturer, where the drilling of small holes gives exact figures referring to the contact vicinity between the wheel and rail.

Fig. 5 gives example diagrams of residual stresses distribution tangentially σ_{θ} and radially σ_r in surface layer of polish monobloc wheel with hardening ring and in french and russian wheels.

Using the complementary sets of testing methods for determining residual stresses in iron work products for railway have given satisfactory results from the point of view of both the manufacturers and users.

The tests of residual stresses according to international, branch or company standards, which are performed in many ways, do not always give correct and the same results, although they frequently deliver quality comparison of products coming from different manufactures.

It is mentioned that the results [8] indicate to take into more critical consideration any tests results for railway wheels, as well as the tests of wheel cutting (Standard UIC, 812-3, 1/15).