ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: TRANSPORT z. 42 Nr kol.1524

Marek SITARZ
Aleksander SŁADKOWSKI
Katarzyna CHRUZIK

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA POŁĄCZENIA MONTAŻOWEGO KOŁO – OŚ

Streszczenie. Wykorzystując pakiet programu NASTRAN opracowano metodykę obliczeń wytrzymałościowych kół kolejowych dotyczącą procesu ich montażu.

W prezentowanej pracy przedstawiono analizę numeryczną montażu koła na oś zestawu kołowego typu B- 920/200S wg PN- 92/ K- 91020.

Opracowana metodyka obliczeń wytrzymałościowych zestawów kolejowych może być wykorzystana w nowych procesach technologicznych ich montażu, optymalizacji konstrukcji elementów i automatyzacji dotychczas stosowanych technologii.

THE WHEEL-AXLE STRENGHT ANALYSIS DURING THEIR CONNECTION

Summary. New strength reckoning methodology of railway wheel set during the assembling has been described using the NASTRAN program.

The paper presents numerical analysis of wheel-axle set assembly (type: B-920/200s under PN-92/K-91020). Strength reckoning methodology of railway wheel set can by applied in: new assembly engineering process, separate elements of construction improving, automates of technology currently using and methods of their measurements.

1. WSTĘP

Kolejowy zestaw kołowy jest elementem pojazdu szynowego, który warunkuje nie tylko jakość – komfort jazdy, ale przede wszystkim bezpieczeństwo jazdy. Na wytężenie tego elementu mają wpływ warunki eksploatacji, a także proces technologiczny ich wykonania. To właśnie w czasie procesu nasadzania koła na oś, czyli montażu zestawu, pojawiają się pierwsze bardzo wysokie przemieszczenia i naprężenia zależne od wartości wcisku.

Na obecnym etapie techniki i przy obecnych możliwościach maszyn obliczeniowych możliwe stają się symulacje rozkładu przemieszczeń i naprężeń w elementach pojazdów. Ważne staje się więc, aby obliczenia mogły być przeprowadzane nie tylko poprawnie, ale również sprawnie i szybko.

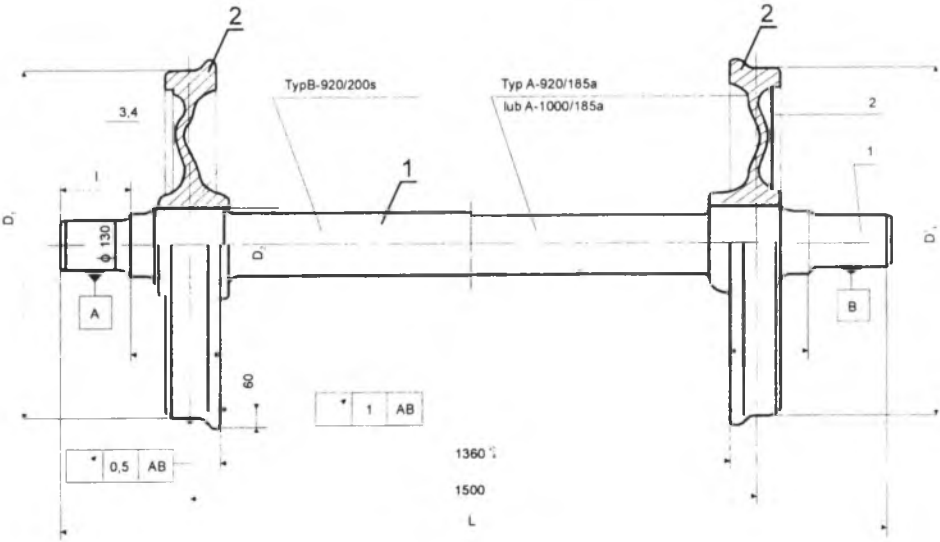
W niniejszej pracy rozpoczęto próbę zbadania procentowego rozkładu przemieszczeń w kole i w osi dla maksymalnej i minimalnej wartości wcisku określonej normami (0.18 – 0.25 mm). W przypadku znalezienia możliwie stałej proporcji przemieszczeń dalsze obliczenia można będzie uprościć do zadawania określonego procentu wartości wcisku na element kolejowego zestawu kołowego. Dodatkowo w pracy określono wartość

dynamicznego współczynnika tarcia - k w warunkach rzeczywistego montażu, która pozwoli na tworzenie rzeczywistych wykresów naprasowywania koła na oś.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE MONTAŻU ELEMENTÓW ZESTAWÓW

Zestawy kołowe należą do najbardziej odpowiedzialnych części pojazdów trakcyjnych i wagonów. Na nich spoczywa cała masa pojazdu. Zestawy kołowe przenoszą ponadto wiele obciążeń dynamicznych, wywołanych uderzeniami toczących się kół na złączach szyn, rozjazdach i nierównościach toru. Przenoszą one także siły hamowania, siły pociągowe oraz siły prowadzenia pojazdu po torze. Stan zestawów kołowych wpływa w decydującym stopniu na bezpieczeństwo jazdy. Z tych względów materiały na elementy zestawów kołowych, ich konstrukcja i wykonanie muszą gwarantować dużą trwałość, właściwą wytrzymałość i niezawodność w ruchu.

Zestaw kołowy (rys. 1) składa się z osi – 1 wykonanej ze stali kutej oraz z dwóch kół – 2 wprasowanych pod dużym ciśnieniem na wał.



Rys. 1. Zestaw kołowy z osią pełną
Fig. 1. Railway wheelset with complete axle

Połączenie koła z osią musi być szczególnie wytrzymałe i niezawodne. Szerokie zastosowanie w eksploatacji mają połączenia wciskowe koła z osią. Koło, którego średnica piasty jest mniejsza od średnicy podpiaścia osi, jest z dużą siłą wciskane na podpiaście i w efekcie uzyskuje się połączenie o wysokiej trwałości.

Uzyskanie wymaganej pewności połączenia i niedopuszczenie do uszkodzenia łączonych powierzchni wymaga właściwego doboru siły wtłaczania. Sprawdzianem jakości uzyskanego połączenia jest wykres siły wtłaczania, który powinien odpowiadać wymogom PN-92/K-91045.

Przepisy międzynarodowe i krajowe uzależniają wartość siły wtłaczania koła na oś od średnicy podpiaścia. We wszystkich przypadkach siła wtłaczania jest wprost proporcjonalna do średnicy podpiaścia osi i wyraża się wzorem:

$$P \approx D\,k \qquad [kN] \tag{2.1}$$

gdzie:
P – siła wtłaczania [kN],
D – średnica podpiaścia osi [mm],
k – współczynnik siły jednostkowej przypadającej na 1 mm średnicy połączenia [kN/mm].

W różnych zarządach kolejowych współczynnik k (tablica 1) zależy od konstrukcji zestawu, od materiału koła lub od rodzaju smaru stosowanego przy łączeniu części przez wtłaczanie. Wartości tego współczynnika są ustalane doświadczalnie, więc i wzór ma charakter doświadczalny. W skali międzynarodowej wartości współczynnika k podaje karta UIC 813-1, a dla potrzeb PKP ustalono go w normie PN-92/K-91045 [4].

Tablica 1

Wartości współczynnika k wg PN-92/K-91045

Część wtłaczana	Wartości graniczne współczynnika k, kN/mm			
	nazwa części nasadzanej			
	koło obręczowane lub bezobręczowe	koło bose	koło zębate	korba
	olej roślinny			
oś zestawu kołowego napędnego lokomotywy o nacisku na szynę powyżej 170 kN	5,0 – 7,0	4,5 – 6,5	-	-
oś zestawu kołowego napędnego lokomotywy o nacisku na szynę do 170 kN	4,5 – 6,5	4,0 – 6,0	-	-
oś zestawu kołowego napędnego wagonu silnikowego spalinowego lub elektrycznego	4,5 – 6,5	4,0 – 5,5	-	-
oś zestawu kołowego wagonowego tendrowego oraz tocznego pojazdu trakcyjnego	4,0 – 6,0	3,5 – 5,0	-	-
wydłużona piasta koła bosego zestawu kołowego napędnego	-	-	1,5 – 2,5	-
oś zestawu kołowego napędnego wtłaczana w koło, na którego wydłużonej piaście jest osadzone koło zębate	4,5 – 6,5	4,0 – 6,0	-	-
czopy napędowe korbowe lub wiązarowe zestawu kołowego napędnego	4,0 – 6,0	3,5 – 5,5	-	3,5 – 5,5
oś zestawu kołowego napędnego	-	-	2,0 – 3,0	-
oś zestawu kołowego wagonowego lub tendrowego	3,5 – 5,0[1)]	3,0 – 4,5[1)]	-	-

[1)] wartości przy stosowaniu loju.
Wartości graniczne współczynnika k określono dla L/D = 0,8÷1,1.
Do innego stosunku L/D wartość współczynnika powinien ustalić zamawiający

Wymagany wcisk uzyskiwany jest przez:
- obróbkę podpiaścia osi na średnicę większą od średnicy otworu w piaście koła (określonej w dokumentacji technicznej);
- obróbkę otworu w piaście koła na średnicę mniejszą od średnicy podpiaścia osi (określonej w dokumentacji technicznej).

Wcisk należy obliczyć wg wzoru:

$$W = \frac{d \cdot a}{1000} \qquad [mm] \tag{2.2}$$

gdzie:

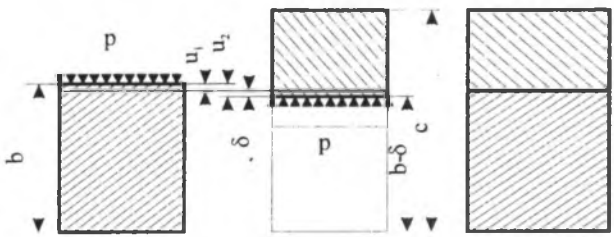
d – średnica połączenia [mm],

a – współczynnik wcisku 0,9 ÷ 1,25 %.

Przytoczona wyżej norma PN-92/K-91045 wymaga wykonania wykresu, stanowiącego podstawę do odebrania wtłaczanego połączenia. Idealny wykres jest praktycznie nie do osiągnięcia. Takiego kształtu wykresu nie da się uzyskać z uwagi na występowanie takich zjawisk, jak nierównomierność smarowania, błędy kształtu elementów, drgania układu wodzącego, wibracje silnika itp. Z tego też powodu niektóre z zarządów kolejowych określają bądź to słownie, bądź za pomocą przykładowych rysunków, które z odchyleń od kształtu idealnego są dopuszczalne [4].

3. PODSTAWY ANALITYCZNE MONTAŻU ELEMENTÓW ZESTAWÓW

Połączenie wciskowe najprościej opisać na przykładzie rury nasadzonej na walec. Przed zmontowaniem takiego układu rura zewnętrzna ma promień wewnętrzny mniejszy o pewną małą wartość δ od promienia zewnętrznego walca (rys. 2). Po zmontowaniu układu (np. przez nałożenie podgrzanej rury zewnętrznej na chłodny wewnętrzny walec) na stykających się ze sobą powierzchniach skrajnych rur wystąpią siły, które można określić ciśnieniem p.



Rys. 2. Połączenie wciskowe rury nasadzonej na walec
Fig. 2. Interference joint of the pipe put on the roll

W celu wyznaczenia tego naprężenia wyznaczmy przemieszczenie u_1 zewnętrznej powierzchni walca wewnętrznej i przemieszczenie u_2 wewnętrznej powierzchni rury zewnętrznej. Przy oznaczeniach jak na rys. 2 obliczmy u_1 i u_2 wykorzystując wzór na przemieszczenie promieniowe (3.1):

$$u = \frac{1}{E \cdot b^2} \left[(1 - \nu) \cdot (b^2 p_b) \cdot r \right] \tag{3.1}$$

gdzie:

E - moduł sprężystości,

b - średnica walca,

v - współczynnik Poissona,

p - ciśnienie

i dla uproszczenia przyjmując zamiast (b – δ) wprost b w wyrażeniu na u_2. Po prostych przekształceniach otrzymujemy:

$$u_1 = -\frac{bp}{E_1}(1-\nu) \tag{3.2}$$

$$u_2 = \frac{bp}{E_2}\left(\frac{b^2+c^2}{c^2-b^2} - \nu\right) \tag{3.3}$$

Przy uwzględnieniu wartości algebraicznych przemieszczeń u_1 i u_2 otrzymujemy oczywistą zależność

$$u_2 - u_1 = \delta \tag{3.4}$$

W przypadku gdy oba elementy wykonane są z tego samego materiału, czyli $E_1 = E_2 = E$, po podstawieniu równań (3.2) i (3.3) do wzoru (3.4) otrzymujemy następujący wzór na ciśnienie pomiędzy powierzchniami elementów:

$$p = \frac{E\delta}{2bc^2}\left(c^2 - b^2\right) \tag{3.5}$$

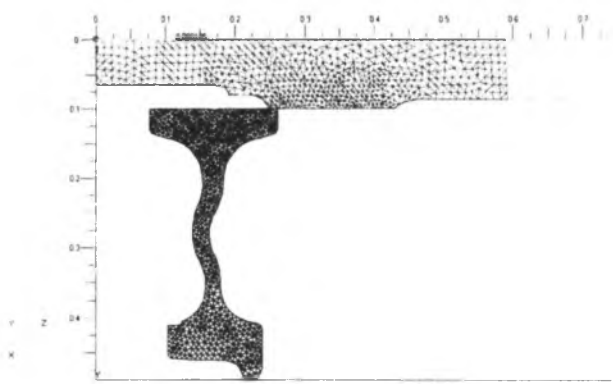
Znając wartość p można wyznaczyć rozkłady naprężeń w obu elementach.

4. WYZNACZENIE PRZEMIESZCZEŃ I NAPRĘŻEŃ WYNIKAJĄCYCH Z WCISKU KOŁA NA OŚ

4.1. Wstępne obliczenia

Przeprowadzone badania mają na celu ustalenie procentowego rozkładu przemieszczeń i naprężeń w kole i osi wynikających z montażu koła na oś. Obliczenia będą wykonywane dla dziewięciu geometrii kół kolejowych zestawów kołowych o różnych profilach tarczy i piasty.

Pierwsza symulacja wcisku montażowego została przeprowadzona dla montażu koła na oś zestawu kołowego typu B- 920/200s wg PN- 92/ K- 91020 – rys. 3.



Rys. 3. Geometria kolejowego zestawu kołowego B- 920/200s przygotowana do obliczeń numerycznych
Fig. 3. Geometry of B – 920/200s railway wheelset prepared for numerical calculations

W wyniku przeprowadzonej symulacji otrzymaliśmy mapy naprężeń, wynikających z wcisku koła na oś dla obliczonej maksymalnej wartości wcisku W=0,25 mm (rys. 4), oraz wykres naprasowywania koła na oś – rys. 5.

4.2. Rzeczywista wartość współczynnika k

W trakcie przeprowadzania wstępnych obliczeń przyjęto literaturową teoretyczną wartość dynamicznego współczynnika tarcia $k_{lit} = 0,1$. Przy założonej wartości wcisku $W_{max} = 0,25$ mm naprasowano koło na oś tworząc wykres naprasowania – rys. 5.

Odczytano z wykresu wartość maksymalnej siły naprasowywania $P_{maxN} = 920$ kN.

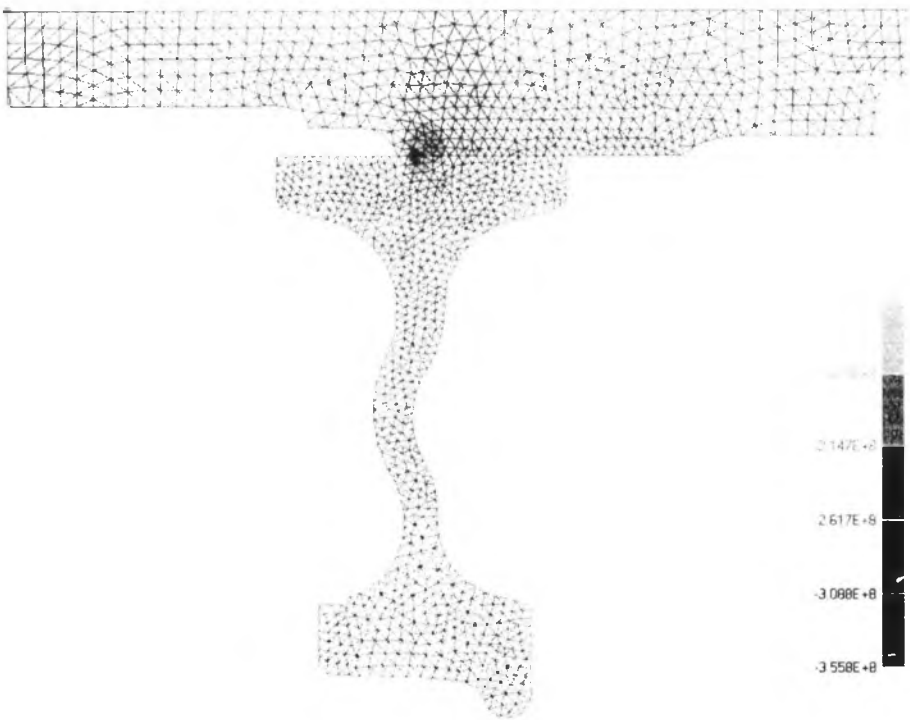
Znając rzeczywistą wartość wcisku stosowanego w zakładach produkcyjnych obliczono rzeczywistą warość siły P_{rzN}.

$W_{rz} = 0,2105$ mm

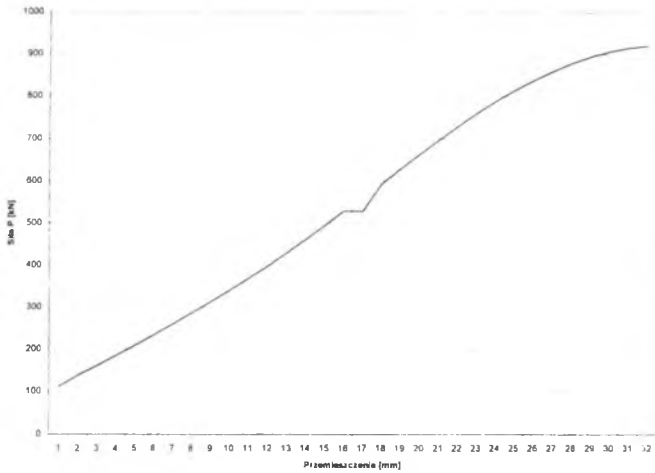
$$P_{rzN} = \frac{P_{max\,N} \cdot W_{rz}}{W_{max}} \tag{4.1}$$

P_{rzN} = 774,64 kN

W celu znalezienia rzeczywistej wartości współczynnika k uczestniczono w montażu koła na oś przeprowadzonego w Hucie Gliwice – Osie Sp. z o. o., w wyniku czego otrzymano 20 rzeczywistych wykresów naprasowywania.



Rys. 4. Mapy naprężeń wynikających z naprasowywania koła na oś przy maksymalnej wartości wcisku
Fig. 4. Stresses charts obtained from putting the wheel on the axle if the inference index is maximal



Rys. 5. Wykres naprasowywania koła na oś powstały w wyniku obliczeń numerycznych
Fig. 5. Chart of putting the wheel on the axle resulting from numerical calculations

Średnia wartość rzeczywistego wcisku: $W_{rz} = 0{,}2105$ mm.

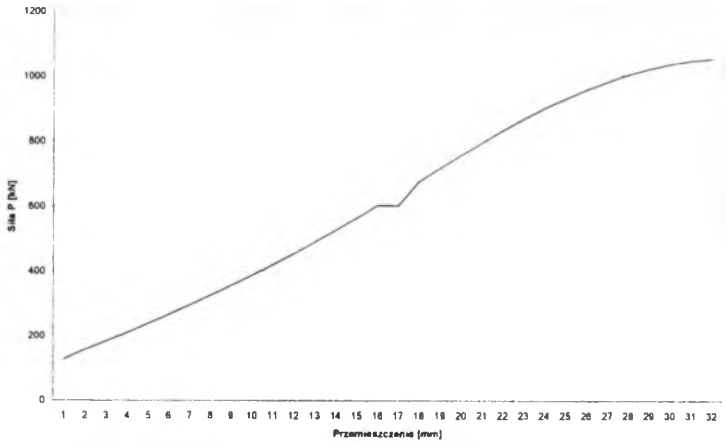
Średnia wartość rzeczywistych sil wtłaczania: P = 883,95 kN.

Znając teoretyczną wartość współczynnika k_{lit}, wyznaczoną komputerowo siłę P_{rzN} oraz średnią wartość rzeczywistej siły P z 20 wykresów obliczono rzeczywistą wartość k:

$$k = \frac{P \cdot k_{lit}}{P_{rz}} \tag{4.2}$$

k = 0,1141

Dalsze wykresy naprasowywania kreślono z wyliczoną rzeczywistą wartością współczynnika k, co pozwoliło na otrzymanie wykresu naprasowywania – rys 6.



Rys. 6. Wykres naprasowywania koła na oś powstały w wyniku badań doświadczalnych
Fig. 6. Chart of putting the wheel on the axle resulting from experimental research

Mimo niewielkiej różnicy w wartości współczynnika k wykres, który powstał po analizie, wykazuje różnicę.

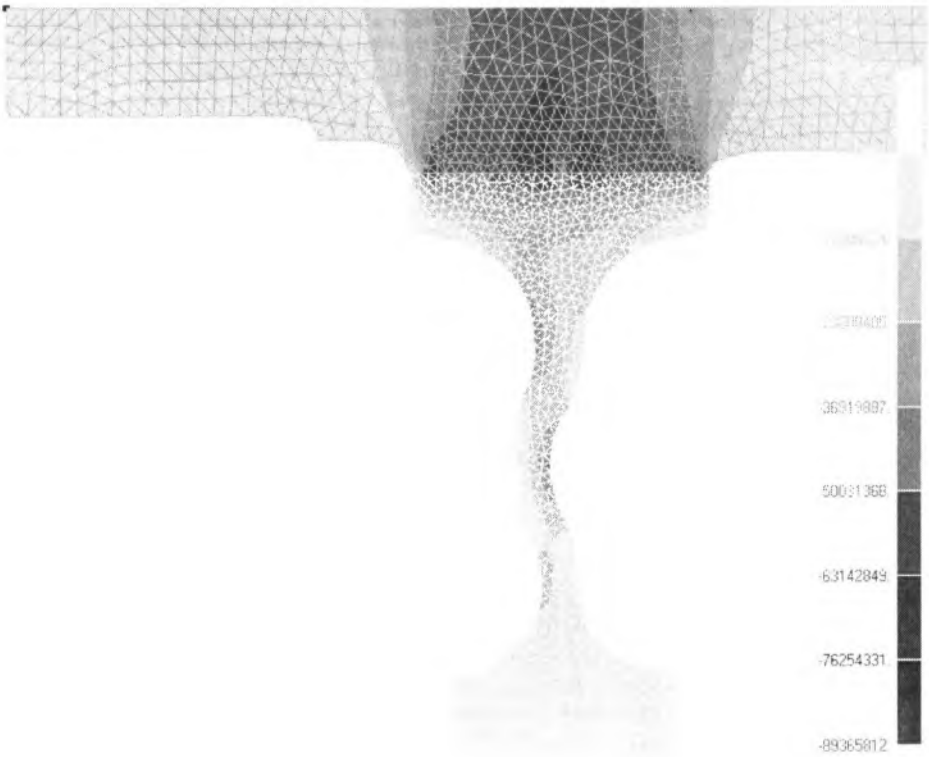
4.3. Obliczenia z rzeczywistą wartością współczynnika k

W celu porównania zmian w mapach naprężeń wynikających z zastosowania innej wartości wcisku przeprowadzono obliczenia dla W=0,18 mm (minimalna wartość wcisku) – rys. 7.

5. UWAGI I WNIOSKI

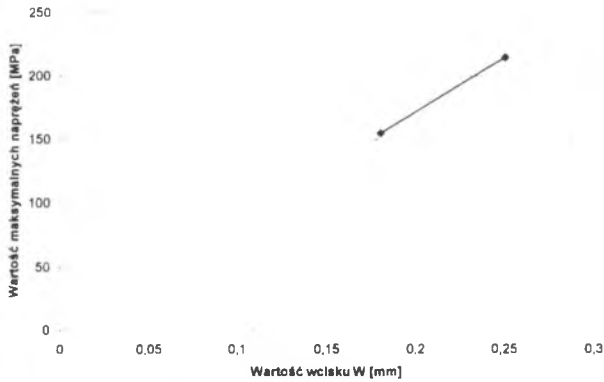
Przeprowadzona analiza pozwoliła na porównanie wpływu wartości wcisku na rozkład naprężeń oraz ustalenie procentowego rozkładu wcisku na poszczególne elementy zestawu (koło, oś):

- rozkład naprężeń w kole pozostaje niezmienny (maksymalne naprężenia pojawiają się w piaście koła i przegięciu tarczy);



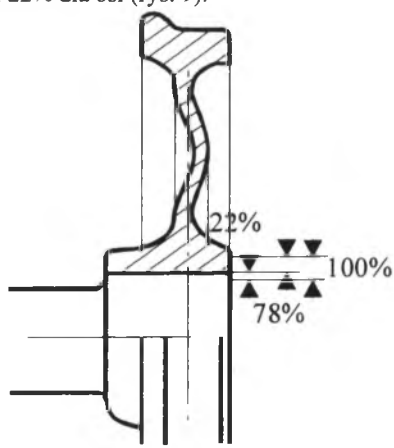
Rys. 7. Mapy naprężeń wynikających z naprasowywania koła na oś przy minimalnej wartości wcisku
Fig. 7. Stresses charts occured from putting the wheel on the axle if the interference index is minimal

– wartość naprężeń zmienia się proporcjonalnie do zmiany wartości wcisku o 38,8 % (dla W=0.18 mm σ = 155 MPa, W=0.25 mm σ = 215 MPa) – rys. 8;



Rys. 8. Wykres zmiany naprężeń w stosunku do zmiany wartości wcisku
Fig. 8. Chart of stresses change according to the changes of interference index

– procentowy stosunek przejęcia wartości wcisku jest stały dla obu wartości wcisku i wynosi 78% dla koła i 22% dla osi (rys. 9).



Rys. 9. Stosunek rozkładu przemieszczeń wynikających z wcisku koła na oś
Fig. 9. Proportion of the dislocations distribution occured from wheel interference on the axle

Literatura

1. Kowalski E.: Pojazdy trakcyjne, WKiŁ, Warszawa 1987, s. 49 – 50.
2. Przegląd technologii osi, kół oraz wagonowych zestawów kołowych, SITPH, Gliwice 1972, s. 112 – 114, 117 – 123.
3. Polska Norma PN-92/K-91045.Tabor kolejowy. Zestawy kołowe. Wymagania i badania.

4. Podemski J., Marczewski R., Majchrzak Z.: Zestawy kołowe i maźnice, WKiŁ, Warszawa 1978, s. 149 – 150.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Piec

Abstract

The wheel set, one of the most important part of the rail-vehicle, takes most of acting forces over. The influence of foreseeing permanent increase of speed and axial load on wheel set as load element becomes very urgent problem. Therefore it is necessary to improve operational conditions of wheel set, particular in work reliability. Constructional forms of these elements currently appearing have been resulted from exploitation and technological tests, and lately also from numerical analysis which is used in strains and stresses investigations. Wheel set reliability mostly depends on wheel-axle connection.

There are the stresses caused by interference during the wheel-axle assembly process. Level of the loads is controlled during the assembling. It is very important because too little value of interference is liable to entail in wheel rotation on the axle-which is very dangerous during the exploitation and similarly, too much value of interference may entail in wheel break.

New strength reckoning methodology of railway wheel set during the assembling has been described using the NASTRAN program.

The paper presents numerical analysis of wheel-axle set assembly (type: B-920/200s under PN-92/K-91020). Strength reckoning methodology of railway wheel set can by applied in: new assembly engineering process, separate elements of construction improving, automates of technology currently using and methods of their measurements.

Praca wykonana w ramach Badań Kierunkowych BK – 225/RM 10/2001