ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: TRANSPORT z. 40 Nr kol.1490

Antoni JOHN
Krzysztof KARWALA
Bogna MRÓWCZYŃSKA

WPŁYW WIELKOŚCI WCISKU NA ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ W KOLEJOWYCH ZESTAWACH KOŁOWYCH Z TECHNOLOGICZNĄ WARSTWĄ WIERZCHNIĄ

Streszczenie. W celu podniesienia nośności i trwałości połączenia koła z osią w kolejowych zestawach kołowych stosuje się obróbkę warstwy wierzchniej osi. Powoduje to wprowadzenie naprężeń wstępnych z jednoczesnym podniesieniem parametrów wytrzymałościowych materiału osi. Zakładając stałe obciążenia eksploatacyjne zmianę rozkładu naprężeń uzyskuje się przy zmianie wartości wcisku i naprężeń wstępnych w warstwie utwardzonej osi. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę numeryczną wpływu wymienionych wielkości na rozkład naprężeń składowych i redukowanych w kolejowych zestawach kołowych. Zadanie rozwiązano jako osiowosymetryczne przyjmując liniowo sprężyste własności materiału. Do obliczeń zastosowano metodę elementów skończonych.

THE EFFECT OF INTERFERENCE ON STRESS DISTRIBUTION ON RAILWAY WHEEL SET WITH HARDENING SURFACE OF AXLE

Summary. The effort of railway wheel set depends on (in great measure) on the parameters of connection between the wheel and axle. One of the method using actually to increase on effort of the wheel set is hardening surface of axle.

Hardening surface causes that initial stresses appear and yield point increases. In the present paper the effect of values mentioned above on stress components and reduced stresses is analysed. Linear elastic material is assumed. The problem is solved as axisymetric using FEM.

1. WPROWADZENIE

Jedną z metod zwiększania wytrzymałości i trwałości zestawów kołowych jest utwardzanie warstwy wierzchniej osi w obszarze połączenia z kołem. W trakcie utwardzania powstają na-

prężenia wewnętrzne w warstwie poddawanej obróbce. Ich wielkość i rozkład zależy od stosowanej metody, np. hartowania indukcyjnego, azotowania, napawania.

W analizie numerycznej zestawu kołowego niezbędne jest uwzględnienie naprężeń pochodzących od obciążeń eksploatacyjnych, wcisku, a także naprężeń wstępnych powstających w utwardzonej warstwie wierzchniej. W pracy analizowano zestaw kołowy z warstwą wierzchnią osi utwardzoną hartowaniem indukcyjnym. Pominięto naprężenia cieplne pochodzące od hamowania, ponieważ strefy ich występowania nie leżą na osi. Zagadnienie analizowano dla różnych wartości wcisku w zakresie od 0.1 mm do 0.3 mm oraz dla dwóch różnych rozkładów naprężeń wstępnych w warstwie wierzchniej osi powstałych w wyniku hartowania indukcyjnego.

2. MODEL NUMERYCZNY

Analizie numerycznej poddano zestaw kołowy ORE920 o kołach monoblokowych ze zmodyfikowanym kształtem tarczy koła. Jako materiał kół przyjęto stal P58, dla której moduł Younga $E = 2{,}1*10^5$ MPa , stała Poissona $\nu = 0{,}3$.

Analizę numeryczną zagadnienia przeprowadzono przy użyciu pakietu KOLO-PC programów metody elementów skończonych. Zagadnienie rozwiązano jako osiowosymetryczne. Przy wyznaczaniu naprężeń roboczych uwzględniane są następujące zagadnienia:

* naprężenia montażowe (pochodzące od wcisku),
* obciążenia eksploatacyjne (siły skupione pochodzące od ciężaru wagonu i ładunku).

Dodatkowo w rozpatrywanym zagadnieniu uwzględniono naprężenia wstępne w warstwie wierzchniej osi pochodzące od hartowania indukcyjnego. Jest to nowy aspekt zagadnienia, nie uwzględniany w dotychczas przeprowadzanych obliczeniach, gdyż większość komercyjnych programów MES nie ma możliwości uwzględnienia naprężeń wstępnych. Nie uwzględniono natomiast naprężeń cieplnych, gdyż nie mają one istotnego wpływu na rozkład naprężeń w osi zestawu.

Po wyliczeniu naprężeń pochodzących od wyżej wymienionych oddziaływań wyznaczane są naprężenia wypadkowe metodą superpozycji, a następnie naprężenia redukowane według hipotezy energii odkształcenia postaciowego Hubera - Misesa - Hencky'ego.

Przyjęto, że obciążenia działają na styku koła z szyną, a podparta jest oś zestawu.

3. ANALIZA NUMERYCZNA

Jako obciążenia zestawu przyjęto obciążenia eksploatacyjne 225000 N na oś, obciążenia montażowe od wcisków 0,1mm, 0,15mm, 0,2 mm, 0,25 mm i 0,30 mm oraz uśrednione naprężenia wstępne w warstwie wierzchniej osi zgodnie z tablicą 1 i 2.

Tablica 1

Model fizyczny warstwy hartowanej indukcyjnie.
Głębokość hartowania 1 mm

Strefa	Głębokość zalegania [mm]	Śred. tward. HV1	E [MPa]	$R_{o,2}$ [MPa]	σ [MPa] obwodowych	σ [MPa] osiowych
1	0÷0.3	780	206010	838	−220	−150
2	0.3÷0.6	780	206010	838	−350	−400
3	0.6÷0.8	730	205520	824	−100	−300
4	0.8÷0.9	575	205500	793	−20	0
5	0.9÷1.0	425	205330	758	+25	+125
6	1.0÷1.06	315	205120	672	+45	+220
7	1.06÷1.2	260	204000	600	+220	+580
8	1.2÷1.5	260	204000	600	+470	+590
9	1.5÷2.0	260	204000	600	+640	+560
10	2.0÷3.0	260	204000	600	+530	+400
11	3.0÷4.0	260	204000	600	+310	+200
12	4.0÷5.5	260	204000	600	+100	−40
13	5.5÷7.0	260	204000	600	−60	−130
14	7.0÷10.0	260	204000	600	−100	−120

Tablica 2

Model fizyczny warstwy hartowanej indukcyjnie.
Głębokość hartowania 1,8 mm

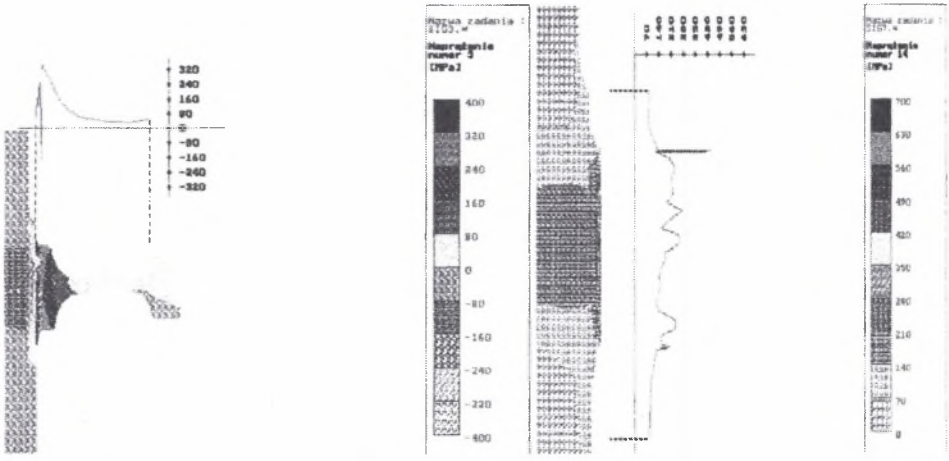
Strefa	Głębokość zalegania [mm]	Śred. tward. HV1	E [MPa]	$R_{o,2}$ [MPa]	σ [MPa] obwodowych	σ [MPa] osiowych
1	0÷0.5	750	206010	834	−150	−400
2	0.5÷0.8	750	206010	834	−430	−540
3	0.8÷1.35	715	205520	820	−370	−570
4	1.35÷1.5	615	205500	800	−420	−450
5	1.5÷1.6	450	205330	768	−380	−400
6	1.6÷1.8	380	205120	689	0	−200
7	1.8÷2.0	260	204000	600	+350	+210
8	2.0÷2.8	260	204000	600	+480	+500
9	2.8÷4.0	260	204000	600	+470	+390
10	4.0÷6.0	260	204000	600	+300	+140
11	6.0÷7.0	260	204000	600	+70	−50
12	7.0÷8.5	260	204000	600	−40	−80
13	8.5÷13.0	260	204000	600	−70	−70

W dalszej części pracy przyjęto następujące nazewnictwo poszczególnych warstw wierzchnich: warstwa 1 - model zgodny z tablicą 1, warstwa 2 - model zgodny z tablicą 2.

Naprężenia redukowane pochodzące od obciążeń eksploatacyjnych, wcisków, a także z uwzględnieniem naprężeń wstępnych w warstwie wierzchniej osi przedstawiają rys. 3.1 – 3.4. Największe naprężenia występują w obszarze styku koła z osią. Duże wartości występują również w środku osi pod tarczą koła.

W przypadku utwardzenia warstwy wierzchniej metodą hartowania indukcyjnego wypadkowe naprężenia pochodzą od wcisku, obciążeń eksploatacyjnych oraz naprężeń wstępnych wynikających z wprowadzenia technologicznej warstwy wierzchniej.

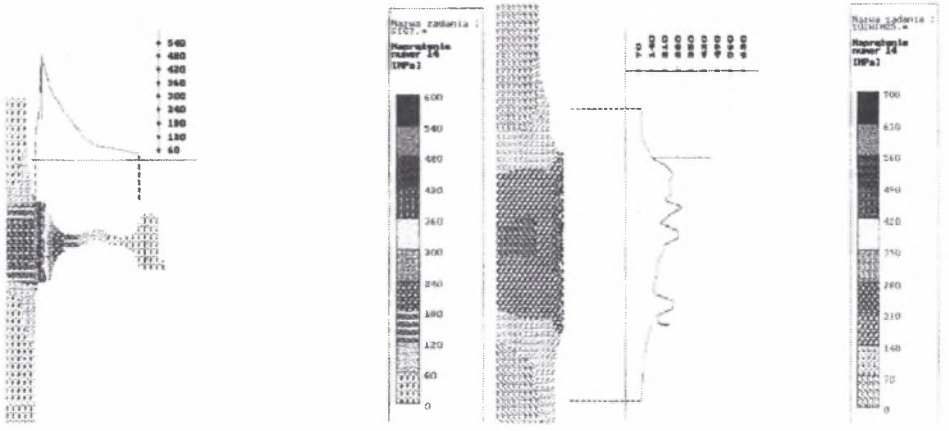
Przyjmując wartości granicy plastyczności dla materiału osi (poza technologiczną warstwą wierzchnią) oraz koła 360 MPa lub 390 MPa [6,8] wyznaczono obszary uplastycznione dla poszczególnych wartości wcisku. Strefy uplastycznienia dla poszczególnych wartości granicy plastyczności przy różnych wartościach wcisku (0.2 mm i 0.25 mm) dla poszczególnych przypadków obciążenia przedstawiają rys. 3.5 –3.8.



a) *b)*

Rys.3.1. Rozkład naprężeń redukowanych i wykresy wartości na brzegu po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, montażowych dla wcisku 0,2 mm oraz naprężeń w warstwie 1: a) dla całego koła, b) dla osi

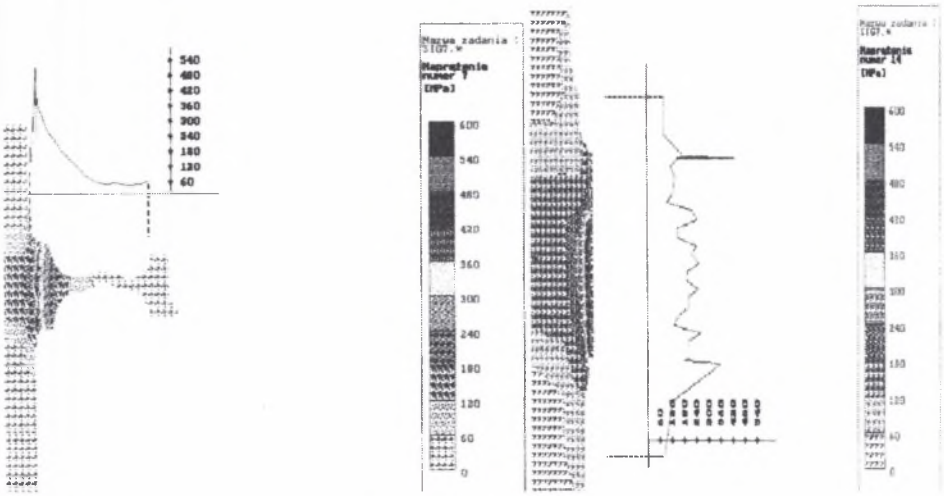
Fig.3.1. Distribution of reduced stresses and chart of boundary value after superposition for interference 0.2 mm and initial stress in layer 1: a) for wheel and axle, b) for axle



a) *b)*

Rys.3.2. Rozkład naprężeń redukowanych i wykresy wartości na brzegu po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, montażowych dla wcisku 0,25 mm oraz naprężeń w warstwie 1: a) dla całego koła, b) dla osi

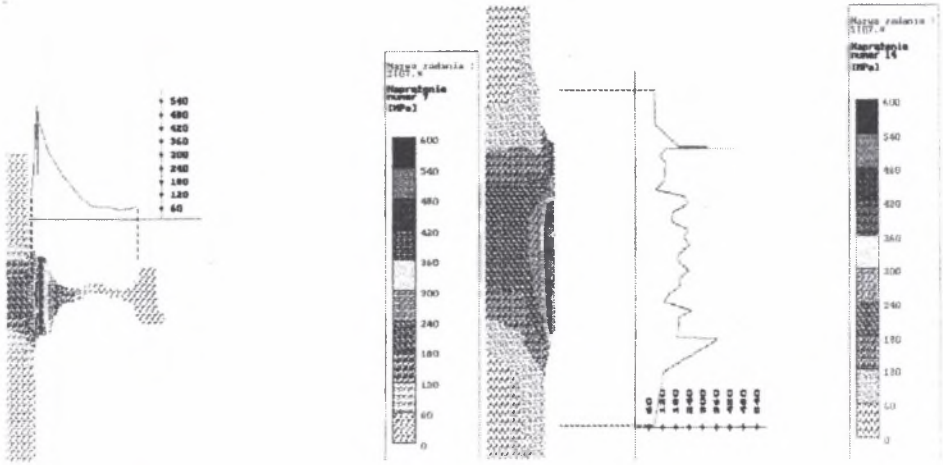
Fig.3.2. Distribution of reduced stresses and chart of boundary value after superposition for interference 0.25 mm and initial stress in layer 1: a) for wheel and axle, b) for axle



a) *b)*

Rys.3.3. Rozkład naprężeń redukowanych i wykresy wartości na brzegu po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, montażowych dla wcisku 0,2 mm oraz naprężeń w warstwie 2: a) dla całego koła, b) dla osi

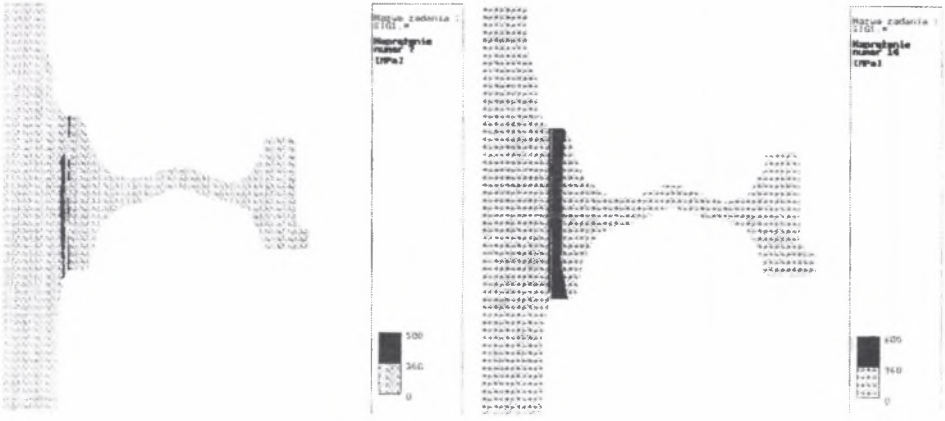
Fig.3.3. Distribution of reduced stresses and chart of boundary value after superposition for interference 0.2 mm and initial stress in layer 2: a) for wheel and axle, b) for axle



a) *b)*

Rys.3.4. Rozkład naprężeń redukowanych i wykresy wartości na brzegu po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, montażowych dla wcisku 0,25 mm oraz naprężeń w warstwie 2: a) dla całego koła, b) dla osi

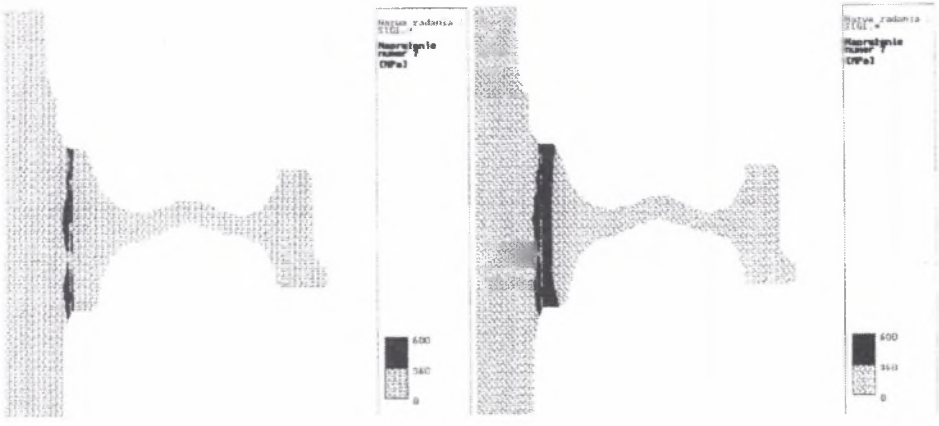
Fig.3.4. Distribution of reduced stresses and chart of boundary value after superposition for interference 0.25 mm and initial stress in layer 2: a) for wheel and axle, b) for axle



a) *b)*

Rys.3.5. Obszary uplastycznienia przy granicy plastyczności 360 MPa w przypadku naprężeń redukowanych otrzymanych po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, naprężeń w warstwie 1 oraz montażowych dla wcisku: a) 0,2 mm, b) 0,25 mm

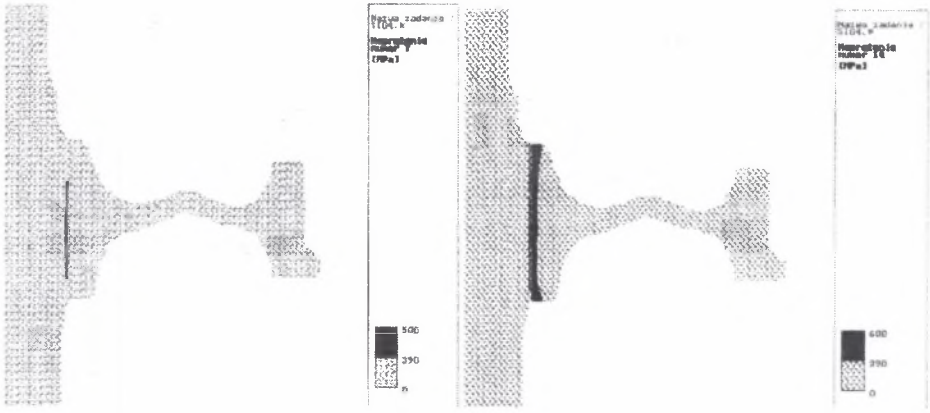
Fig. 3.5. Plastic zone for yield point 360 MPa for reduced stresses after superposition (layer 1) with given interference a) 0.2 mm, b) 0.25 mm



a) *b)*

Rys.3.6. Obszary uplastycznienia przy granicy plastyczności 360 MPa w przypadku naprężeń redukowanych otrzymanych po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, naprężeń w warstwie 2 oraz montażowych dla wcisku: a) 0,2 mm, b)0,25 mm

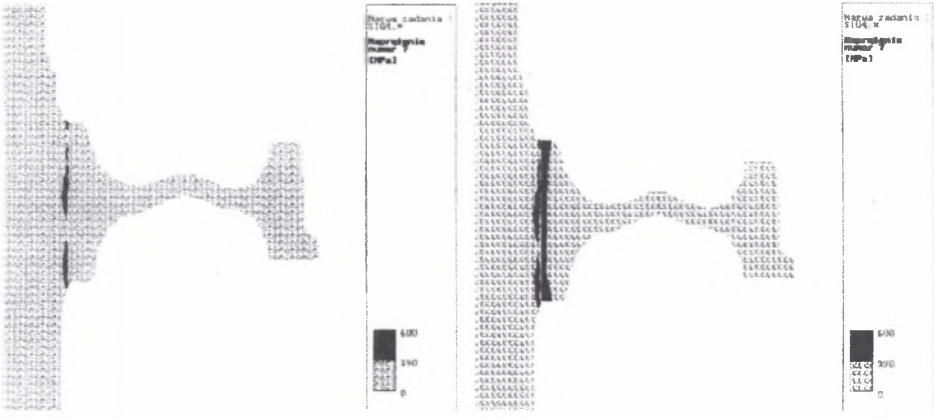
Fig. 3.6. Plastic zone for yield point 360 MPa for reduced stresses after superposition (layer 2) with given interference a) 0.2 mm, b) 0.25 mm



a) *b)*

Rys.3.7. Obszary uplastycznienia przy granicy plastyczności 390 MPa w przypadku naprężeń redukowanych otrzymanych po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, naprężeń w warstwie 1 oraz montażowych dla wcisku: a) 0,2 mm, b)0,25 mm

Fig. 3.7. Plastic zone for yield point 390 MPa for reduced stresses after superposition (layer 1) with given interference a) 0.2 mm, b) 0.25 mm



a) *b)*

Rys.3.8. Obszary uplastycznienia przy granicy plastyczności 390 MPa w przypadku naprężeń redukowanych otrzymanych po superpozycji naprężeń eksploatacyjnych, naprężeń w warstwie 2 oraz montażowych dla wcisku: a) 0,2 mm, b)0,25 mm

Fig. 3.8. Plastic zone for yield point 390 MPa for reduced stresses after superposition (layer 2) with given interference a) 0.2 mm, b) 0.25 mm

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że tylko wciski 0,1 i 0,15 nie powodują uplastycznienia koła dla dowolnej stali. Wciski powyżej 0,15 powodują lokalne uplastycznienie koła w strefie kontaktu z osią dla wszystkich gatunków stali. Im większa wartość wcisku, tym większa strefa uplastycznienia.

Granica plastyczności w technologicznej warstwie wierzchniej jest znacznie wyższa niż w stali nieutwardzonej, a jej minimalna wartość wynosi 600 MPa, dlatego też analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że dla żadnych wartości wcisku nie występuje uplastycznienie osi po wprowadzeniu technologicznej warstwy wierzchniej. W tym przypadku o wytężeniu zestawu kołowego decydują naprężenia występujące w kole.

4. Podsumowanie. Wnioski

Wyniki analizy numerycznej pozwoliły określić wpływ naprężeń wstępnych w technologicznej warstwie wierzchniej na sumaryczny rozkład naprężeń w zestawie kołowym. Zaobserwowano wpływ naprężeń początkowych w warstwie wierzchniej na wytężenie zestawu.

W tablicy 3 przedstawiono wartości maksymalne naprężeń redukowanych w przypadku uwzględnienia technologicznej warstwy wierzchniej i bez jej uwzględnienia przy różnych wartościach wcisku.

Tablica 3

Zestawienie naprężeń redukowanych dla różnych wartości wcisku
Przy uwzględnieniu naprężeń wstępnych w warstwie wierzchniej osi

Wartość wcisku [mm]	**Maksymalna wartość naprężeń redukowanych [MPa]**				
	Tylko wcisk	**Warstwa 1**		**Warstwa 2**	
	oś	**koło**	**oś**	**koło**	**oś**
0,1	90	400	240	300	500
0,15	140	450	300	300	500
0,2	190	480	400	480	540
0,25	240	540	480	540	560
0,3	270	540	600	600	600

Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Wprowadzenie technologicznej warstwy wierzchniej powoduje pojawienie się naprężeń wstępnych w obszarze podpowierzchniowym osi. W przypadku hartowania indukcyjnego maksymalne wartości naprężeń ściskających i rozciągających wahają się od -400 MPa do +600 MPa .
2. Hartowanie indukcyjne powierzchni osi powoduje zmianę własności materiałowych w strefie utwardzanej. Granica plastyczności R_e zostaje podniesiona do wartości od 600 MPa do 838 MPa .
3. Wprowadzenie technologicznej warstwy wierzchniej powoduje podniesienie wartości naprężeń wypadkowych, jednak przy jednoczesnym podniesieniu granicy plastyczności nie dochodzi do uplastycznienia materiału osi.
4. W przypadku wprowadzenia technologicznej warstwy wierzchniej o wytężeniu zestawu kołowego decydują naprężenia występujące w kole.
5. Wprowadzenie technologicznej warstwy wierzchniej powoduje występowanie stref uplastycznionych tylko w kole. Wciski powyżej 0,15 powodują lokalne uplastycznienie koła w strefie kontaktu z osią dla wszystkich gatunków stali. Im większa wartość wcisku, tym większa strefa uplastycznienia.

Literatura

1. John A., Mrówczyńska B.: Computer aided design of railway wheel set. XIV Polska Konferencja Metod Komputerowych w Mechanice, Rzeszów 1999, publikowane w CAMES (w przygotowaniu do druku).
2. John A., Mrówczyńska B.: Computer aided engineering using finite element method program KOLO_PC. 3rd International Scientific Colloquium "CAE TECHNIQES", Rzeszów, 24-27. IX .1997.
3. John A., Mrówczyńska B., Witaszek M. : Ocena wytrzymałości zmęczeniowej i trwałości kół z napawanymi obręczami. Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji i Specjalistycznej Wystawy : Rozwój Infrastruktury Transportowej Śląska i Północ-

nych Moraw – Część Środkowoeuropejskiego Systemu Transportowego Ostrawa – Katowice, 29.04-6.05.97, str.257-262, tom I.

4. John A., Mrówczyńska B., Sitarz M.: Computer aided design of railway wheel sets by means of finite element method KOLO_PC program. Proceedings of the International Conference Numerical Method in Continue Mechanics, Slovakia University of Żylina, pp. 398 - 403.
5. Marciniak M., Nakonieczny A., Skalski K. : Umacnianie kompozytowych warstw wierzchnich części maszyn. Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
6. PN-91/H-84027/03 Stale dla kolejnictwa. Osie zestawów kołowych do pojazdów szynowych. Gatunki.
7. PN-92/K-91018 Tabor kolejowy. Koła bezobręczowe. Wymagania i badania.
8. PN-84/H-84027/05 Stale dla kolejnictwa. Koła bezobręczowe. Gatunki.

Pracę zrealizowano w ramach projektu PB - 1420/T12/98/15.

Recenzent: Dr hab. inż. Gabriel Wróbel

Abstract

Connection between wheel and axle is one of the most important joint in wheel set and railway traffic safety depend on it. One of the method using actualy to increase on effort of the wheel set is hardening surface of axle. Hardening surface causes that initial stresses appear and yield point increases. There is assumed stationary working load and it causes the changing of stress distribution depend on interference and initial stress in hardening surface of axle.In the present paper the effect of values mentioned above on stress components and reduced stresses is analysed. Linear elastic material is assumed. The problem is solved as axisymetric using FEM.