

Józef KAPŁANEK

Marek SITARZ

Gabriel WRÓBEL

Institut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA KOŁA JEZDNEGO
POD WPŁYWEM USTALONEGO POLA TEMPERATUR

Streszczenie. Artykuł jest częścią pracy dotyczącej wpływu obróbki cieplnej powierzchni tocznej kół zestawów kolejowych na warunki skrawania w procesie ich regeneracji. W związku z koniecznością stosowania wydajnych i ekonomicznych metod regeneracji profilu tocznego kół w pracy opisano metodę wąskiego ich odpuszczania z wykorzystaniem prądów wysokiej częstotliwości. Przeprowadzono tegoroczną i eksperymentalną analizę wielkości sił wewnętrznych i pola przemieszczeń na powierzchni przylegania obręczy do koła bosego powstałych w wyniku obróbki cieplnej. Celem tej analizy jest określenie wpływu czynników wynikających z technologii regeneracji na trwałość obręczy z kołem bosym. W opracowaniu wykorzystano metodę elementów skończonych do oceny skuteczności tego połączenia w czasie regeneracji. Wyniki badań wskazują na powstanie lokalnych luzów na powierzchni kontaktowej łączonych elementów w czasie termicznej obróbki zmiękczającej powierzchni tocznej. Elipsoidalny charakter odkształcenia termicznego obręczy nie powoduje jednak utraty pewności połączenia.

1. WSTĘP

Od wielu lat zaznacza się wyraźna tendencja do wzrostu liczby obrabianych kolejowych zestawów kołowych. Wynika to ze wzrostu intensywności eksploatacji taboru kolejowego i zwiększenia parku wagonów. Jedną z głównych przyczyn jest bardzo szybki wzrost uszkodzeń na powierzchniach tocznych, powstających z przyczyn termomechanicznych, takich jak zatarcia i płaskie utwardzone miejsca. Obecnie całkowitemu przetoczeniu profilu zestawu poddaje się 90% wszystkich naprawianych w ZNTK zestawów kolejowych [1]. Zgodnie ze statystycznymi danymi CNi i MPS (ZSRR) w ogólnej liczbie zestawów kołowych udział przetoczeń wynikających z wad powstałych na powierzchni tocznej kół wynosi:

- 55% dla zestawów wagonów towarowych,
- 39% dla zestawów wagonów pasażerskich.

Więcej niż 70% przetaczanych zestawów kolejowych ma na powierzchni toczonej miejsca, których twardość dochodzi do 600-1000 HV [2]. Twarde miejsca są zlokalizowane na pochyłości 1:20, w pobliżu okręgu tocznego i wnikają pod powierzchnię toczną na głębokość 1,5-2,0 mm. Skrawanie twardych miejsc wymaga skrawania ze zwiększoną głębokością, tak aby wgłębić się pod warstwę utwardzoną materiału. Badania wykazały, że w procesie obróbki wiórowej zdejmuje się średnio 3-4 mm warstwy użytecznej tworzywa, co jest równoważne przebiegowi ok. 100 tys. kilometrów.

W związku z tym konieczne jest poszukiwanie wydajnych i ekonomicznych metod regeneracji profilu tocznego kół. W najbliższych latach w naszych warunkach nie należy się spodziewać stosowania wysoce żywotnych i ekonomicznych spieków na narzędzia w procesie toczenia. Spieki firm zagranicznych również nie wytrzymują obciążeń udarowych przy skrawaniu powierzchni tocznych zestawów kołowych z miejscowymi utwardzeniami [2]. Obróbka powierzchni tocznych z twardymi miejscami byłaby możliwa za pomocą wgłębnego szlifowania lub frezowania. Ten typ obróbki nie jest jednak ekonomiczny i jak dotychczas - nie jest powszechnie stosowany.

Jednym z najbardziej efektywnych sposobów rozwiązania tego problemu może być jedynie wstępne poprawienie fizykomechanicznych własności utwardzonych miejsc na powierzchni tocznej zestawów. W celu osiągnięcia tego celu Fabryka Obrabiarek "RAFAMET", wykorzystuje opracowaną w ZSRR metodę indukcyjnego nagrzewania powierzchni tocznej zestawów [3], skonstruowała i wykonała urządzenie EZA-112 do odpuszczania powierzchni tocznej zestawów kolejowych.

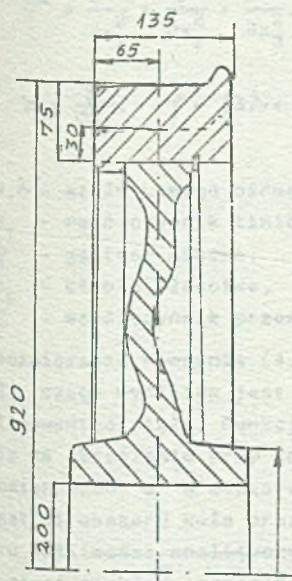
W związku z przewidywanym wykorzystaniem tego urządzenia w krajowych i zagranicznych zakładach naprawczych zestawów kolejowych przeprowadzono teoretyczne i eksperymentalne badania wpływu obróbki cieplnej warstwy wierzchniej zestawów kolejowych na trwałość połączenia obręcz-koło bosa.

Celem analizy wytrzymałościowej jest określenie wielkości sił wewnętrznych i pola przemieszczeń na powierzchni przylegania obręczy do pozostałej części koła podczas regeneracji za pomocą obróbki cieplnej. Analiza ta jest istotna właśnie na powierzchni styku tych dwóch elementów ze względu na zachowanie właściwych sił docisków łączących obręcz z kołem w polu temperatur wywołanych taką obróbką termiczną.

2. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań jest koło obręczowe składające się z koła bosa i nasadzonej na nie obręczy. Obręcz wykonana są ze stali St7P i nakładane są na koła bosa na gorąco. Temperatura łączenia tych elementów wynosi 240-300°C i musi zapewniać po ostygnięciu odpowiednie siły nacisku na powierzchni łączonej przy dokładnym przyleganiu na całej powierzchni obwodowej. Przekrój wieńca koła obręczowego przedstawiony jest na rys. 2.1

Na rysunku linią przerywaną zaznaczono również minimalną średnicę odpowiadającą powierzchni tocznej. Zmniejszenie się średnicy tocznej koła wynika z eksploatacyjnego zużycia, a grubość obręczy w środkowej części nie może być mniejsza od 30 mm dla koła o średnicy nominalnej 920 mm.



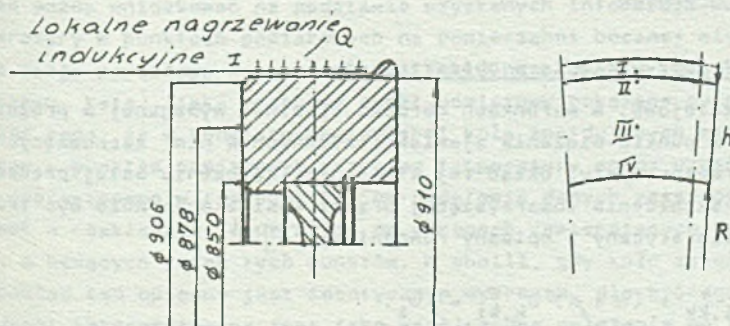
Rys. 2.1. Przekrój poprzeczny koła kolejowego

Rys. 2.1. Cross-section of the railway wheel

3. OBRÓBKA CIEPLNA

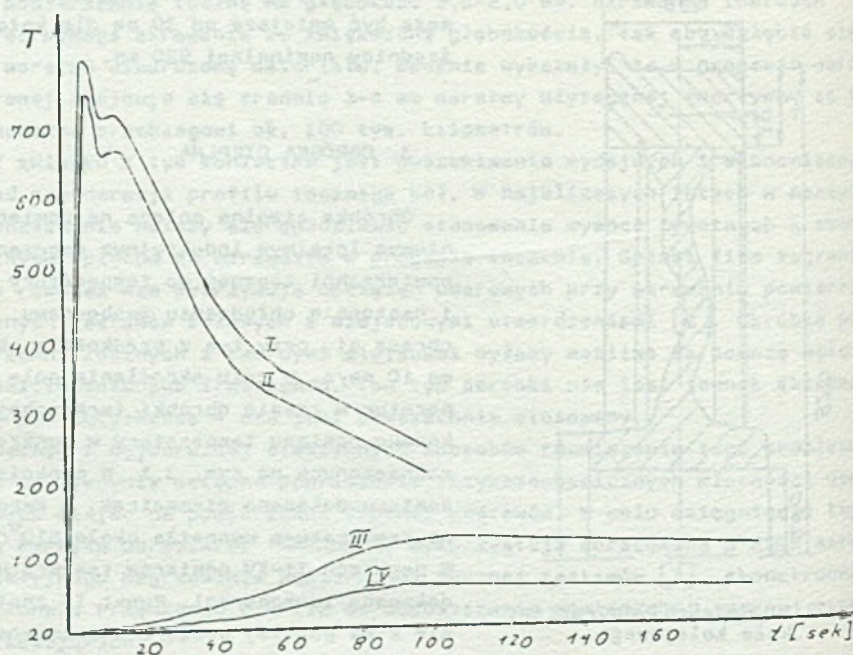
Obróbka cieplna polega na powierzchniowym lokalnym indukcyjnym nagrzeniu po powierzchni tocznej do temperatury 810°C i następnie chłodzeniu swobodnemu. Koło obraca się przy tym z prędkością obwodową 10 mm/s. W celu określenia pola temperatur w czasie obróbki termicznej dokonano pomiaru temperatury w punktach zaznaczonych na rys. 3.1. W punkcie I pomiaru dokonano pirometrem, a maksymalna temperatura wynosiła około 810°C . W punktach II-IV pomiarów temperatury dokonano termoparami. Punkt II znajduje się 2 mm poniżej powierzchni tocznej koła, punkt III w połowie grubości obręczy, zaś punkt IV na powierzchni połączenia obręczy z pozostałą częścią koła.

Pomiarów dokonano dla różnych położzeń koła względem nagrzewnicy indukcyjnej. W rezultacie otrzymano krzywe rozkładu temperatury w funkcji położenia koła (lub czasu) dla kolejnych punktów pomiarowych, rys. 3.2.



Rys. 3.1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych temperatury
Fig. 3.1. Dislocation of the temperature measurement points

Obróbka cieplna odbywała się na hali produkcyjnej w warunkach normalnych przy temperaturze otoczenia 18°C.



Rys. 3.2. Rozkład temperatury w funkcji czasu

Rys. 3.2. Time functions distributions of the temperature

4. ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA KOŁA JEZDNEGO POD WPŁYWEM USTALONEGO POLA TEMPERATUR METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

4.1. Przepływ ciepła w obszarze koła

Koło kolejowe, w warunkach obróbki cieplnej wymaganej w procesie regeneracji, z punktu widzenia zjawisk fizycznych w nim zachodzących stanowi układ termosprężysty. Układ tej klasy przy założeniu małej prędkości zmian stanu odkształcenia towarzyszącej przepływowi ciepła może być traktowany jako quasiostatyczny i opisany równaniami [4]

$$\mu u_{i,kk} + (\alpha + \mu) u_{k,ki} = \gamma \Theta_i \quad (4.1)$$

$$(\nabla^2 - \frac{1}{\lambda} \partial_t) \Theta = - \frac{Q}{\lambda} \quad (4.2)$$

guzie

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$$

$$\kappa = \frac{\beta}{\rho c_p}, \quad \gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha_t$$

μ, λ - stałe Lamego ośrodka sprężystego,

α_t - współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej tworzywa,

ρ - gęstość masowa,

c_p - ciepło właściwe,

β - współczynnik przewodzenia ciepła.

Rozwiązanie równania (4.1) wymaga wcześniejszego rozwiązania równania (4.2), czego wynikiem jest określenie rozkładu temperatury Θ w obszarze analizowanego ciała. Funkcja rozkładu podstawiona do równania (4.1) pozwala na określenie przy znanych warunkach brzegowych rozkładu funkcji przemieszczeń u w obszarze ciała, a dalej stanu naprężenia. Złożoność geometrii obszaru koła oraz rozkładu temperatury stanowi o praktycznym braku możliwości analitycznego rozwiązania równania (4.1). Rozwiązanie w postaci rozkładu przemieszczeń oraz naprężeń możliwe jest do uzyskania w takim przypadku przy wykorzystaniu numerycznej metody elementów skończonych. W szczególności dogodnie jest zastosowanie modelu złożonego z elementów skończonych, dla których określone jest pole temperatur jako statyczne. W tym celu zachodzi potrzeba identyfikacji pola temperatur w obszarze koła w chwili, dla której stan odkształcenia i naprężenia jest interesujący z punktu widzenia wniosków dotyczących postawionego w pracy zadania. Stanem takim uznano stan naprężenia koła, jaki ma miejsce po pełnym obrocie koła, któremu towarzyszy lokalne nagrzewanie powierzchni jezdnej obręczy. O rozkładzie temperatury w obszarze koła z pewnym przybliżeniem można wnioskować na podstawie uzyskanych informacji o przebiegu temperatury w punktach pomiarowych na powierzchni bocznej wieńca koła. Uzyskane drogę pomiarową zależności dla cyklu nagrzewania temperatury od drogi (czasu, kąta), jaką przebywa punkt pomiarowy pokazane są na rys. 3.2. Wobec tego, że w punktach powierzchni koła znajdujących się na wspólnym okręgu z punktem pomiarowym przebieg temperatury można uznać za zbliżony do pomierzonego w tym punkcie, na podstawie danych zależności można wnioskować o rozkładzie temperatury na okręgach zawierających punkty pomiarowe, a będących torem tych punktów. W chwili, gdy koło zakończy pełny obrót rozkład ten opisany jest identycznym wykresem, dla którego współrzędna drogi interpretowana jest jako współrzędna położenia na trajektorii ruchu punktu pomiarowego. Na tej podstawie dla każdego osiowego przekroju wieńca koła dana jest temperatura w trzech punktach na powierzchni

w analizowanej chwili po wykonaniu pełnego obrotu koła wokół osi podczas zabiegu indukcyjnego nagrzewania. Ponadto pomierzona została maksymalna temperatura ogrzewanej powierzchni jezdnej koła - wynosi ona 810°C . Na podstawie pomierzonych temperatur dokonane zostanie oszacowanie rozkładu temperatur w całym obszarze koła. Do tego celu wykorzystany metodę Bindera graficznego całkowania równania Fouriera przewodnictwa cieplnego.

4.2. Opis metody Bindera

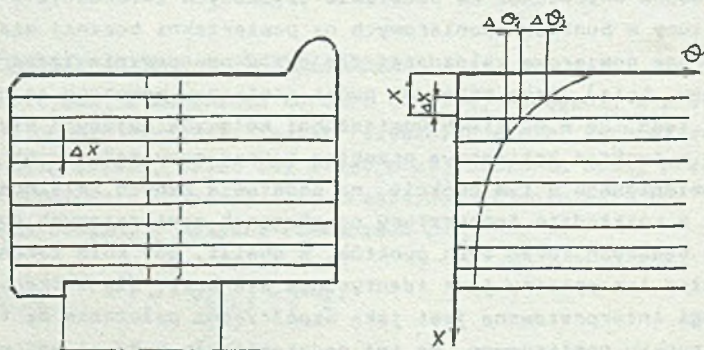
Metoda może być stosowana do rozwiązywania równania przewodnictwa cieplnego w postaci [5]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

to znaczy równania opisującego jednowymiarowy przepływ ciepła. Modelem opisanym równaniem (4.3) jest np. model płaskiej przegrody, w której przepływ ciepła następuje w kierunku prostopadłym do jej płaszczyzny środkowej, zaś temperatury w płaszczyznach do niej równoległych pozostają wyrównane. Biorąc pod uwagę wycinek wieńca koła w stanie nagrzanym (rys. 3.1) wobec niewielkiej wartości stosunku wymiarów $h/R = 60/850 = 0,07$ przyjmujemy, że w jego strefie wewnętrznej, w której znaczącą wartość osiąga jedynie promieniowa składowa gradientu temperatury, przepływ ciepła ma charakter zbliżony do przepływu przez przegrodę, dla którego stosuje się równanie (4.3).

W metodzie Bindera różniczki w równaniu (4.3) zastępowane są przez skończone przyrosty. W tym celu strefę analizowaną dzieli się na warstwy o grubości Δx (rys. 4.1). Pierwsze pochodne przyjmują postać

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \approx \frac{\Delta \theta}{\Delta x}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} \approx \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$



Rys. 4.1. Warstwa modelu analizowanej strefy
Fig. 4.2. The layer of the model in analyzed zone

Drugą pochodną zastępuje się następująco (rys. 4.1)

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\frac{\Delta\theta_2}{\Delta x} - \frac{\Delta\theta_1}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta x^2}$$

Dla warstwy opisanej współrzędną x równanie (4.3) przyjmie zatem postać

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_x = \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta x^2} \Delta t, \quad (4.4)$$

skąd przyrost temperatury $\Delta\theta$ w warstwie x po czasie Δt wyniesie

$$\Delta\theta = \chi \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta x^2} \Delta t \quad (4.5)$$

$$\Delta\theta = \chi \frac{2f}{\Delta x^2} \Delta t. \quad (4.5)$$

Dobierając podziałkę dla temperatury tak, aby $\Delta\theta = f$ odcinek czasu, po którym nastąpi przyrost temperatury o takiej wartości wyniesie

$$\Delta t = \frac{\Delta x^2}{2\chi} \quad (4.6)$$

Na tej podstawie mając rozkład temperatury na granicach warstw przedziału w chwili t_0 możliwe jest wyznaczenie analogicznego rozkładu temperatur w chwili $(t_0 + \Delta t)$. Konstrukcja graficzna polega na łączeniu co drugiego wierzchołka łamanej rozkładu temperatur. Środek łączącego odcinka wyznacza nową wartość temperatury w warstwie, której odpowiada. Łącząc w ten sposób otrzymane punkty uzyskuje się rozkład temperatur dla chwili $(t_0 + \Delta t)$. Na rys. 4.2 pokazano przykładowy proces zmian rozkładu temperatury w warstwie, dla której powierzchnia zewnętrzna została poddana ogrzaniu do temperatury początkowej $t_0 = 810^\circ\text{C}$, a następnie chłodzona czynnikiem o temperaturze 18°C . Przegrodę o grubości 60 mm podzielono na 10 warstw o grubości $\Delta x = 6$ mm. Współczynnik przewodzenia przyjęto równy $\beta = 20$ W/mdeg, $\rho = 7900$ kg/m³, $c = 0,607$ kJ/kgdeg. Współczynnik χ dla analizowanego tworzywa wynosi

$$\chi = \frac{\beta}{\rho c} = \frac{20}{7900 \cdot 0,607 \cdot 10^3} = 4,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

z stąd przyrosty czasu, dla których wyznaczone są kolejne rozkłady wyno-

sza

$$\Delta t = \frac{(6 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 4,17 \cdot 10^{-6}} = 4,32 \text{ s.}$$

Współczynnik wnikania ciepła α_d założono równy $1,1 \text{ kW/m}^2\text{deg}$. Położenie bieguna R, w którym muszą się zbiegać styczne do chwilowych linii temperatur przy powierzchni płyty określa odległość

$$\delta = \beta / \alpha_d = 18,18 \text{ mm.}$$

Założono przy tym, że przez początkowy okres 20 s temperatura na powierzchni wynosi $t_0 = 810^\circ\text{C}$, zaś po tym czasie temperatura ta zmienia się, przy czym temperatura czynnika chłodzącego płytę wynosi $t_{ot} = 18^\circ\text{C}$. Na rys. 4.2 przedstawiono kolejne wykresy temperatury w obszarze badanej przegrzewy. Porównanie uzyskanych tą drogą wyników dla przypadku koła z pomiarowymi wartościami temperatury na powierzchni badanej wieńca przyjęto za podstawę do określenia rozkładu temperatur w części obszaru wieńca bliskiej powierzchni bocznej. Uzyskane tą drogą wyniki stanowią opis pola temperatur w chwili zakończenia pełnego obrotu koła w trakcie operacji indukcyjnego nagrzewania powierzchni przyjęty do obliczeń stanu deformacji i naprężenia wieńca koła metodą elementów skończonych.

4.3. Model obliczeniowy

W zastosowanej metodzie elementów skończonych [6] do rozwiązania przestrzennego, niesymetrycznego stanu obciążenia koła jezdnego wykorzystać można elementy bryłowe o 8 węzłach. Z każdym węzłem związane są trzy stopnie swobody - przemieszczenia u, v, w w kierunkach globalnych osi x, y, z . W metodzie elementów skończonych zadanie sprowadza się do rozwiązania maciercowego układu równań z uwzględnieniem siłowych i przemieszczeniowych warunków brzegowych

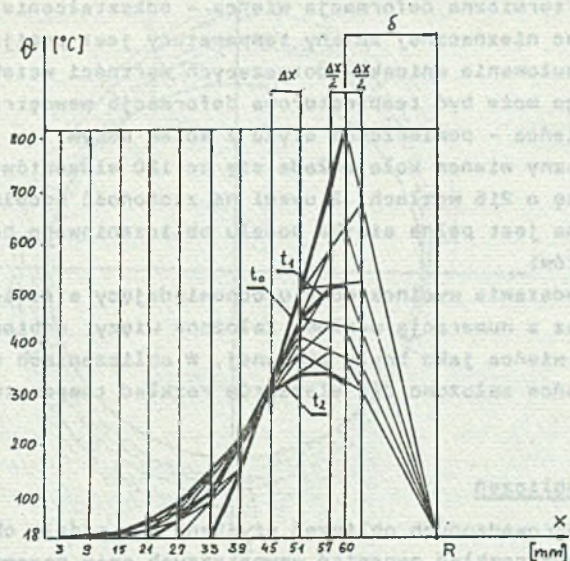
$$\{F\} = [K] \{\delta\} + \{F\}_{E_0}, \quad (4.7)$$

gdzie:

- $\{F\}$ - wektor sił węzłowych elementów,
- $[K]$ - macierz sztywności struktury,
- $\{\delta\}$ - macierz przemieszczeń węzłów,
- $\{F\}_{E_0}$ - macierz wstępnych sił węzłowych wywołanych temperaturą.

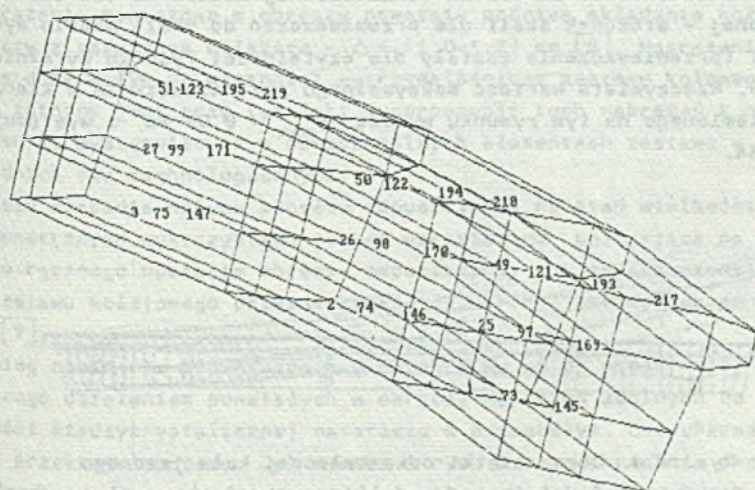
w wyniku którego uzyskujemy składowe stanu przemieszczenia w poszczególnych węzłach struktury wyznaczonej przez elementy skończone.

Ciśnienie wzajemne koła bosego i wieńca na powierzchni styku wywołane jest wciskiem - różnicą średnicy zewnętrznej koła bosego i wewnętrznej wieńca przed montażem w temperaturze otoczenia. O trwałości połączenia wciskowego podczas zabiegu indukcyjnego nagrzewania powierzchni tocznej



Rys. 4.2. Rozkład temperatury w warstwie czynnej

Fig. 4.2. The temperature distribution in the active layer



Rys. 4.3. Wycinek modelu z numeracją elementów

Fig. 4.3. Part of model with elements numeration

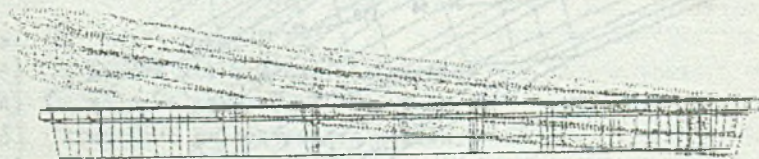
wieńca decyduje termiczna deformacja wieńca - odkształcenie termiczne koła bosego wobec nieznacznej zmiany temperatury jest pomijalnie małe. Podstawą do formułowanie wniosków dotyczących wartości wcisku w czasie zabiegu cieplnego może być temperaturowa deformacja wewnętrznej powierzchni walcowej wieńca - powierzchni styku z kołem bosym.

Model numeryczny wieńca koła składa się ze 120 elementów bryłowych tworzących siatkę o 216 węzłach. Z uwagi na złożoność modelu na rysunku tym przedstawiona jest pełna siatka modelu obliczeniowego bez numerów węzłów i elementów.

Rys. 4.3 przedstawia wycinek modelu odpowiadający strefie nagrzewania, wycinka wraz z numeracją węzłów. Założone więzy odbierają jedynie możliwość ruchu wieńca jako bryły sztywnej. W obliczeniach stanu odkształcenia modelu wieńca założono dla elementów rozkład temperatury opisany w punkcie 4.2.

4.4. Wyniki obliczeń

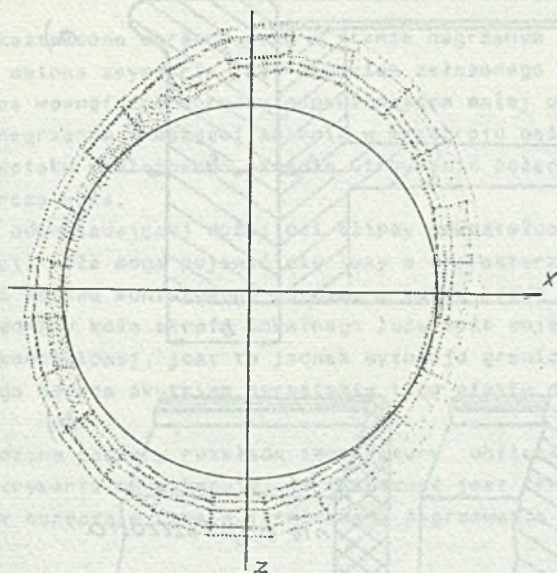
W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano dla modelu obręczy koła w stanie nagrzany rozkład naprężeń wewnętrznych oraz przemieszczeń węzłów będących efektem cieplnego odkształcenia obręczy. W układzie obręczy nałożonej na koło bosc uzyskane rozkłady należy interpretować jako składowe wynikowego stanu odkształcenia i naprężenia, będącego superpozycją składowych pochodzących od uwzględnionego w obliczeniach pola temperatur oraz naprężeń wstępnych pochodzących od wcisku obręczy na koło bosc. Rys. 4.4 przedstawia obraz siatki odkształconej modelu na tle siatki nieodkształconej - stosunek skali dla przemieszczeń do skali modelu wynosi około 34:1 (przemieszczenia zostały dla czytelności rysunku wyraźnie powiększone). Rzeczywista wartość maksymalnego przemieszczenia w kierunku y przedstawionego na tym rysunku wynosi $y_{max} = 8,07 \text{ mm}$ i występuje w węźle 234.



Rys. 4.4. Obraz siatki odkształconej koła jezdnego

Fig. 4.4. A view of deformed modelling net of the railway wheel

Rys. 4.5, ukazuje siatkę odkształconą obręczy, na tle zarysu powierzchni koła bosego w stanie naturalnym, tzn. przed wciskowym połączeniem z obręczą. Należy przy tym zwrócić uwagę na poglądowość rysunku, co odzwierciedlone jest w przyjętej dużej skali dla przemieszczeń.



Rys. 4.5. Siatka odkształcona obręczy koła jezdnego

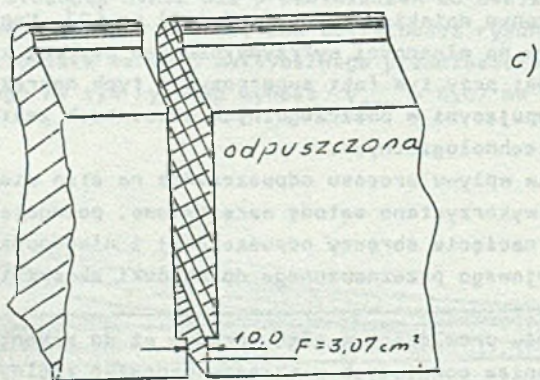
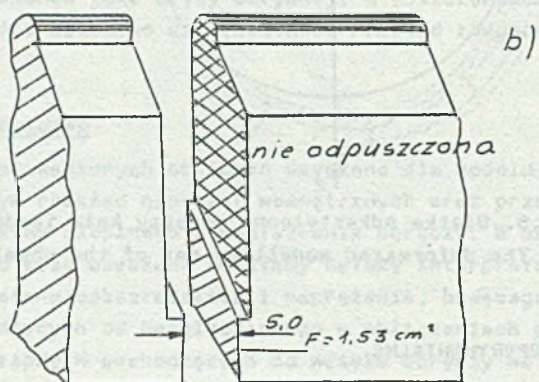
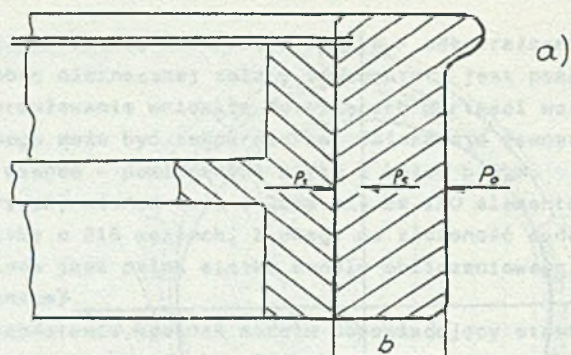
Fig. 4.5. The deformed modelling net of the wheel band

5. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Naprężenia montażowe w obręczy powstają podczas składania koła bosego i obręczy z założonym wciśkiem - $\Delta = (1,0-1,2)$ mm [2]. Naprężenia te posiadają duży wpływ na własności wytrzymałościowe zestawu kołowego. Szczególnie istotny jest przy tym fakt superpozycji tych naprężeń z naprężeniami własnymi występującymi w poszczególnych elementach zestawu w wyniku poprzednich faz technologicznych.

W celu zbadania wpływu procesu odpuszczania na stan wielkości naprężeń wewnętrznych wykorzystano metodę warsztatową, polegającą na wykonaniu zabiegu ręcznego nacięcia obręczy odpuszczonej i nieodpuszczonej tego samego zestawu kolejowego przeznaczonego do obróbki skrawaniem po eksploatacji [7].

Zabieg nacinania prowadzono w głąb obręczy aż do momentu jej pęknięcia, wywołanego działaniem powstałych w obręczy naprężeń zdolnych do zerwania spójności międzykryształicznej materiału w pozostałym, dotychczas nie przeciętym przekroju obręczy. Jak wynika z rys. 5.1 powierzchnia przełomu obręczy nieodpuszczonej jest mniejsza niż w odpuszczonej. Rozchylenie szczeliny, powstałej w miejscu pęknięcia obręczy nieodpuszczonej jest mniejsze niż w odpuszczonej.



Rys. 5.1. Schemat zabiegu nacinania obręczy
 Fig. 5.1. The scheme of the wheel-band cutting

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Postać odkształcona obręczy koła w stanie nagrzanym przyjmuje kształt eliptyczny - osiowa asymetria jest skutkiem założonego rozkładu temperatury. Średnica wewnętrzna obręczy odpowiadająca małej osi elipsy nie ulega w stanie nagrzanym znaczącej zmianie w przekroju osiowym, co wobec stosowanego wcisku montażowego oznacza utrzymanie połączenia wciskowego obręczy z tarczą koła.

W strefie odpowiadającej dużej osi elipsy odkształconej obręczy w trakcie regeneracji koła mogą pojawić się luzy o charakterze lokalnym - przyjmując wartość wcisku montażowego obręczy z kołem bosym 1,1-1,3 mm w odniesieniu do średnicy koła strefa lokalnego luzu może objąć zakres ponad 50% powierzchni kontaktowej, jest to jednak sytuacja graniczna w chwili zakończenia zabiegu będąca skutkiem narastania tego efektu deformacji podczas obróbki.

Przeprowadzone pomiary rozkładu temperatury, obliczenia numeryczne oraz badania eksperymentalne wskazują, że zachowana jest trwałość połączenia koła bosego z obręczą w czasie termicznego nagrzewania związanego z jego regeneracją.

LITERATURA

- [1] Mickiewicz M.: Niektóre zagadnienia napraw zestawów kołowych do wagonów towarowych w zakładach naprawczych taboru kolejowego. Trakcja i wagony. 1984, Nr 4-5, s. 98-99.
- [2] Tyrlik T.: Wyżarzanie prądami wysokiej częstotliwości powierzchni tocznych kół zestawów wagonowych przed ich regeneracyjnym toceniem. Trakcja i wagony. 1984, Nr 4-5, s. 104-106.
- [3] Masniov M.M. i inni: Sposob vostonovlenija profilja katanija koles. Patent SU/11/4332.22.
- [4] Nowacki W.: Postępy teorii sprężystości. PWN, Warszawa 1986.
- [5] Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1970.
- [6] Zienkiewicz O.C.: Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972.
- [7] Overkaff F.: Hartowanie obrzeży obręczy zestawów kołowych lokomotyw i wagonów. Trakcja i wagony, 1984, Nr 4-5, s. 113-116.

Recenzent: Doc. dr inż. Wiesław Łęczny

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1990 r.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕСА ПОД ВЛИЯНИЕМ УСТАНОВЛЕННОГО ДИАПАЗОНА ТЕМПЕРАТУРЫ

Резюме

В работе сделан теоретический и экспериментальный анализ внутренних усилий и полей перемещений на поверхности между бандажем, а колесом вызванных термической обработкой. Для решения этих задач использован метод конечных элементов.

TENSION AND DEFORMATION STATE ANALYSIS OF ROAD WHEEL ON STATIONARY

Summary

In the paper the theoretical and experimental analysis of internal stresses and dislocations on the contact surface between a wheel and wheel-band was presented. To examinations the state after the heat treatment was subjected. The problem was solved using Finite Elements Method.

LITERATURA

1. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
2. Trzciński J.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
3. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
4. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
5. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
6. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
7. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
8. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
9. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.
10. Mielniczak H.: Wzrostanie naprężeń w kole, w czasie eksploatacji. Rozprawy techniczne, Warszawa, Tom 1, 1964, Nr 5-6, s. 98-101.