ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol. 1704

Marek SITARZ, Adam MAŃKA, Andrzej HEŁKA, Katarzyna CHRUZIK

TRWAŁOŚĆ SYSTEMU SZYNA - KOŁO - KLOCEK HAMULCOWY -

Streszczenie. W artykule przedstawiono kolejne etapy prac prowadzonych w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej, związanych z badaniem i modelowaniem zjawisk zachodzących w układzie szyna - koło kolejowe - klocek hamulcowy podczas hamowania pociągu.

Wykazano, że jednoczesne uwzględnienie wpływu zjawisk termicznych wynikających z hamowania pojazdu oraz zjawisk kontaktowych powoduje uzyskanie około dwukrotnie większych maksymalnych naprężeń redukowanych HMH w kole kolejowym, w stosunku do obciążeń uwzględnianych do tej pory w literaturze.

Przedstawiono również wyniki badań własności wytrzymałościowych w funkcji temperatury (od 20 do 740 ^{0}C) dla materiałów stosowanych do budowy kół monoblokowych ER7, obręczy kół kolejowych B6 i wstawek hamulcowych P10 i zestawiono je, z wykorzystywanym do tej pory w obliczeniach, wynikiem badań ERRI z 1997 roku. Wykazano, że rozbieżności modułu Younga dla temperatury 400 ^{0}C wynoszą 15%, a dla temperatury 600 ^{0}C aż 31%.

Jednocześnie przedstawiono wyniki analizy wpływu uwzględnionego modelu materiału koła na wyniki naprężeń maksymalnych uzyskiwane z modelu MES. Dla przedstawionego w artykule przykładu obciążeń eksploatacyjnych kół kolejowych różnice pomiędzy uzyskiwanymi wartościami maksymalnymi naprężeń redukowanych, przy zastosowaniu wykorzystywanych do tej pory własności materiałowymi a własnościami wyznaczonymi na podstawie badań eksperymentalnych wyniosły aż 28%.

DURABILITY OF RAIL-WHEEL-BRAKE SHOE SYSTEM

Summary. This paper presents following stages of investigations conducted in Department of Railway Engineering, connected with making research and modeling of phenomenon proceeded in rail-wheel-brake shoe system during braking.

In this work proved that taking into account influents of thermal phenomenon arisen from railway braking and contact phenomenon simultaneously producing reduce stress HMH in railway wheel twice higher than results come from literature.

It is present also methodology of investigation results for ER7 material used for monoblock wheels and B6 material used for wheel tyres. The obtained results were compared with results given in ERRI 169 report from 1997, which presents linear relationship of Young modulus vs. temperature for temperatures ranging from 0 to 800^{0}C. Attention is drawn to significant differences between authors' investigation data and properties given in reference sources. The impact of these differences on the accuracy of numerical calculation taking train's braking process into account has been described. The obtained data should lead to considerable increase of convergence between numerical analyses and experimental tests results. This paper presents also the values of remaining quantities describing the mechanical properties of materials used for railway wheels, i.e. Poisson coefficient γ, R_m, $R_{0,2}$, A_5, z.

Ways of determining these quantities are described in detail. The numerical analyses were run for these properties, and this has made possible comparison of obtained stress distributions with the results obtained previously.

1. WSTĘP

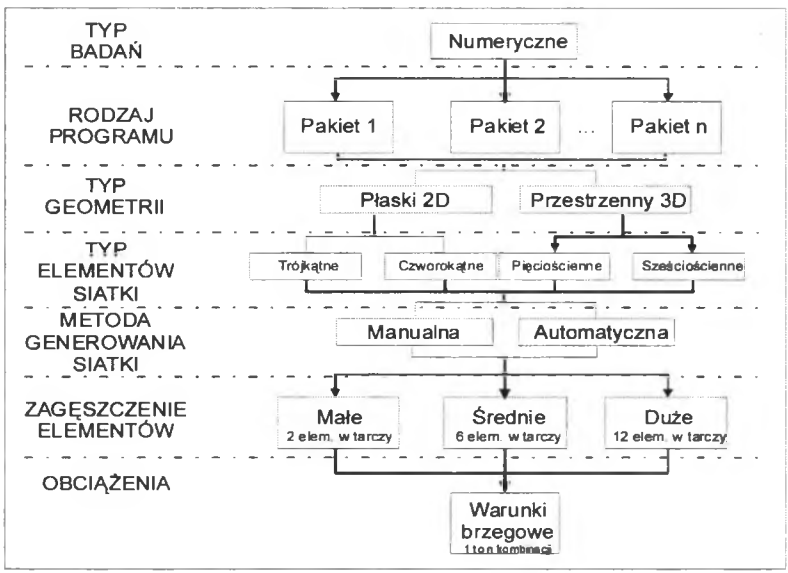
Modelowanie zjawisk mechanicznych, a szczególnie zjawisk nieliniowych, wymaga starannej identyfikacji i doboru opisujących je parametrów, istotnych z punktu widzenia badanych procesów. Liczba i dokładność uwzględnionych parametrów zarówno w modelu fizycznym, matematycznym, jak i numerycznym determinuje wiarygodność uzyskanego rozwiązania i jego zbieżność z wynikami badań eksperymentalnych. Wzrost prędkości pojazdów szynowych wymusza uwzględnianie, już na etapie modelowania i weryfikacji konstrukcji nie tylko obciążeń strukturalnych i quasi - dynamicznych, ale również obciążeń termicznych. Dlatego też Katedra Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach przeprowadziła wiele badań, mających na celu wyznaczenie własności termicznych oraz własności mechanicznych w wysokich temperaturach dla materiałów stosowanych na elementy konstrukcyjne układu koło kolejowe-klocek hamulcowy.

Odpowiednie procedury w procesie projektowania pojazdów (np. dotyczące spójnych warunków brzegowych w obliczeniach numerycznych elementów) w przyszłości zapewnią większe bezpieczeństwo w procesie eksploatacji. Istnieje wiele ujęć bezpieczeństwa jednak każde z nich ma na celu wprowadzenie stanu braku zagrożenia, co korzystnie wpływa na funkcjonowanie jednostek, grupy jednostek lub państwa. W dzisiejszych czasach coraz częściej kładzie się nacisk na wprowadzanie zmian, mających na celu podwyższenie poziomu bezpieczeństwa, co pozwala na większe poczucie spokoju i stabilności.

W artykule tym przedstawiono wyniki badań własności materiału stosowanego do budowy koła monoblokowego – ER7 oraz materiału używanego do obręczy kół - B6. Uzyskane wyniki porównano z wynikami przedstawionymi w raporcie ERRI 169, w których opublikowano liniową zależność modułu Younga od temperatury w zakresie 0-800^{0}C. Zwrócono również uwagę na istotne różnice pomiędzy danymi uzyskanymi na podstawie badań własnych a własnościami przedstawionymi w literaturze oraz przedstawiono ich wpływ na dokładność wyników analizy numerycznej uwzględniającej proces hamowania pociągu. Uzyskane dane pozwolą na znaczną poprawę zbieżności wyników numerycznych z eksperymentalnymi.

Wobec coraz powszechniejszego stosowania metod numerycznych w obliczeniach wytrzymałościowych dla kół kolejowych zestawów kołowych (BONATRANS, LUCCHINI, KLW WHEELCO, GRIFFIN, VALDUNES) i opierania na ich wynikach różnorodnych decyzji technicznych i ekonomicznych nabiera znaczenia wiarygodność tych wyników. W szczególności ważne jest, jakie błędy zawierają te obliczenia i w jaki sposób można je sprowadzić do przyjętych tolerancji. Podkreślając możliwości i przydatność MES, należy zwrócić uwagę na konieczność bardzo przemyślanego i rozważnego stosowania tej metody. Jest ona metodą przybliżoną, a jej wyniki odnoszą się nie do rzeczywistych układów konstrukcyjnych, ale do ich modeli. Występuje więc różnica między realnym problemem a wynikami obliczeń przeprowadzonymi na jego modelu. Mnogość możliwych kombinacji analizy numerycznej dla tego samego elementu konstrukcyjnego nie pozwala obecnie na porównanie wyników tych badań. Standaryzacja procesu projektowania elementów pojazdów (w tym również elementów pojazdów szynowych, np. kolejowych zestawów kołowych) wymusza znalezienie określonych wymogów również dla tego zjawiska, a następnie jego certyfikację zarówno pod względem tworzonego modelu, pakietu oprogramowania, jak i czynnika ludzkiego. Certyfikacja powinna więc obejmować całe jednostki badawcze zajmujące się projektowaniem elementów pojazdów. Uściślenie całego etapu projektowania, w tym również obliczeń numerycznych, pozwoli na porównywalność wyników uzyskanych w różnych jednostkach badawczych. W obecnej chwili nie określono jednoznacznie żadnych czynników wpływających na wartość wyniku dla modelu wygenerowanego w programie komputerowym. Na rys. 1 pokazano (na przykładzie koła kolejowego) możliwe kombinacje

doboru niektórych czynników, wpływających na wynik analizy. Każda "droga analizy numerycznej" niesie za sobą wygenerowanie modelu, z którego uzyskujemy inne wyniki, nawet przy zastosowaniu tych samych elementów brzegowych (np. punktów i wartości przyłożenia sił i podpór charakteryzujących dane zjawisko). Dodatkowo nieokreślenie szczegółowo w aktach normatywnych modelu zjawisk charakteryzujących obciążenia wynikające z produkcji i eksploatacji elementów konstrukcyjnych całkowicie eliminuje możliwość porównywania analiz przeprowadzanych obecnie [3].

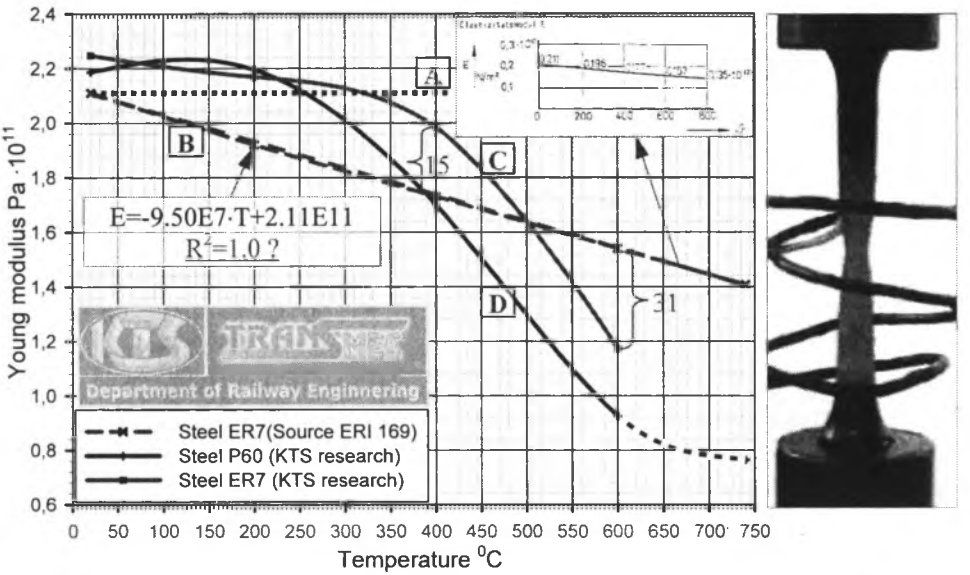


Rys. 1. Kombinacje czynników wpływających na wynik analizy numerycznej [3]
Fig. 1. The influence of factor combinations on results of numerical calculations [3]

Powyższe rozważania pokazują jak ważne jest prawidłowe dobranie własności materiałowych. Każde uproszczenia we własnościach powinny być poparte głęboką analizą problemu.

2. BADANIE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH I TERMICZNYCH MATERIAŁÓW UKŁADU KLOCEK HAMULCOWY - KOŁO KOLEJOWE

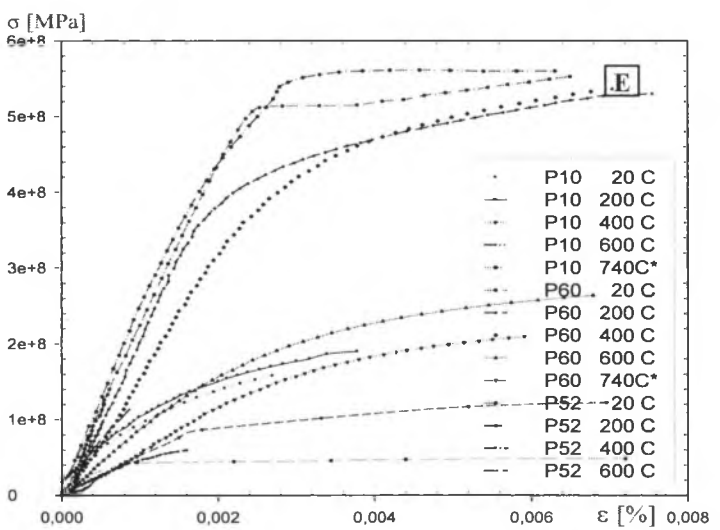
Prowadzenie analizy numerycznej MES zjawisk zachodzących w kole kolejowym, z uwzględnieniem obciążeń termicznych wynikających z hamowania pojazdu, wymaga wprowadzenia własności mechanicznych i termicznych uwzględnianych materiałów. Jak wykazały badania własności materiałów stosowanych na wstawki hamulcowe (żeliwo P10 i tworzywa kompozytowe), koła monoblokowe i obręcze, prowadzone w ramach prac Katedry Transportu Szynowego w Katowicach (KTS), własności mechaniczne, w tym wartość modułu Younga jest zależna od temperatury, szczególnie po przekroczeniu 200 [^{0}C] rys. 2. Spotkana wcześniej w literaturze zależność modułu Younga w funkcji temperatury ma charakter liniowy [1], a dodatkowo niepokojący jest również jej współczynnik korelacji, który wynosi dokładnie R^2=1 – rys. 2. Na rys. 2 przedstawiono zależność modułu Younga stali ER7 i B6 dla temperatur z zakresu 20÷740 [^{0}C].



Rys. 2. Moduł Younga stali ER7 i B6 w funkcji temperatury - porównanie wyników uzyskanych z badań Katedry Transportu Szynowego z danymi literaturowymi

Fig. 2. Young modulus of ER7 and B6 steel vs. temperature - results from Department of Railway Engineering research compared to literature data

Modelując zjawiska zachodzące w układzie koło - klocek hamulcowy - szyna, celowe jest wprowadzenie nie tylko wartości modułu Younga i współczynnika Poissona, ale całego przebiegu statycznej próby rozciągania, z uwzględnieniem całego zakresu temperatur wynikających z hamowania pojazdu – rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi statycznej próby rozciągania w funkcji temperatury próbki dla materiałów układu KKH

Fig. 3. Course of hot static tensile test in temperature function for KKH system materials

Jak widać z wykresu przedstawionego na rys. 2 i 3, różnice w uzyskiwanych wartościach naprężeń mogą przekroczyć 30%.

W celu zobrazowania dla jakich analiz szczególnie istotne jest uwzględnienie poprawnych własności materiałowych przeprowadzono obliczenia różnych wariantów obciążeń koła kolejowego.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki przemieszczeń, temperatur i naprężeń dla następujących wariantów obliczeń [1÷6]:

- obciążeń termicznych hamowania pojazdu (obliczenia przeprowadzono jako analizę sprzężoną w funkcji czasu dla elementów o nieliniowej funkcji kształtu);
- superpozycji obciążeń termicznych i mechanicznych (obliczenia prowadzono również, jako analizę sprzężoną termiczno-mechaniczną z uwzględnieniem obciążeń wynikających z hamowania, masy pojazdu w trakcie jazdy po łuku dla współczynnika dynamicznego k=3);
- naprężeń kontaktowych (uwzględniono plastyczność materiału również dla wysokich temperatur; wykorzystano elementy o nieliniowej funkcji kształtu).

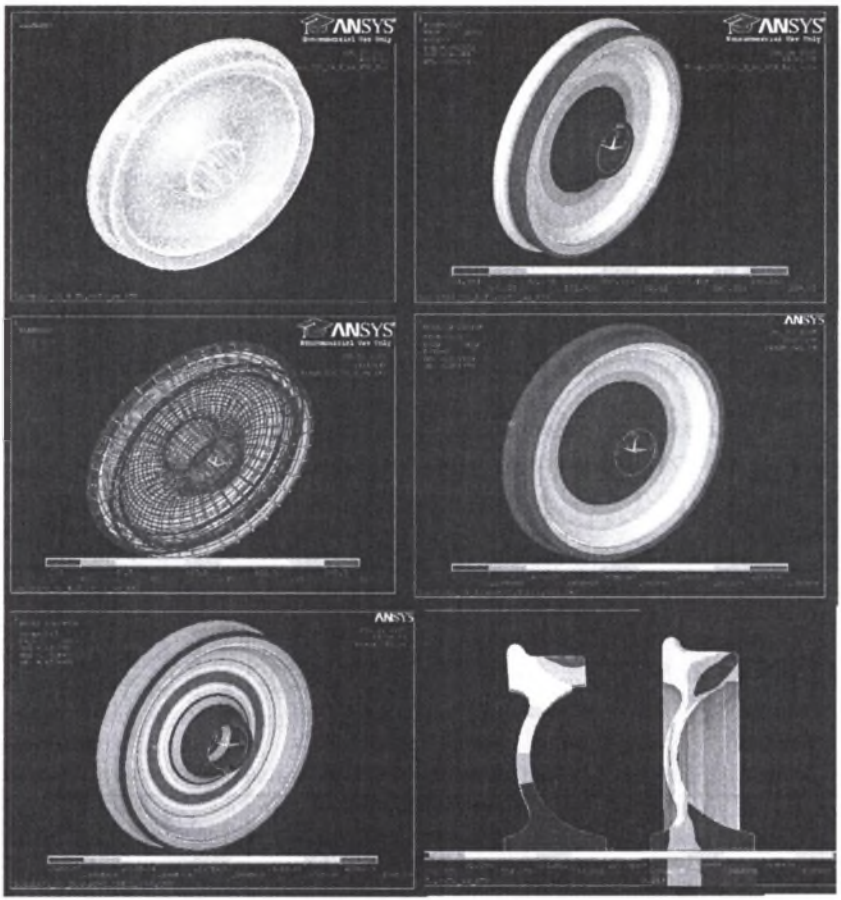
Tabela 1

Przykładowe wyniki analizy dla różnych obciążeń eksploatacyjnych

Nr	Model materiału	Typ koła	Nazwa pliku	Typ obciążenia	Odkształcenie maksymalne mm	Temperatura maksymalna [^{0}C] *odkszt. strefy kontaktu m*	Naprężenia HMH (SEQV) MPa	Czas max. s
1	A	Koło Lucchini o średnicy nominalnej ϕ920 mm	04_Ev_const	Termiczne wynikające z hamowania	1.989	328	478	2058
2	B		05_Ev(T)_ERI		1.985	328	**452**	2058
3	C		06_Ev(T)_KTS		1.981	328	499	2058
4	E		16_Bilin(T)_KTS		1.995	329	**501**	1998
5	B		251_Ev(T)_ERI	Termiczne i dynamiczne	2.078	328	**454**	2017
6	E		261_Bilin(T)_KTS		2.072	329	503	2017
7	B		352_Ev(T)_ERI		0.118	*0.132 E-6*	**751**	2017
8	E		370_Bilin(T)_KTS		0.115	*0.127 E-6*	**588**	2017

W pierwszym etapie koło o średnicy nominalnej ϕ920 obciążono strumieniem ciepła wynikającym z hamowania długotrwałego, symulującego zjazd z góry Gothard. Obliczenia te prowadzone były jako analiza sprzężona termiczno-mechaniczna, z wykorzystaniem elementów o nieliniowej funkcji kształtu. Uzyskano temperaturę maksymalną 328 ^{0}C – rys. 4.

W wyniku działania strumienia ciepła na nominalną strefę kontaktu wstawki hamulcowej z kołem, wieniec koła nagrzewa się. Stosunkowo duża objętość wieńca koła w porównaniu do tarczy oraz działanie konwekcji powodują, że do tarczy koła "dociera" niewielka ilość strumienia ciepła, a w wyniku tego nie nagrzewa się on do wysokich temperatur. Powoduje to rozciąganie promieniowe tarczy, w wyniku rozszerzalności cieplnej materiału.



Rys. 4. Rozkład temperatur, przemieszczeń i naprężeń uzyskanych z analizy obciążeń termicznych koła kolejowego z materiałem, wg tab. 1. A

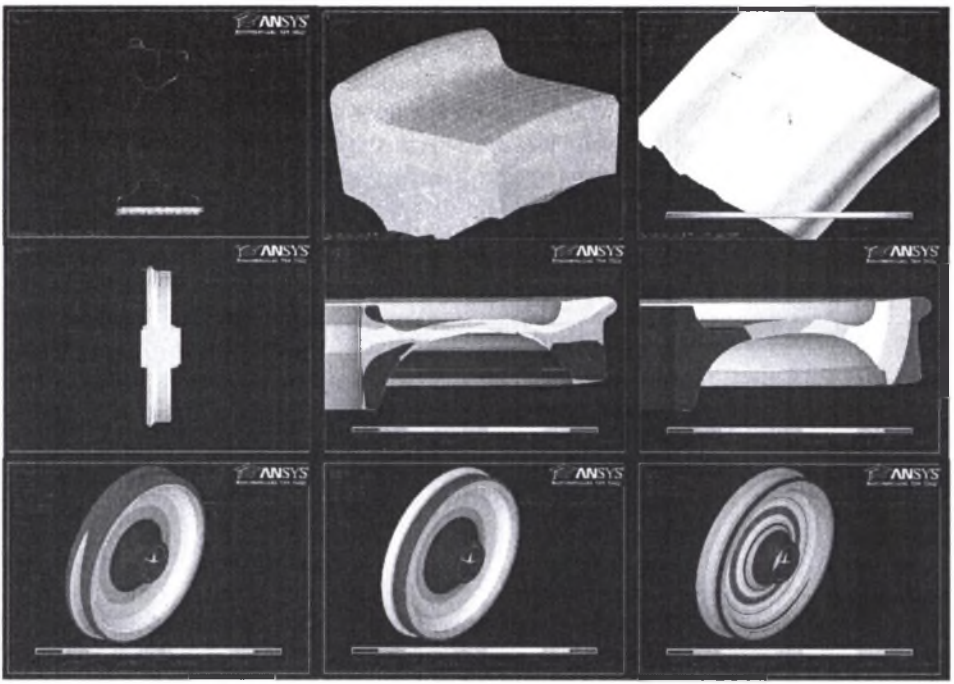
Fig. 4. Field of temperature, displacement and stress distribution from analysis of thermal loads with wheel material, according to tab. 1. A

Poniaważ temperatura strefy, w której występują maksymalne naprężenia jest niska, różnice w wartości maksymalnej naprężeń są nieznaczne rys. 2 i 4, tab. 1. Największe różnice występują pomiędzy modelem materiału B a D, E i wynoszą 10%.

W kolejnym modelu uwzględniono również siły działające na koło w czasie jazdy po łuku wraz z obciążeniami dynamicznymi – rys. 5.

Stwierdzono tu, podobnie jak dla wcześniejszej analizy, że ze względu na występowanie maksymalnych naprężeń w strefie o niskiej temperaturze, różnice w otrzymanych wartościach naprężeń są również niewielkie i proporcjonalne do różnic w samych wartościach modułu Younga dla tej temperatury. Można zauważyć, że naprężenia pochodzące od sił zewnętrznych, tj. jazdy po łuku i nacisku wynikającego z masy wagonu, wraz z uwzględnieniem współczynnika dynamicznego k=3, nie stanowią istotnego czynnika wpływającego na stan wytężenia materiału koła, w porównaniu do obciążeń termicznych.

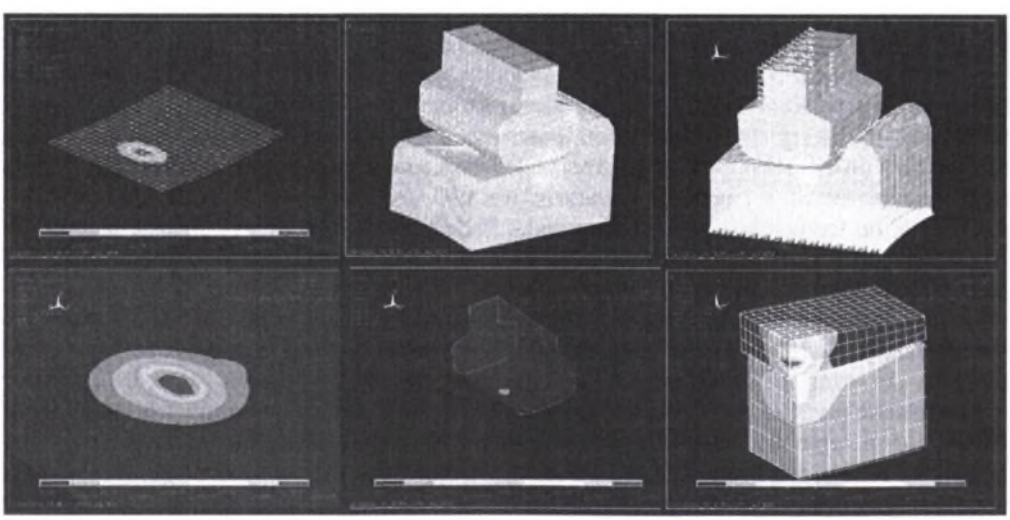
Należy zaznaczyć, że uzyskane różnice pomiędzy wartościami naprężeń dla materiału, wg danych literaturowych i danych otrzymanych w wyniku badań KTS, dla kół zużytych, będą jeszcze większe. Składają się na to zarówno wyższe wartości temperatury koła, jak i większe różnice w wartości modułu Younga dla temperatur przekraczających 600 [^{0}C].



Rys. 5. Rozkład temperatur, przemieszczeń i naprężeń uzyskanych z analizy obciążeń termicznych oraz mechanicznych koła kolejowego z materiałem, wg tab. 1. E

Fig. 5. Field of temperature, displacement and stress distribution from analysis of thermal and mechanical loads with wheel material, according to tab. 1. E

Istotne jest, że uwzględniono tu temperaturę wieńca koła, która podobnie jak dla wcześniejszych wyników badań wyniosła 238 [^{0}C] – rys. 6.

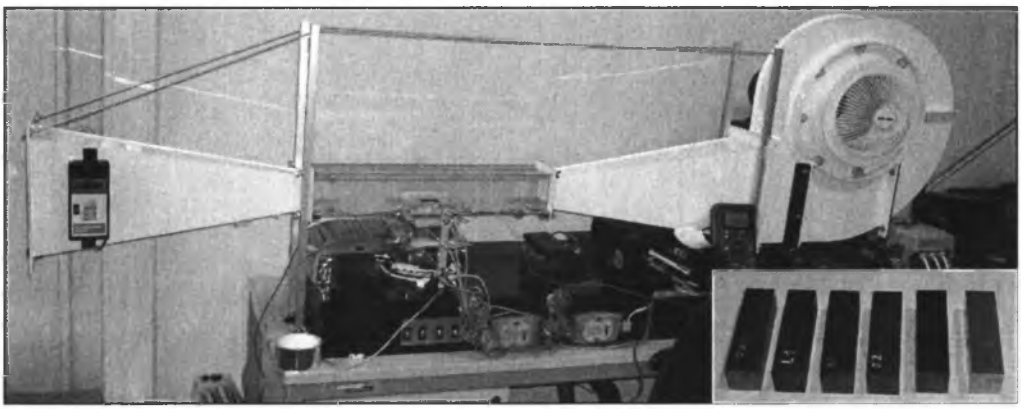


Rys. 6. Rozkład naprężeń HMH i odkształceń w strefie kontaktu koła kolejowego z szyną z jednoczesnym obciążeniem termicznych pochodzącym od hamowania

Fig. 6. Distribution of displacement and HMH stress in railway wheel and rail contact zone with thermal load come from braking

Na koło, oprócz obciążeń wynikających z samego hamowania pojazdu i zewnętrznych sił dynamicznych, działa również obciążenie wynikające ze zjawisk kontaktowych w układzie koło kolejowe-szyna. Różnice maksymalnych wartości naprężeń HMH dla obliczeń zagadnień kontaktowych w układzie koło - szyna wyniosły aż 28% - tab. 1.

Ze względu na brak danych literaturowych dotyczących własności termicznych materiałów układu koło-klocek hamulcowy, szczególnie dla nowych kompozytowych klocków hamulcowych, w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach zaprojektowano i wykonano stanowisko do wyznaczania takich własności termicznych materiałów jak: współczynnik rozszerzalności cieplnej β [K-1], współczynnik emisji ε [-], ciepło właściwe c [J·kg-1·K-1], współczynnik przewodności cieplnej λ [W·m-1·K-1] oraz współczynnik komwekcji α [W·m-2K-1] – rys. 7.



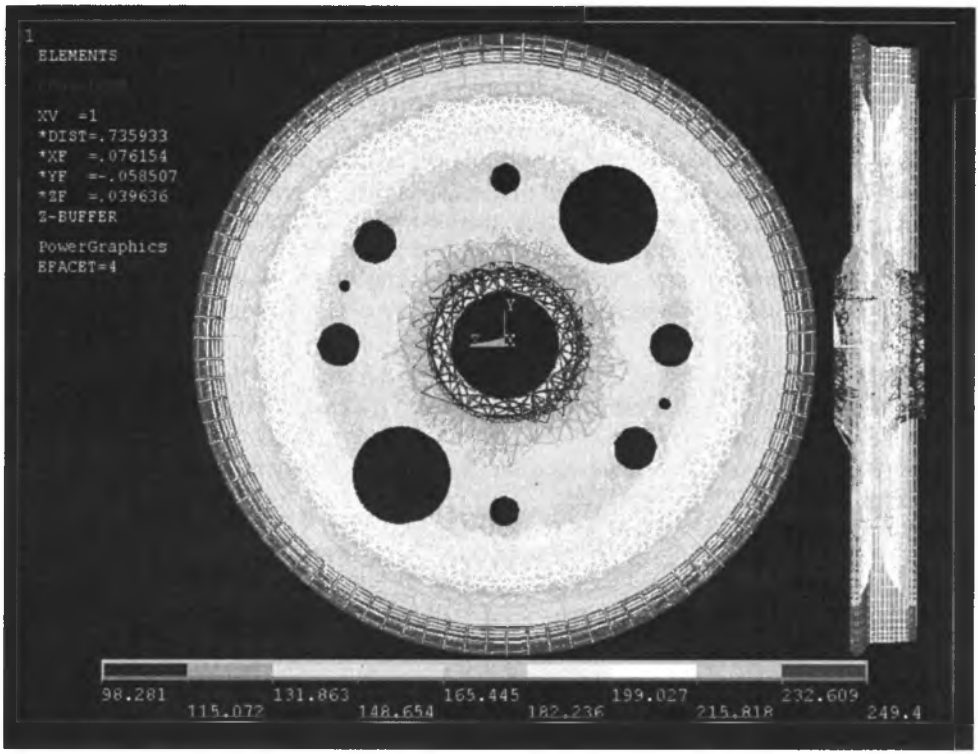
Rys. 7. Stanowisko TC-01 do wyznaczania własności termicznych ciał stałych
Fig. 7. TC-01 stand for thermal solid body properties determination

Dla prawidłowego uwzględnienia wpływu konwekcji podczas symulacji przepływu ciepła w układzie koło kolejowe - klocek hamulcowy, niezbędna jest znajomość rozkładu tego współczynnika na powierzchni koła i klocka hamulcowego. Dlatego też po wykonaniu badań na stanowisku TC-01 – rys. 7, podczas których wyznaczono wartość współczynnika konwekcji w funkcji prędkości strugi powietrza "omywającego" próbkę oraz w funkcji temperatury powierzchni próbki, konieczne jest wykonanie następnego etapu badań. Należy tu zaznaczyć, że do tej pory w literaturze wartość współczynnika konwekcji uzależniano najczęściej od temperatury powierzchni ciała. Podejście takie może być słuszne jedynie dla konwekcji swobodnej gdyż, jak wykazały badania KTS, wartość współczynnika konwekcji bardzo silnie zależy od prędkości strugi powietrza.

Po wyznaczeniu zależności współczynnika konwekcji od prędkości strugi powietrza i temperatury niezbędne jest określenie, jakie są prędkości strugi powietrza podczas ruchu pojazdu. W tym celu wykonano badania eksploatacyjne, podczas których mierzono i rejestrowano przebieg prędkości strugi powietrza w 48 punktach pomiarowych lokomotywy EU07. Równolegle do badań eksploatacyjnych wykonano analizę numeryczną przepływu powietrza CFD w otoczeniu układu koło-klocek hamulcowy. Dopiero jednoczesna znajomość obu tych grup parametrów pozwala na jednoznaczne określenie rozkładu współczynnika konwekcji dla koła kolejowego i wstawek hamulcowych.

Oczywiście uwzględnienie otrzymanego rozkładu współczynnika konwekcji dla wszystkich powierzchni koła kolejowego w programach wykorzystujących FEM wymaga dodatkowych czynności ze względu na brak specyficznych procedur wspomagających

zadawanie takich obciążeń. Dlatego też, po aproksymowaniu wartości macierzy współczynnika konwekcji, jako funkcji dwóch zmiennych, napisano makro, które umożliwia automatyczne zadawanie współczynnika konwekcji wg wartości otrzymanych z wcześniejszych badań i to niezależnie dla każdej powierzchni zewnętrznej elementu skończonego modelu FEM – rys. 8.



Rys. 8. Wynik działania autorskiego makra do programu ANSYS umożliwiającego zadawanie współczynnika konwekcji dla poszczególnych elementów skończonych zgodnie z wynikami badań doświadczalnych KTS

Fig. 8. Authors' macro performance – setting convection coefficient for different finite elements in ANSYS program according to data obtained from research KTS

3. UWAGI I WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych i analizy numerycznej wynika:

- Liniowy rozkład modułu Younga w zależności od temperatury, zamieszczony w Raporcie ERRI z 1987 roku, jest rozkładem uproszczonym,
- Realne wyniki wartości modułu Younga zależne od temperatury pokazane na rys. 1, różnią się o 31% dla temperatur rzędu 600 [^{0}C],
- Modelując rozkład naprężeń wynikających z obciążeń termicznych (hamowanie długotrwałe) dla rzeczywistej konstrukcji koła otrzymuje się naprężenia maksymalne w strefie przegięcia tarczy, w której uzyskane temperatury są rzędu 60 [^{0}C] (w stosunku do 328 [^{0}C] w wieńcu koła). Powoduje to niewielkie różnice w otrzymywanych wartościach maksymalnych naprężeń redukowanych HMH (10%) dla analizowanych modeli materiałów,

- Uwzględnienie w modelu sił zewnętrznych, wynikających z masy pojazdu w trakcie jazdy po łuku powoduje niewielki wzrost naprężeń redukowanych HMH dla wszystkich modeli materiału,
- Istotny wpływ własności materiałowych, zależnych od temperatury jest szczególnie widoczny w przypadku modelowania zjawisk kontaktowych. Przeprowadzona analiza wykazała rozbieżności w wartościach maksymalnych naprężeń HMH sięgające 163 [MPa], co stanowi 28% wartości dla modelu materiału B.

Uproszczenie wartości modułu Younga, w zależności od temperatury, zamieszczone z Raporcie ERRI z 1987 roku do przebiegu liniowego ma wpływ na wyniki analizy numerycznej. Po obliczeniach przeprowadzonych zgodnie z ww. dokumentem dla hamowania długotrwałego uzyskano 10% różnicy wartości naprężeń maksymalnych. Jednak szczególnie ważne jest uwzględnienie odpowiedniego modelu materiału w przypadku analizy zagadnień kontaktowych. Wynika to z maksymalnych różnic własności materiałowych dla wysokich temperatur.

Literatura

1. Sitarz M., Mańka A., Hełka A.: Wpływ geometrii dylatacji na własności eksploatacyjne wstawek hamulcowych. Problemy Transportu, 1/2006, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006, s. 73-81.
2. Raport ERRI B 169. Termische grenzen der raden und bremsklotze. MTEL P 98005 Utrecht 1987.
3. Raport ERRI B169.1. Entwurf zum UIC-merkblatt. 1998.
4. Sitarz M., Chriuzik K.: Certification of Designing and Calculations of Railway Vehicles Elements with Using the Numerical Methods, et al.: 7th World Congres on Railway Research, 4-8 june 2006, Kanada, CD.
5. Sitarz M.: Railway Wheelsets. Monograph, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
6. Sitarz M., Mańka A., Hełka A.: Badania modelowe i eksploatacyjne systemu koło - klocek hamulcowy - szyna. Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, seria Transport z. 56, nr 1658, Gliwice, 2004, s. 229-238.
7. Sitarz M., Mańka A., Hełka A.: Researches and modelling of thermal phenomena proceeded during braking in the set railway wheel-brake insert. MECHANICS '2004 International Conference, Kaunas University of Technology, Mechanika nr 5 (49), 2004, s. 60-64.
8. Piec P.: Badania eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
9. Markusik S., Sitarz M.: Nowe materiały cierne o wysokiej trwałości i skuteczności hamowania. Maszyny Dźwigowo-Transportowe, nr 2/1997.
10. Grant Celowy KBN nr 6T12 078 2001 C/5667 "Opracowanie technologii i uruchomienie produkcji nowych wstawek kompozytowych klocka hamulcowego dla polskiego i zagranicznego taboru kolejowego".
11. Grant Własny KBN nr "Badanie, modelowanie i weryfikacja zjawisk termicznych z optymalizacją konstrukcji elementów układu koło-klocek hamulcowy (zgodnie z nowymi zaleceniami i normami europejskimi)".

Recenzent: Dr hab. inż. Paweł Piec
Prof. Politechniki Krakowskiej

Praca wykonana w ramach badań własnych: BK - 264/RT4/2007