

Krzysztof BIZOŃ¹

DIAGNOSTYKA KÓŁ NAPĘDNYCH LOKOMOTYWY EU07 Z WYKORZYSTANIEM METOD MAGNETYCZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wartości wybranych własności magnetycznych materiału (staliwo LII500) do oceny stopnia jego degradacji zmęczeniowej, na przykładzie koła napędowego lokomotywy EU07. Zakres dociekań obejmował analizę własności magnetycznych materiału obiektu rzeczywistego oraz badania laboratoryjne własności magnetycznych próbek materiału koła. Badaniom laboratoryjnym poddano próbki materiału koła pozyskane z obszarów o mniejszym i większym stopniu degradacji zmęczeniowej. Badania obiektu rzeczywistego polegały na pomiarze dynamicznej pętli histerezy magnetycznej w wybranych punktach na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni tarczy koła. Metodę pomiaru dynamicznej pętli histerezy magnetycznej oparto na zasadzie pomiaru wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej obwodu magnetycznego, w którym jarzmo z uzwojeniem magnesuje badany materiał. Do pomiaru wartości indukcji magnetycznej (wyrażonej wartością napięcia) wykorzystano hallotron. Dokonano również pomiarów sondą działającą na zasadzie sondy Foerstera.

Słowa kluczowe. koło napędne lokomotywy EU07, staliwo LII500, pomiary własności magnetycznych, degradacja zmęczeniowa materiału.

DIAGNOSTIC OF EU07 LOCOMOTIVE WHEELS WITH USING OF MAGNETIC METHODS

Summary. The aim of the research was to demonstrate possibilities of using measurements of value of magnetic properties characteristic for cast steel LII500 material to evaluate the degree of its fatigue degradation, as exemplified by drive wheel of EU07 locomotive. The scope of the research has covered both magnetic properties of real object i.e. locomotive drive wheel and laboratory research of magnetic properties of samples of wheel material. The object of the research has been the drive wheel which has been taken out of operation due to cracks on its disc. Measurements of dynamic loop of magnetic hysteresis in selected measuring points have been made. The method of measurement has been based on the value of magnetic induction in an air fissure of magnetic system, where the yoke with winding magnetize the material under research. Hall sensor has been used for the measurement of magnetic induction. There have been also made measurements by means of Foerster's probe. Laboratory research has been carried on material samples of a wheel from the areas of greater and lesser degree of fatigue degradation.

Keywords. drive wheel of EU07 locomotive, cast steel LII500, measurements of value of magnetic properties, fatigue degradation of material.

¹ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, e-mail: krzysztof.bizon@polsl.pl

1. WPROWADZENIE

Remont układu napędowego lokomotywy EU07 polega na jego całkowitym demontażu i przeprowadzeniu badań defektoskopowych kół napędnych metodami wizualną i penetracyjną barwną. Badania te mają na celu wykrycie pęknięć w kole napędym (rys.1). Pęknięcie eliminuje koło z dalszej eksploatacji. Metoda wizualna i metoda penetracyjna barwna są metodami prostymi, szybkimi i skutecznymi w wykrywaniu już istniejących pęknięć kół kolejowych. Nie są one jednak w stanie wykryć miejsc w kole napędym o strukturze na tyle zdegradowanej, że w krótkim czasie od badania wystąpi w nich pęknięcie.



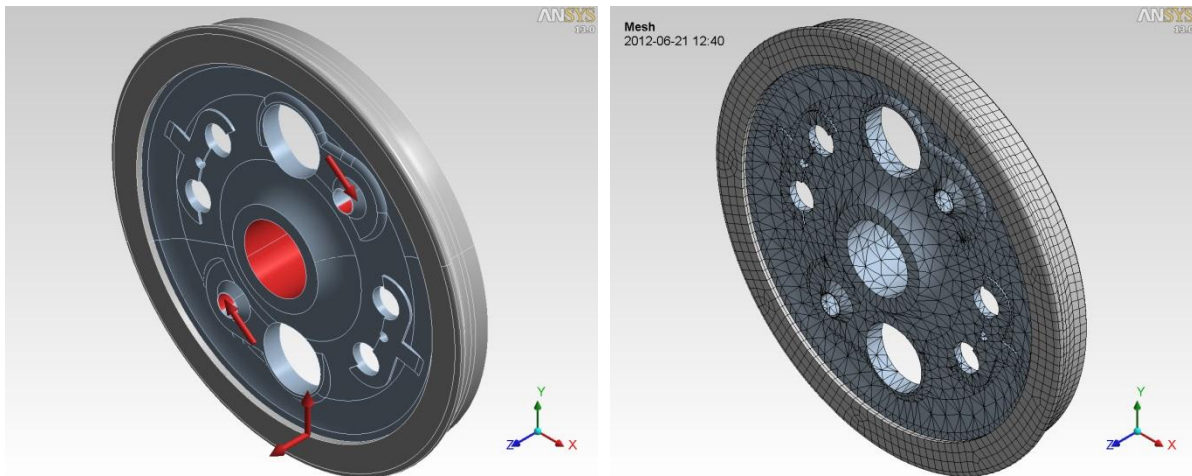
Rys.1. Pęknięcie koła napędowego lokomotywy EU07 wykryte metodą penetracyjną barwną
Fig.1. Crack of the drive wheel of the EU07 locomotive detected with penetrative colorfull method

Pęknięcia kół napędnych charakteryzuje wysoka powtarzalność miejsc ich powstawania. Przyczyny powstawania pęknięć w tego typu kołach nie są w pełni zidentyfikowane.

2. OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE KÓŁ METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Symulacje komputerowe prowadzone z wykorzystaniem metody elementów skończonych wykazały, że w materiale koła nie następuje przekroczenie dopuszczalnej wartości naprężeń [1]. Można jednak stwierdzić, iż podczas toczenia się po szynach, koła są poddane cyklicznym, sinusoidalnym, niesymetrycznym obciążeniom. Obciążenia o takim charakterze mogą być przyczyną zmęczeniowego pęknięcia materiału koła [1]. Symulacje komputerowe przeprowadzono, wykorzystując program Ansys Workbench. Warunki brzegowe (podparcia i obciążenia) modelu dyskretnego (rys.2) przyjęto zgodnie z obowiązującymi normami [3] i wcześniejszymi pracami prowadzonymi w Katedrze Transportu Szynowego [3]. Uwzględniono obciążenia od wcisku koła na oś zestawu kołowego (poprzez zdefiniowanie wstępnego przemieszczenia węzłów elementów skończonych na wewnętrznej powierzchni piasty koła), obciążenia od wzajemnego oddziaływania koła i szyny w postaci sił skupionych dla różnych przypadków ruchu koła po szynie (jazda po prostym odcinku toru, jazda po łuku toru), obciążenia od układu napędowego (rys.2). Wykonano obliczenia wytrzymałościowe dla

różnych punktów przyłożenia sił oddziaływania pomiędzy szyną i kołem, zmieniając punkt przyłożenia sił po obwodzie koła, symulując w ten sposób toczenie się koła po szynie



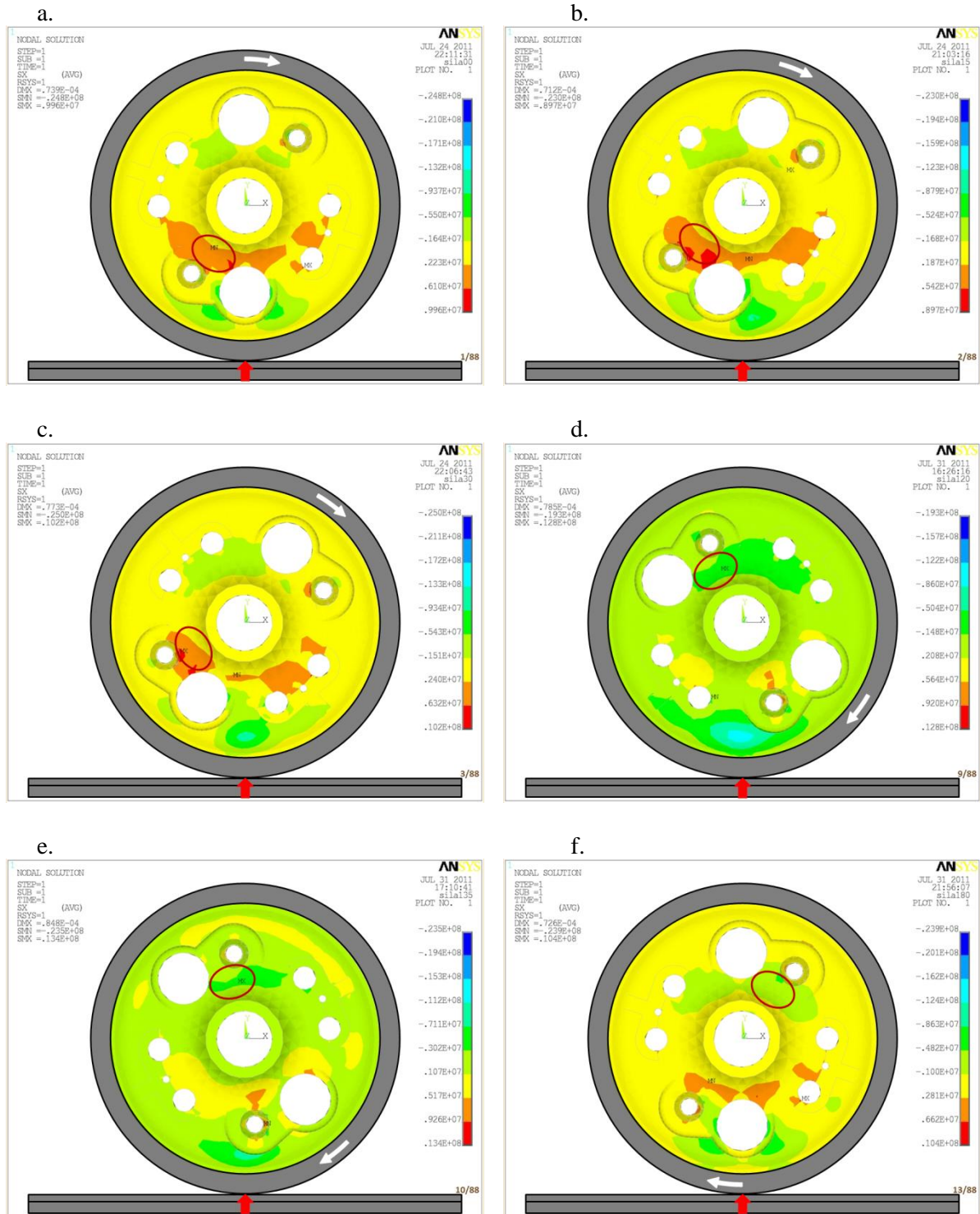
Rys.2. Schemat obciążenia i model dyskretny koła napędnego lokomotywy EU07

Fig.2. The scheme of load and the discret model of the drive wheel EU07 locomotive

Wynikiem przeprowadzonej analizy wytrzymałościowej były między innymi barwne mapy naprężeń. Analiza map naprężeń pozwoliła wykazać, iż w obszarach koła, w których następuje pęknięcie, podczas toczenia się koła po szynie pojawiają się naprężenia o zmiennym znaku (rozciągające i ściskające). Poniżej przedstawiono wybrane, przykładowe mapy naprężeń promieniowych w kole, dla różnych kątów obrotu koła względem szyny. Na rysunkach zaznaczono czerwoną elipsą miejsce powstawania pęknięć w obiekcie rzeczywistym. Położenie koła przedstawione na rysunku 3a (położenie odniesienia) oznaczono jako 0° . Rysunki przedstawiają rozkład naprężeń w tarczy koła, z pominięciem obręczy. Rysunki 3a, 3b, 3c pozwalają zauważyć, że dla przykładowych kątów obrotu koła względem szyny (0° , 15° , 30° , ...), naprężenia promieniowe w miejscu pęknięcia są rozciągające, natomiast dla wybranych przykładowych kątów obrotu koła względem szyny (120° , 135° , ... 180° , ...), naprężenia promieniowe w miejscu pęknięcia są ściskające. Taki cykl powtarza się przy każdym obrocie koła względem szyny.

3. BADANIA WŁASNOŚCI MAGNETYCZNYCH MATERIAŁU OBIEKTU RZECZYWISTEGO

Badania na obiekcie rzeczywistym przeprowadzono, wykorzystując skopometr Fluke serii 190, miernik wielkości magnetycznych oraz sondy pomiarowe [2]. Badania na obiekcie rzeczywistym przeprowadzono na terenie ZNLE w Gliwicach, wykorzystując ześlomowane (z pęknięciem wykluczającym dalszą eksploatację) koło układu napędowego lokomotywy EU07. Pomiarów własności magnetycznych materiału koła dokonano wzdłuż czternastu wybranych promieni koła, w ośmiu punktach, na każdym z wybranych promieni (ścieżek pomiarowych). Ścieżki pomiarowe wybrano w taki sposób, aby przebiegały one przez miejsca w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca pęknięcia koła oraz przez miejsca niewykazujące oznak początków utraty ciągłości (rys.4).



Rys.3. Przykładowe, barwne mapy naprężeń w kierunku promieniowym, w kole napędnym lokomotywy podczas toczenia się koła po szynie

Fig.3. Colourful chart of stress in radial direction in the driving wheel of locomotives while rolling wheels along the track

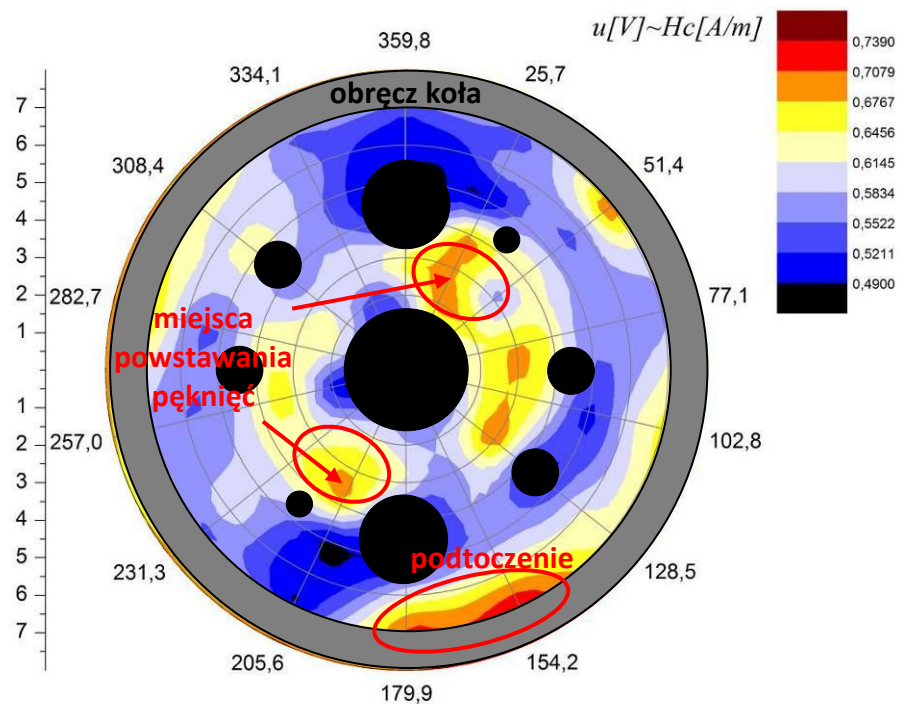
Dokonano pomiarów dynamicznej pętli histerezy magnetycznej. Na każdą ze zmierzonych pętli histerezy składały się cztery pełne jej przebiegi. Badania oparte były na zasadzie pomiaru wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej obwodu magnetycznego, w którym jarzmo z uzwojeniem magnesuje badany materiał [4, 5, 6]. Do pomiaru wartości indukcji magnetycznej (wyrażonej wartością napięcia) wykorzystano hallotron. Zwróć w układzie magnesującym był badany obiekt (ograniczony obszar koła kolejowego). Zarejestrowane przebiegi napięć u_1 i u_2 (na wejściu i wyjściu sondy pomiarowej) pozwoliły na wykreślenie dynamicznej pętli histerezy magnetycznej. Zmierzona wartość napięcia u_1 na wejściu sondy pomiarowej była proporcjonalna do wartości natężenia pola magnetycznego w obwodzie ($u_1[V]=f(H[A/m])$). Zmierzona wartość napięcia u_2 na wyjściu sondy pomiarowej była proporcjonalna do wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej układu magnesującego ($u_2[V]=f(B[T])$). Dynamiczne pętle histerezy magnetycznej zostały wyznaczone przy magnesowaniu materiału w zakresie średnich pól magnesujących.



Rys.4. Koło napędne lokomotywy EU07, z zaznaczonymi miejscami pomiarów
Fig.4. Driving wheel of EU07 locomotives with marked places of measurements

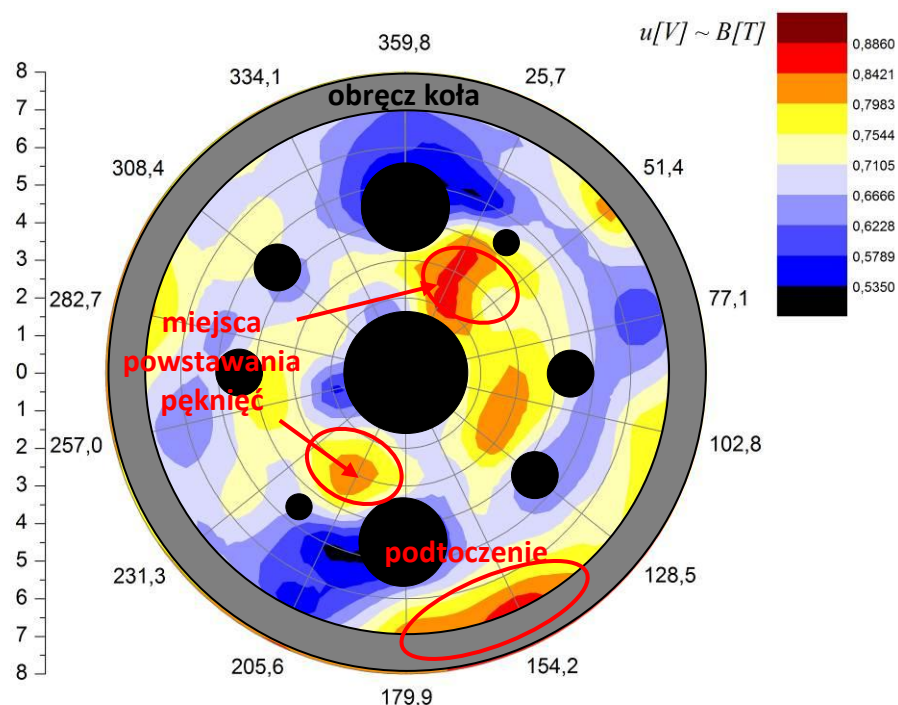
Wyniki pomiarów wartości napięcia u_1 – parametru proporcjonalnego do wartości natężenia koercji H_c , przedstawiono na wykresie kołowym (rys.5). Pomijając obręcz koła, na której zaobserwowano największe wartości parametru natężenia koercji, najprawdopodobniej spowodowane zmianami w materiale od długotrwałego działania karbu (podtoczenia), znajdującego się tuż obok obręczy, największe wartości parametru H_c w tarczy koła zaobserwowano w miejscach odpowiadających miejscom, w których najczęściej następują pęknięcia (por. rys.2 i rys.5).

Wyniki pomiarów wartości napięcia u_2 – parametru proporcjonalnego do maksymalnej wartości wektora indukcji magnetycznej B , przedstawiono na wykresie kołowym (rys.6). Pomijając obręcz koła, na której zaobserwowano największe wartości parametru indukcji, najprawdopodobniej spowodowane zmianami w materiale od długotrwałego działania karbu (podtoczenia), znajdującego się tuż obok obręczy, największe wartości parametru B w tarczy koła zaobserwowano w miejscach odpowiadających miejscom, w których najczęściej następują pęknięcia (por. rys.1 i rys.6).



Rys.5. Mapa rozkładu wartości napięcia u_1 , proporcjonalnego do natężenia koercji H_c na powierzchni wewnętrznej badanego koła, z zaznaczonymi miejscami powstawania pęknięć na obiekcie rzeczywistym

Fig.5. Map of the distribution voltage u_1 proportional to the intensity of coercivity H_c on the inner surface of the test wheel with marked locations of cracking on the real object

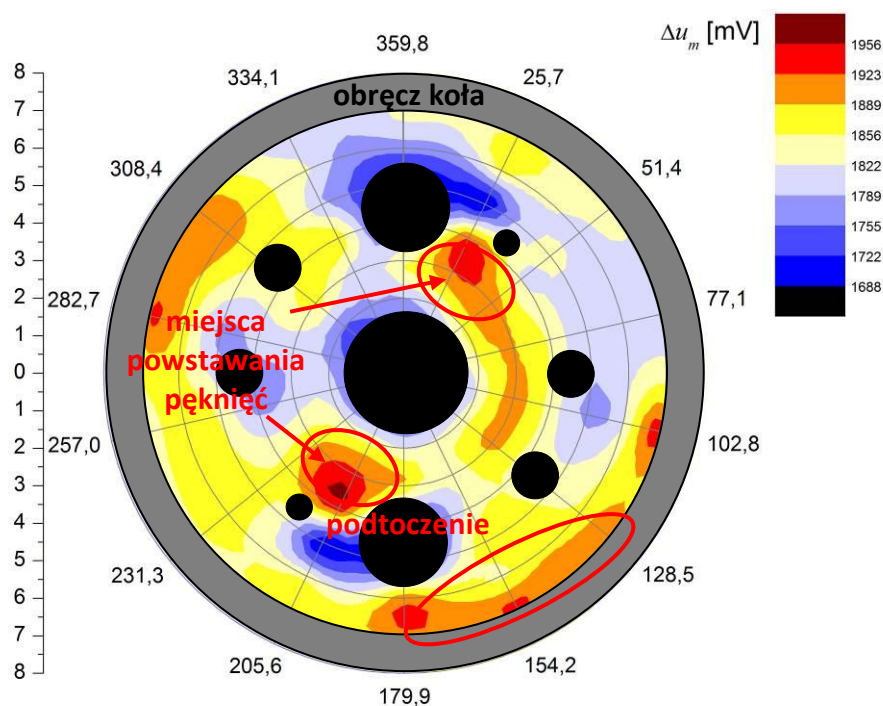


Rys.6. Mapa rozkładu wartości napięcia u_2 , proporcjonalnego do wartości indukcji magnetycznej B na powierzchni wewnętrznej badanego koła, z zaznaczonymi miejscami powstawania pęknięć na obiekcie rzeczywistym

Fig.6. Map of the distribution voltage u_2 proportional to the magnetic induction B on the inner surface of the wheel with the selected test points of cracking on the real object

Kolejnym badaniem magnetycznym materiału koła było badanie z wykorzystaniem sondy działającej na zasadzie sondy Foerстера [2, 4]. Pomiar wykazały wpływ badanego materiału koła (materiał o mniejszym lub większym stopniu degradacji zmęczeniowej) na wartość indukcyjności L_2 , a tym samym na wartość mierzonego napięcia u_m . Układ pomiarowy wyskalowano, tak aby wskazywał on jedynie zmianę napięcia u_m , czyli Δu_m . Pomiar Δu_m w punktach siatki pomiarowej na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni koła pozwoliły na wykreślenie barwnej mapy rozkładu wartości Δu_m na powierzchniach bocznych koła napędowego (rys.7).

Największe wartości napięcia Δu_m w tarczy koła zaobserwowano w miejscach odpowiadających miejscom, w których najczęściej następują pęknięcia (por. rys.1 i rys.7). Duże wartości Δu_m zaobserwowano również w obręczy koła, najprawdopodobniej spowodowane zmianami w materiale od długotrwałego działania karbu (podtoczenia) znajdującego się tuż obok obręczy.



Rys.7. Mapa rozkładu wartości Δu_m na powierzchni wewnętrznej badanego koła, z zaznaczonymi miejscami powstawania pęknięć na obiekcie rzeczywistym

Fig.7. Colour map of the parameter Δu_m on the surface of the internal side of inspected wheel with marked places of cracks on the entity object

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI Z BADAŃ

Przeprowadzone badania własności magnetycznych (pętle histerezy magnetycznej, natężenie koercji, krzywa pierwotnego magnesowania) materiału koła napędowego lokomotywy EU07 wskazują na istnienie mierzalnych różnic ich wartości w zależności od stopnia zmęczeniowej degradacji materiału koła. Miejsca największej degradacji zmęczeniowej cechowała największa wartość natężenia koercji (rys. 5), największa wartość indukcyjności magnetycznej (rys. 6) oraz największa wartość zmian indukcyjności (rys. 7).

Wyniki badań eksperymentalnych oraz analiza literaturowa wskazują na możliwość zastosowania zaproponowanej metody pomiaru stopnia degradacji zmęczeniowej materiału w diagnostyce kolejowych zestawów kołowych.

Zaproponowana metoda wykrywania miejsc zdegradowanych zmęczeniowo w kołach napędnych kolejowych zestawów kołowych pozwala - w porównaniu z metodą penetracyjną barwną, stosowaną w Zakładach Naprawczych Lokomotyw Elektrycznych w Gliwicach - wykryć miejsca o znacznym stopniu degradacji, zanim wystąpi w nich pęknięcie, co metodą penetracyjną barwną nie jest możliwe. Zaletą zaproponowanej metody jest również prosta budowa sond pomiarowych i torów pomiarowych oraz to, że nie wymaga ona znacznych nakładów finansowych. Wszystkie sondy pomiarowe zastosowane do pomiarów zostały zbudowane w ramach projektu badawczego realizowanego w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej [2].

Dalsze badania obejmować będą skalowanie zmęczeniowe próbek materiału koła w celu określenia reakcji materiału na procesy zmęczeniowe i określenia poziomu wartości własności magnetycznych od liczby cykli obciążeń zmęczeniowych.

Bibliografia

1. Bizoń K.: Symulacyjna ocean obciążeń zmęczeniowych w tarczy koła napędnego zestawu kołowego. I Kongres Mechaniki Polskiej, 28-31 sierpnia 2007, Warszawa 2007, (wydawnictwo na CD).
2. Żurek Z. H.: Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych i niskowęglowych. Rządowy Projekt Badawczy Własny N N507 0807 33 (zakończony 15.11.2009 (K. Bizoń – główny wykonawca)).
3. Sitarz M., Sładkowski A., Chruzik K.: Metody numeryczne w projektowaniu kół kolejowych zestawów kołowych. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
4. Bizoń K.: Wykrywanie stref wpływu procesów zmęczeniowych w tarczy koła napędnego lokomotywy EU07 metodami magneto-indukcyjnymi. 40. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Warszawa, 24-26 października 2011r., referat nr R08 (wydawnictwo na CD).
5. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej. PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, nr 9/2008, s. 670-673.
6. Żurek Z.H., Cząstkiewicz Z.: Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych. PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, nr IV/2009, s. 229-232.