

DIAGNOSTYKA MAGNETYCZNA ZMIAN WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH MATERIAŁU KOŁA NAPĘDNEGO LOKOMOTYWY EU07

KRZYSZTOF BIZOŃ

*Katedra Transportu Szynowego, Politechnika Śląska
e-mail: krzysztof.bizon@polsl.pl*

Streszczenie. Autor podjął próbę wykorzystania pomiarów własności magnetycznych (natężenia koercji) ferromagnetyka do wykrywania zmęczeniowej degradacji materiału na przykładzie staliwa LII500. Obiektem badań było koło napędne lokomotywy EU07. Wyniki badań własności magnetycznych odniesiono do badań defektoskopowych prowadzonych metodą wizualną i penetracyjną barwną.

1. WSTĘP

Pęknięcia kół kolejowego zestawu napędno lokomotyw EU07 są problemem z punktu widzenia technicznego, ekonomicznego i bezpieczeństwa pasażerów i towarów. Pęknięcia kół napędnych (rys.1.) charakteryzuje wysoka powtarzalność miejsc ich powstawania. Przyczyny powstawania pęknięć w tego typu kołach nie są w pełni zidentyfikowane. 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]. Przykładowy wykres zmian wartości naprężeń w kierunku promieniowym w zależności od kąta obrotu koła względem szyny, przy jeździe lokomotywy po prostoliniowym odcinku toru przedstawiono na rys.2. Wykres sporządzono dla wybranych węzłów siatki elementów skończonych z obszaru koła, w którym następuje pęknięcie.

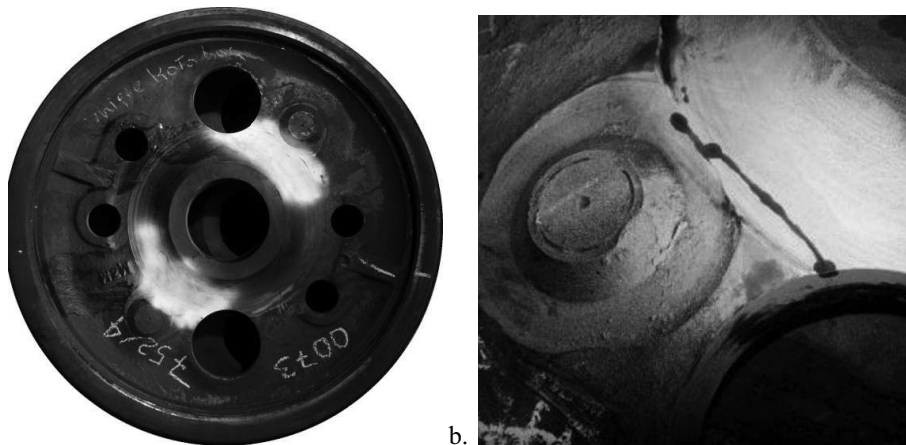
Remont układu napędno lokomotywy EU07 polega na jego całkowitym demontażu i przeprowadzeniu badań defektoskopowych kół napędnych metodą wizualną i penetracyjną barwną. Badania te mają na celu wykrycie pęknięć w kole napędnym (rys.1b.). Pęknięcie eliminuje koło z dalszej eksploatacji. Metoda wizualna 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 napędnym o strukturze na tyle zdegradowanej, że w krótkim okresie czasu od badania wystąpi w nim pęknięcie.

Autor pracy proponuje zastosowanie metod magnetycznych do wykrywania miejsc w materiale koła o wysokim stopniu degradacji, prowadzącym do powstawania pęknięć.

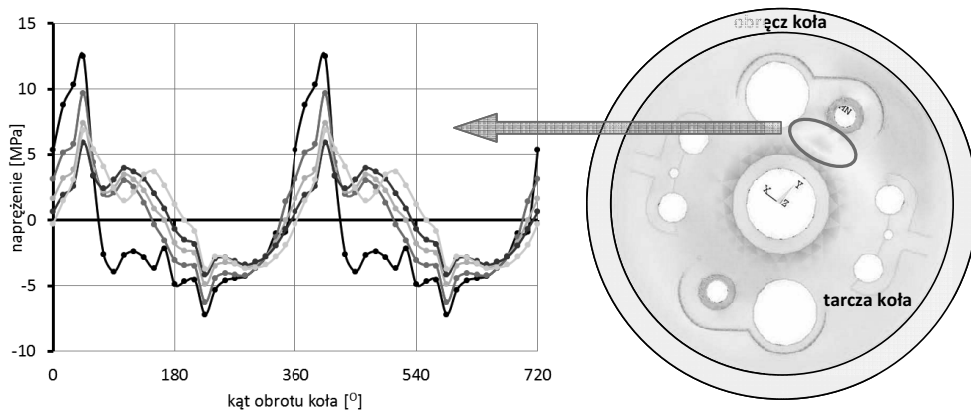
Zakres badań obejmował badania laboratoryjne wybranych własności magnetycznych próbek materiału koła napędno, symulacje komputerowe procesu magnesowania

powierzchni tarczy koła oraz pomiary wartości wybranych własności magnetycznych materiału koła na obiekcie rzeczywistym.

Badania na obiekcie rzeczywistym przeprowadzono w ZNLE w Gliwicach, wykorzystując skopometr Fluke serii 190, miernik wielkości magnetycznych oraz sondy pomiarowe [2]. Badania laboratoryjne wybranych własności magnetycznych próbek materiału koła napędnego przeprowadzono we współpracy z Zakładem Materiałów Amorficznych i Nanokrystalicznych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, wykorzystując miernik własności fizycznych PPMS (Physical Property Measurement System). Do symulacji komputerowych wykorzystano program FEMM 4.2 bazujący na metodzie elementów skończonych w zastosowaniach do zagadnień magnetycznych i elektrostatycznych.



Rys.1.: a. Koło napędne lokomotywy EU07 z zaznaczonymi (obszary w białym kolorze) miejscami powstawania pęknięć, b. pęknięcie koła napędnego lokomotywy EU07 uwidocznione metodą penetracyjną barwną



Rys.2. Przebiegi naprężeń w kierunku promieniowym (w wybranych węzłach siatki elementów skończonych) w miejscu powstawania pęknięć tarczy koła napędnego

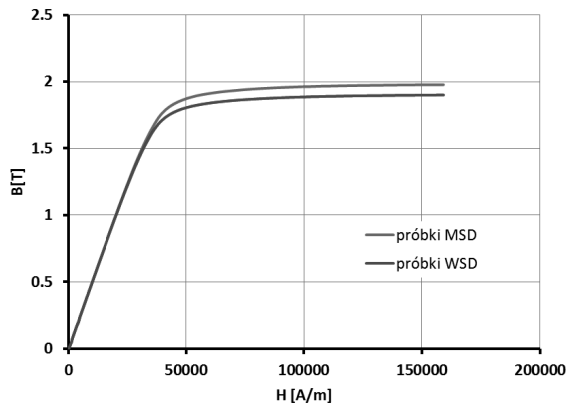
2. PODSTAWY TEORETYCZNE PODJĘTYCH BADAŃ

Staliwo LII500 jest podstawowym materiałem stosowanym do produkcji napędnych kół kolejowych lokomotyw EU07. Stopy żelaza z węglem (w tym również staliwa) w większości przypadków mogą być poddawane badaniom diagnostycznym magnetycznym. Wpływ naprężeń mechanicznych, wywołanych czynnikami zewnętrznymi (kształtowanie materiału, obróbka cieplna, obciążenia eksploatacyjne) na parametry magnetyczne materiału nie jest jednakowy dla wszystkich gatunków stali i staliw. Każdy gatunek stali bądź staliwa wymaga niezależnych badań zmienności parametrów magnetycznych od czynników zewnętrznych pod kątem możliwości zastosowania diagnostyki magnetycznej. Wielkościami fizycznymi magnetycznymi, czułymi na strukturę materiału są przede wszystkim: dynamiczna przenikalność magnetyczna oraz tangens kąta stratności. Wpływ procesów degradacyjnych materiału na zmiany parametrów magnetycznych każdego gatunku stali bądź staliwa (ferromagnetyka) przebiega w sposób charakterystyczny i indywidualny, zależny między innymi od składu chemicznego materiału i od charakteru obciążeń zmęczeniowych [2-5].

3. BADANIA LABORATORYJNE I SYMULACJE KOMPUTEROWE

3.1. Badania laboratoryjne wybranych własności magnetycznych materiału koła

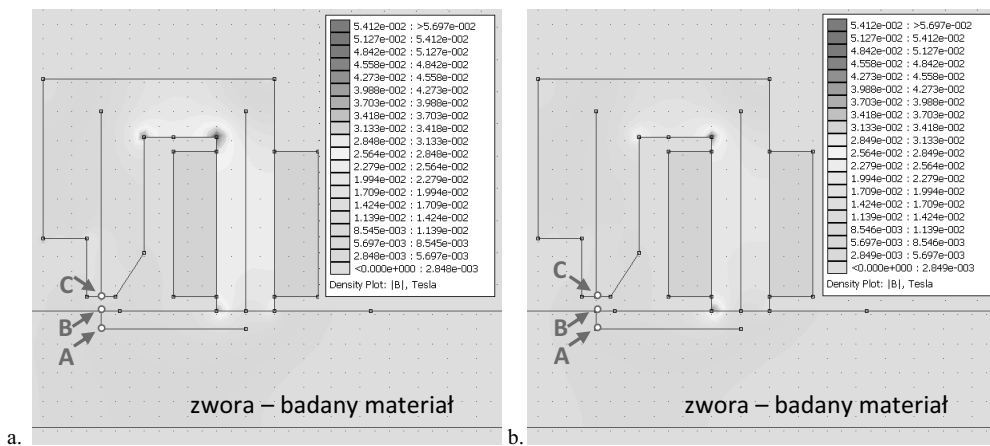
Pomiary laboratoryjne przeprowadzono, wykorzystując próbki materiału wycięte z badanego koła. Próbki wycięto z miejsc bezpośrednio sąsiadujących z miejscem pęknięcia (próbki o większym stopniu degradacji zmęczeniowej – oznaczone jako WSD) jak i z miejsca oddalonego od pęknięcia w kole (próbki o mniejszym stopniu degradacji zmęczeniowej – oznaczone jako MSD). Próbki materiału zostały przygotowane na elektrodrązarce iskrowej i miały kształt sześciangu o krawędzi 3mm. Wykorzystany do badań miernik własności fizycznych PPMS (Physical Property Measurement System) pozwolił między innymi na wyznaczenie krzywych pierwotnego magnesowania (rys.3.), niezbędnych do przeprowadzenia symulacji komputerowych. Zaobserwowano mierzalne różnice w charakterze krzywych pierwotnego magnesowania próbek o mniejszym i większym stopniu degradacji zmęczeniowej materiału, przejawiające się wyraźną różnicą poziomów nasycenia magnetycznego.



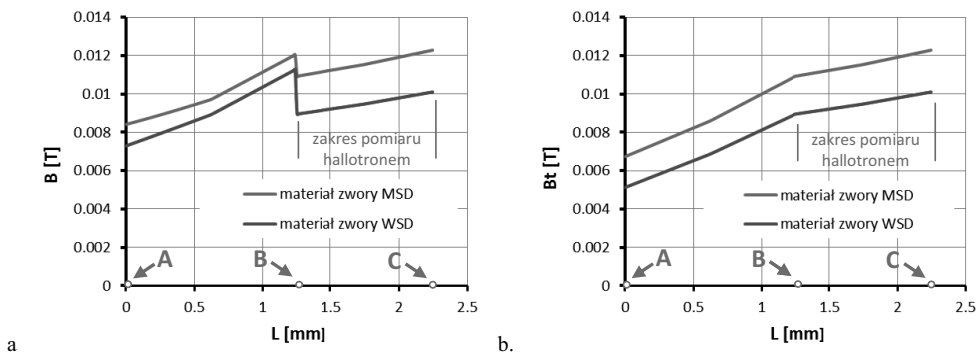
Rys.3. Krzywe pierwotnego magnesowania próbek materiału o mniejszym (MSD) i większym (WSD) stopniu degradacji zmęczeniowej

3.2. Symulacje komputerowe

Symulacje komputerowe przeprowadzono w celu określenia teoretycznego rozkładu strumienia indukcji magnetycznej w ograniczonym obszarze pod powierzchnią materiału badanego koła i w szczelinie powietrznej układu pomiarowego. Symulacje przeprowadzono wykorzystując model 2D układu pomiarowego (rys.7a.). Wyniki symulacji wskazują na zależność wartości strumienia indukcji magnetycznej $B[T]$ od stopnia degradacji zmęczeniowej, a tym samym od własności magnetycznych badanego materiału (rys.4, 5). Zauważyć można mierzalne różnice w rozkładzie wartości wektora indukcji magnetycznej w zworze (materiale badanego koła) układu magnesującego (rys.4.) oraz w szczelinie powietrznej układu magnesującego (rys.5., odcinek B–C).



Rys.4. Mapy rozkładu indukcji magnetycznej w układzie magnesującym ze zworą z materiału MSD i WSD (MSD – mniejszy stopień degradacji zmęczeniowej, WSD – większy stopień degradacji zmęczeniowej)

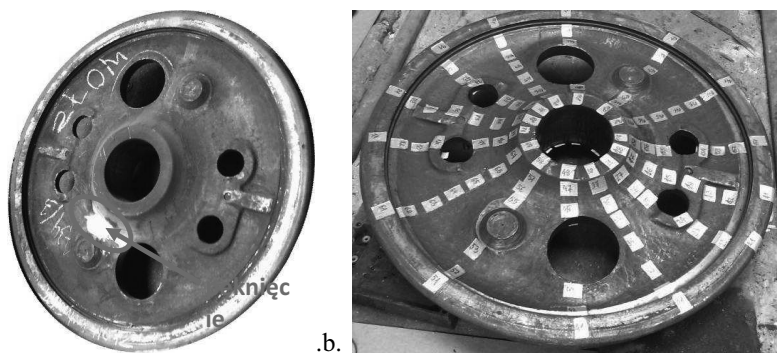


Rys.5. Przebieg zmian wartości indukcji magnetycznej na odcinku ABC (z rys.4) układu pomiarowego: a. moduł wektora indukcji, b. styczna składowa wektora indukcji

4. BADANIA NA OBIEKCIE RZECZYWISTYM

4.1. Metodyka badań własności magnetycznych materiału koła

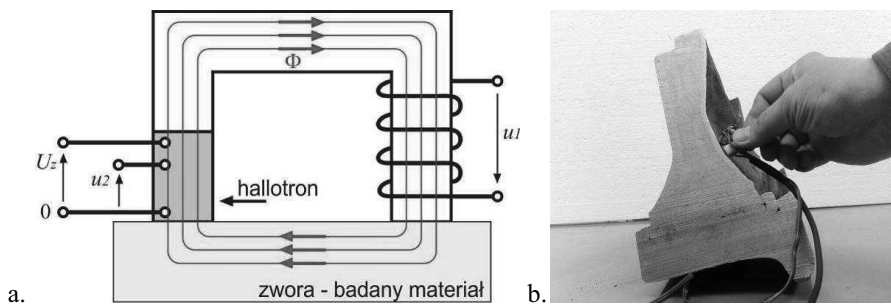
Badania na obiekcie rzeczywistym przeprowadzono na terenie ZNLE w Gliwicach, wykorzystując ześlomowane (z pęknięciem wykluczającym dalszą eksploatację) koło układu napędowego lokomotywy EU07. Pomiarów dynamicznej pętli histerezy magnetycznej dokonano wzdłuż czternastu wybranych promieni koła w ośmiu 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 jak i przez miejsca niewykazujące oznak początków utraty ciągłości. Przebieg ścieżek ustalono po konsultacjach ze służbami ZNLE w Gliwicach w celu wybrania odpowiednich ich przebiegów na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni koła (rys.6.).



Rys.6. a. Wewnętrzna powierzchnia boczna koła napędowego z zaznaczonym miejscam pęknięcia, b. siatka punktów pomiarowych

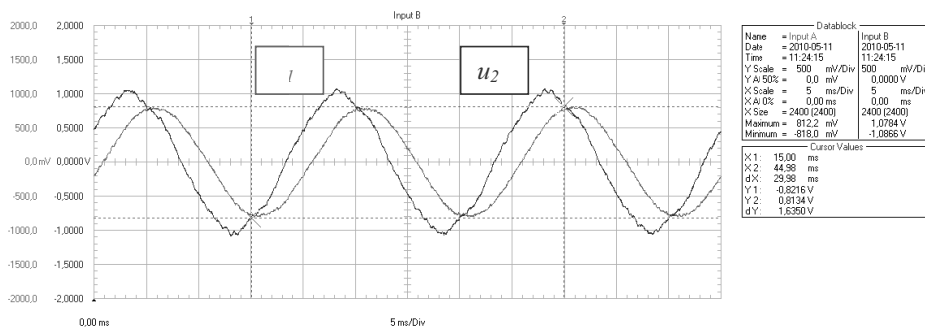
Pomiarów dynamicznej pętli histerezy magnetycznej dokonano zarówno na wewnętrznej jak i na zewnętrznej powierzchni koła w wybranych punktach pomiarowych (rys.6b.). Na każdą ze zmierzonych pętli histerezy składały się cztery pełne jej przebiegi.

Badania oparte były na zasadzie pomiaru wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej obwodu magnetycznego, w którym jazmo z uzwojeniem magnesuje badany materiał (rys.7a.). Do pomiaru wartości indukcji magnetycznej (wyrażonej wartością napięcia u_2) wykorzystano hallotron. Zworą w układzie magnesującym był badany obiekt (ograniczony obszar koła kolejowego).



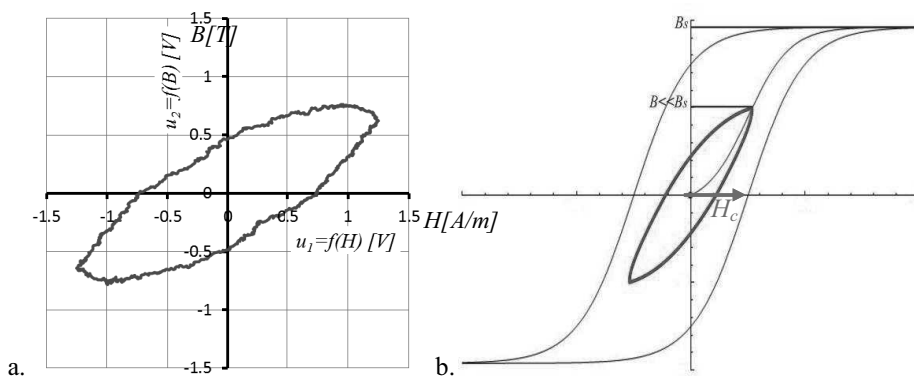
Rys.7. a. Schemat działania sondy pomiarowej, b. pomiar sondą magnetyczną

Przykładowy, zarejestrowany przebieg wartości napięć u_1 i u_2 przedstawiono na rys.8.



Rys.8. Przykładowy przebieg napięcia u_1 (zasilanie układu magnesującego) i u_2 (napięcia na hallotronie)

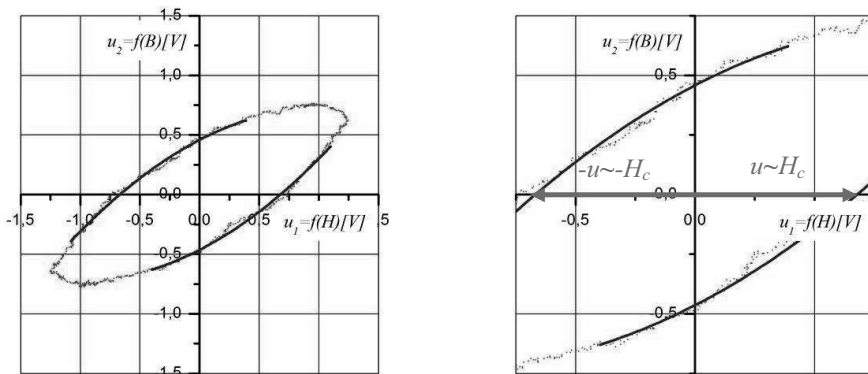
Zarejestrowane przebiegi napięć u_1 i u_2 pozwoliły na wykreślenie dynamicznej pętli histerezy magnetycznej (rys.9a.). Zmierzona wartość napięcia u_1 na wejściu sondy pomiarowej była proporcjonalna do wartości natężenia pola magnetycznego w obwodzie ($u_1[V]=f(H[A/m])$). Zmierzona wartość napięcia u_2 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.9b.).



Rys.9. a. Przykładowa, zmierzona pętla histerezy, b. teoretyczna pętla histerezy (kolor czarny) wraz z histerezą obrazującą ideę pomiaru (kolor czerwony)

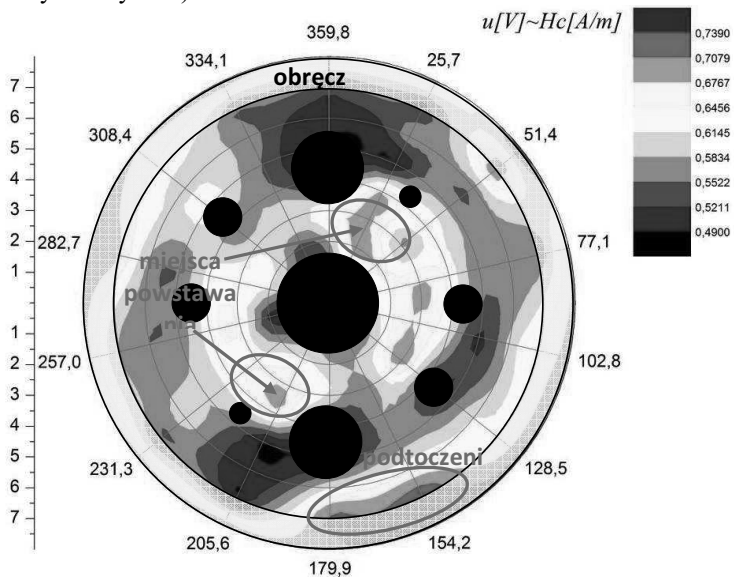
4.2. Przebieg pomiarów i opracowanie wyników

Natężenie koercji H_c jest jednym z elementów charakteryzujących pętlę histerezy magnetycznej materiału i jest uzależnione od stanu degradacji zmęczeniowej materiału [2]. W celu wyznaczenia natężenia koercji odpowiednie fragmenty pętli histerezy magnetycznej aproksymowano odcinkami krzywej drugiego stopnia (rys.10.). Wartość natężenia koercji wprost proporcjonalną do wartości napięcia u_1 ($H_c[A/m]=f(u_1[mV])$) wyznaczono jako średnią arytmetyczną wartości u i $-u$ odczytanych z wykresów (rys.10b.). Wartości u i $-u$ odczytano jako odcięte punktów przecięcia krzywych aproksymujących odcinki pętli histerezy z osią poziomą u_1 .



a. b.
 Rys.10. a. Aproxymacja pętli histerezy funkcją kwadratową, b. sposób wyznaczenia natężenia koercji wyrażonego wartością napięcia u_1

Wyniki pomiarów wartości napięcia u_1 – parametru proporcjonalnego do wartości natężenia koercji H_c przedstawiono na wykresie kołowym (rys.11.). 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.1. i rys.11.).



Rys.11. Mapa rozkładu parametru H_c na powierzchni wewnętrznej badanego koła z zaznaczonymi miejscami powstawania pęknięć na obiekcie rzeczywistym

5. WNIOSKI Z BADAŃ

Przeprowadzone badania własności magnetycznych (pętla 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 cechuje największa wartość natężenia koercji (rys.11). Badania laboratoryjne krzywych pierwotnego magnesowania materiału próbek wykazały, iż materiał z obszarów o mniejszym stopniu degradacji zmęczeniowej cechuje wyższy poziom magnetyzacji nasycenia w odniesieniu do próbek materiału o wyższym poziomie degradacji zmęczeniowej (rys.3). Symulacje komputerowe, oparte na wynikach badań laboratoryjnych, wykazały istnienie wyraźnych różnic w wartościach składowych wektora indukcji magnetycznej w układzie pomiarowym (rys.4, rys.5) ze zwrócić z materiału o większym i mniejszym stopniu degradacji zmęczeniowej.

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

LITERATURA

1. Bizoń K.: Symulacyjna ocean obciążeń zmęczeniowych w tarczy koła napędowego zestawu kołowego. W: I Kongres Mechaniki Polskiej, 28-31 sierpnia 2007, Warszawa, 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. Bizoń k., Żurek Z. H.: Badania wytrzymałości zmęczeniowej stali stosowanej na zestawy kołowe w oparciu o jej parametry magnetyczne. W: Materiały konferencyjne XIX konferencji naukowej „Pojazdy Szynowe”, Targanice k. Andrychowa, 15-17 września 2010, t. 1, s. 29-36.
4. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej. „Pomiary Automatyka, Kontrola, ” 2008, nr 9, s. 670-673.
5. Żurek Z.H., Czastkiewicz Z.: Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych. „Pomiary, Automatyka, Kontrola” 2009, IV, s. 229-232.

DIAGNOSTICS OF CHANGES OF MECHANICAL PROPERTIES OF EU07 LOCOMOTIVE DRIVE WHEEL MATERIAL

Summary. The author has made an attempt to use measurements of magnetic properties (coercivity intensity) of ferromagnetic to detect fatigue material degradation based on the example of LII500 cast steel. Drive wheel of EU07 locomotive was the research object. The results of the research on magnetic properties have been compared with defectoscopic ones carried by means of visual method and dye penetration method.