

Michał Szudyga
Politechnika Śląska w Katowicach

Diagnostyka zmęczeniowa metodą magnetyczną na przykładzie stali stosowanej w transporcie kolejowym

**Magnetic diagnostic of fatigue of constructional steel used in
railway transport**

Streszczenie

Zmęczenie stali konstrukcyjnych, spowodowane długotrwałe działającymi naprężeniami mechanicznymi - zmienia strukturę materiału, która determinuje jego właściwości magnetyczne. Okresowe badanie właściwości magnetycznych elementów stalowych umożliwia śledzenie (detekcję) postępującego zmęczenia w czasie eksploatacji. Zidentyfikowanie parametrów o największej podatności (zakresie zmian od procesów zmęczeniowych) dla badanej stali umożliwia wybór metody diagnozowania zmęczeniowego materiału. W artykule przedstawiono możliwości detekcji i klasyfikacji zmęczenia materiału metodą nieniszcząca, jaką jest metoda magnetyczna na przykładzie stali stosowanych w transporcie kolejowym.

Słowa kluczowe: *diagnostyka zmęczeniowa, stal konstrukcyjna, transport kolejowy.*

Abstract

Fatigue of constructional steels, due to long acting mechanical stress - changes the structure of the material, which determines its magnetic properties. Periodic examination of the magnetic properties of steel provide to detection progressive fatigue during operation. Identifying the parameters with the highest sensitivity (the change of fatigue processes) for the investigated steel allows to choose the method of diagnosing the fatigue of the material. The article presents the possibility of detection and classification of fatigue of nondestructive method for example of steel used in rail transport.

Keywords: *diagnostics of fatigue, constructional steel, railway transport.*

1. Wprowadzenie

Pomimo stosowania zaawansowanych technik badawczych wciąż mamy do czynienia z pęknięciami zmęczeniowymi elementów zestawów kołowych (osi, obręczy kół, a także kół bosych i monoblokowych), które mogą prowadzić do poważnych wypadków kolejowych. Przyczyna leży w istocie stosowanych metod diagnostycznych i związanych z nimi ograniczeń, które z założenia nie wykrywają zmian poprzedzających inicjację pęknięcia zmęczeniowego.

Zagadnienie diagnostyki zmęczeniowej jest szczególnie istotne w zakresie eksploatacji pociągów szybkich, gdzie mamy do czynienia ze wzrostem procesów zmęczeniowych od coraz większych obciążeń mechanicznych kół przy coraz większych prędkościach jazdy pociągów [4]. Pęknięcie zmęczeniowe, które rozwija się w wyniku zmiennych naprężeń może prowadzić do poważnych awarii, z poważnymi konsekwencjami dla sprzętu, środowiska naturalnego i ludzkiego życia.



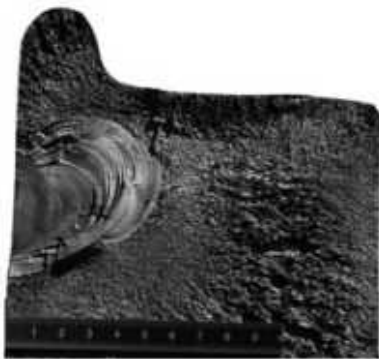
Rys. 1. Przykłady uszkodzeń zestawu kołowego

W roku 2006 w Polsce zgłoszono 137 przypadków pęknięć kół i obręczy kolejowych w trakcie eksploatacji, w roku 2007: 47, 2008: 49, a w 2009 – 105 [6]. Taki wynik może świadczyć o tym, iż obecnie stosowane metody defektoskopowe są niewystarczające.

2. Stan zagadnienia

Obecnie diagnostyka kolejowego zestawu kołowego w głównej mierze opiera się na badaniach defektoskopowych metodą ultradźwiękową, magnetyczno-proszkową oraz wiroprądową. Wadą wymienionych metod jest ograniczenie związane z głębokością badania i czułością detekcji pęknięć. Ponadto wykrywane są tylko wady przekraczające normatywny wymiar dopuszczalny.

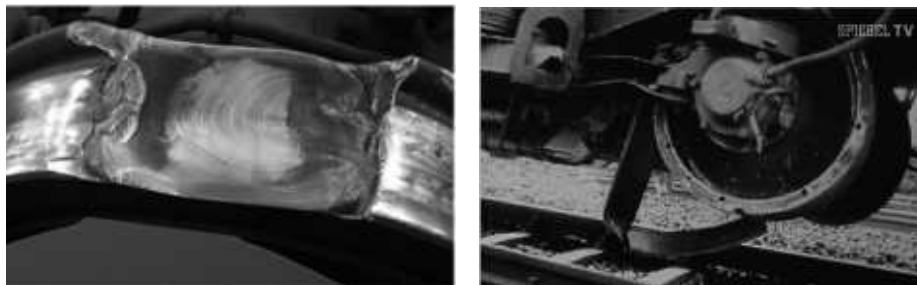
Badania powierzchni materiału metodami obserwacji nie można uznać za odpowiednie dla detekcji zmian poprzedzających pęknięcie zmęczeniowe, ponieważ zmiany mikrogeometrii powierzchni następują w końcowym etapie procesu niszczenia zmęczeniowego (ostatnie 20% trwałości zmęczeniowej) [5]. Doświadczenia eksploatacyjne wskazują [1], że inicjacja procesu pęknięcia występuje często pod powierzchnią toczną (rys. 2).



Rys. 2. Przykład inicjacji pęknięcia pod powierzchnią toczną koła kolejowego

Wymienione powyżej metody badawcze są do tej pory decydującym składnikiem oceny jakościowej kół zestawu kołowego, które mają tak ogromny wpływ na bezpieczeństwo transportu.

Głównymi czynnikami eksploatacyjnymi wpływającymi na rozwój uszkodzenia zmęczeniowego kół i obręczy kolejowych są obciążenia statyczne, dynamiczne i uderowe wywołane przez: siły zewnętrzne, naprężenia wewnętrzne, korozję, erozję, szoki termiczne i mechaniczne oraz tarcie. Na skutek występowania każdego z tych czynników lub jednocześnie kilku z nich powstają uszkodzenia (nieciągłości eksploatacyjne, ślady zużycia – rys. 3).



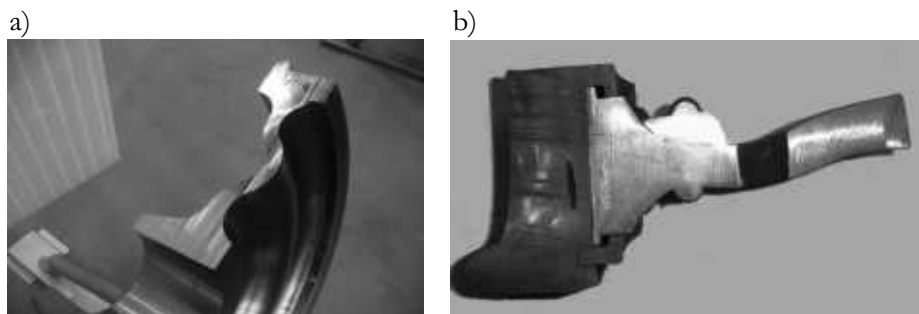
Rys. 3. Pęknięcia obręczy kolejowych

Stosowane prędkości jazdy pociągów generują wielokrotny wzrost obciążeń dynamicznych, przyspieszających procesy zmęczeniowe. Powstała konieczność rozszerzenia zakresu badań eksploatacyjnych zestawów kołowych (osi, kół obręczowanych, obręczy jak i kół monoblokowych) o dodatkową detekcję zmian zmęczeniowych.

3. Badania własne

Opracowanie wiarygodnych technik monitorowania degradacji materiału metodami nieniszczącymi wymaga wykonania szeregu badań, obejmujących ocenę zmian mikrostruktury, właściwości fizycznych oraz wytrzymałościowych w funkcji czasu eksploatacji. Skorelowanie wartości czynników określających stopień degradacji uzyskanych metodami nieniszczącymi oraz metodami niszczącymi (właściwości mechanicznych), pozwoli na zastosowanie metod nieniszczących do oceny stanu materiału.

Najczęściej stosowanymi materiałami na koła monoblokowe i obręcze kolejowe na kontynencie europejskim są stale węglowe. Należy jednak materiał ten poddać odpowiednim zabiegom obróbczym zwiększającym własności wytrzymałościowe i odporność na zużycie ściernie. Obecnie w Polsce na koła monoblokowe zarówno do zestawów wagonowych jak i pojazdów trakcyjnych stosuje się głównie stal węglową, konstrukcyjną ER7 wg PN-EN 13262+A1:2009, a na obręcze kolejowe stal P54T wg PN-84/H-84027/06. Koła bezobrzęczowe wykonane są w całości w kształcie monobloku, a koła obręczowane składają się z koła bosego, obręczy nasadzonej na koło bose oraz z pierścienia zaciskowego. Obręcze zestawów kołowych powinny być wykonane ze stali charakteryzującej się odpowiednią ciągliwością oraz dużą wytrzymałością na rozciąganie. W przypadku zużycia obręczy można ją wymienić bez wymiany koła bosego. Na rys. 4 przedstawiono przekrój koła monoblokowego oraz koła obręczowanego.



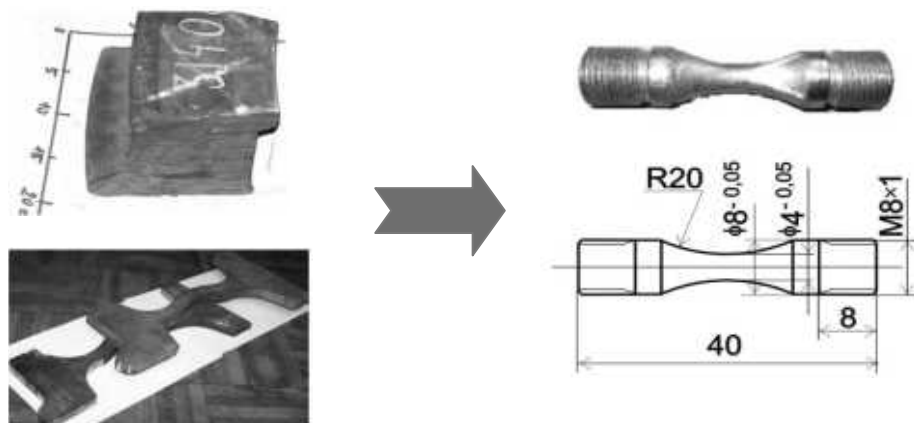
Rys. 4. Przekrój koła bezobrzęczowego (monoblokowego) - a, i koła obręczowanego - b

Stal stosowana na koła i obręcze kolejowych zestawów kołowych jest materiałem ferromagnetycznym. Stale ferromagnetyczne poddane obciążeniom: zmęczeniowym, mechanicznym, termicznym, pełzaniu lub odkształceniom plastycznym wykazują zmiany parametrów magnetycznych w stosunku do stanu wyjściowego [7, 8, 9].

Ze względu na wykazane wysokie czułości parametrów magneto – indukcyjnych na zmiany w materiale od czynników zewnętrznych i wewnętrznych tj.: naprężenia, odkształcenia zanieczyszczenia, temperatura czy struktura materiału, proponuje się wykorzystanie zjawisk magnetycznych w celu monitorowania zmian struktury materiału pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych [9].

Część badawcza pracy składa się z badań wytrzymałościowych oraz badań magnetycznych. Badania pozwoliły na określenie zależności zmian parametrów magnetycznych od zadanych obciążeń zmęczeniowych. Badania zmęczeniowe polegały na zadaniu obciążeń symetrycznie zmiennych przy jednoczesnej rejestracji odkształceń plastycznych.

Próbki materiału stali na koła i obręcze kolejowe zostały wycięte z kawałków obręczy kolejowej (rys. 5) i wieńca koła. Kształt i wymiary próbek zaprojektowano w oparciu o normę ASTM.



Rys. 5. Wycinki materiału obręczy kolejowej i koła monoblokowego oraz uzyskany kształt próbki

Badania składu chemicznego, mikrostruktury oraz wtrąceń niemetalicznych realizowane były w Laboratoriach Katedry Nauki o Materiałach, Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny stali wykorzystywanej na obręcze kół kolejowych zestawów kołowych, a w tabeli 2 stali na koła monoblokowe.

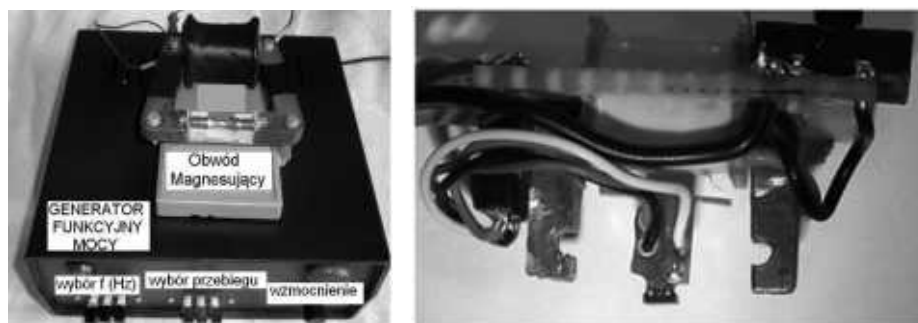
Tab. 1. Skład chemiczny stali P54T

Stal P54T	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
				Maksymalna zawartość pierwiastka w %						
Norma	0,5±0,58	0,6±0,9	0,15±0,4	0,04	0,04	0,3	0,3	0,3	0,05	0,05
Pomiar	0,58	0,86	0,36	0,019	0,019	0,02	0,02	0,04	0,01	0,001

Tab. 2. Skład chemiczny stali ER7

Stal ER7	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Cr+Mo+Ni
Norma	0,52	0,8	0,4	0,3	0,3	0,3	0,08	0,06	0,50
Próbka Pu30	0,51	0,729	0,306	0,201	0,049	0,053	0,01	0,024	0,26

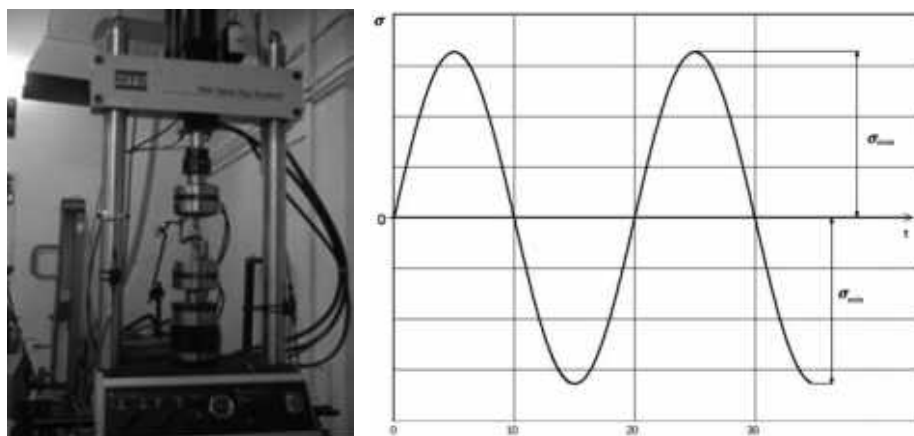
Na podstawie badań metalograficznych stwierdzono, iż w strukturze poszczególnych próbek występują liczne wtrącenia niemetaliczne. W związku z tym, iż na własności wytrzymałościowe materiału ma wpływ jego struktura, w tym liczba i charakter wtrąceń niemetalicznych, materiał przeznaczony do badań został wyselekcjonowany pod kątem jednorodności materiału w badaniu nieniszczącym. Badania jednorodności miały na celu selekcję próbek badanej stali pod kątem właściwości magnetycznych i elektrycznych. Dzięki temu do badań zmęczeniowych wybrano materiał o możliwie jednakowych właściwościach, zmniejszając tym samym prawdopodobieństwo wystąpienia przypadkowości w wynikach testów zmęczeniowych. W celu przeprowadzenia badań jednorodności zaprojektowano oraz skonstruowano stanowisko pomiarowe składające się z generatora funkcyjnego, obwodu magnesującego oraz sondy pomiarowej. Na rysunku 6 przedstawiono widok stanowiska oraz sondy pomiarowej wykorzystanych w badaniach.



Rys. 6. Stanowiska pomiarowego wraz z sondą

Stanowisko to stanowi obecnie wyposażenie Laboratorium Elektrotechniki Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej i jest wykorzystywane do badań naukowych realizowanych w Katedrze Transportu Szynowego.

W ramach badań objętych artykułem przyjęto wahadłowy przebieg charakteru naprężeń zmęczeniowych o współczynniku amplitudy równym $R = -1$ (rys. 7). Badania wytrzymałościowe prowadzone były we współpracy z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie w Certyfikowanym Laboratorium Wytrzymałości Materiałów. Na podstawie tych badań wyznaczono parametry wytrzymałościowe materiału oraz opisano mechanizm niszczenia badanej stali.



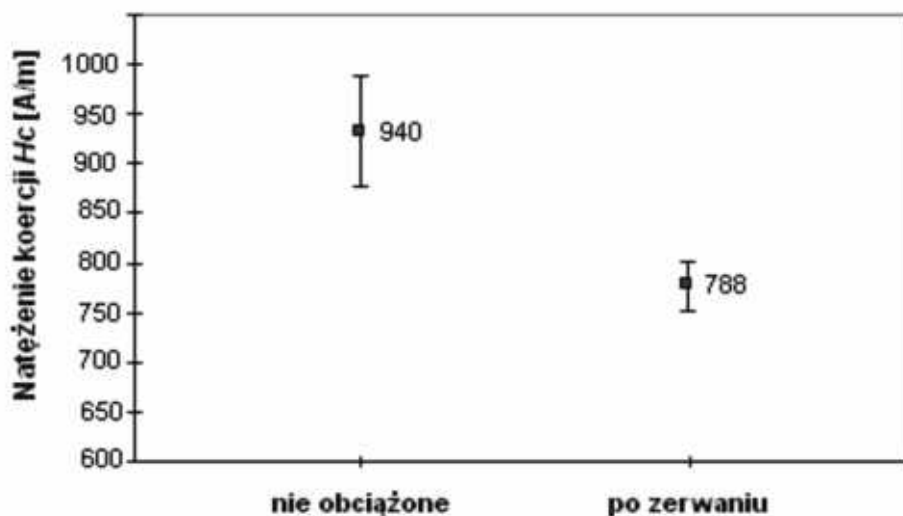
Rys. 7. Maszyna wytrzymałościowa MTS oraz przyjęty w pracy wahadłowy przebieg naprężeń

Badana stal podczas zadanej historii naprężeń charakteryzuje się powiększaniem szerokości zmęczeniowej pętli histerezy i efektem ratchetingu, który dominuje w początkowej fazie obciążania. Te dwa efekty powinny się brać pod uwagę w modelowaniu zachowania się materiału w obliczeniach inżynierskich z zastosowaniem metody elementów skończonych.

Zaproponowana w artykule metoda badania zależności parametrów magnetycznych od zmęczenia materiału, polegała na obserwacji trendu zmian własności magnetoindukcyjnych materiału w funkcji amplitudy naprężeń zmęczeniowych w cyklu wahadłowym.

Dla badanego materiału P54T wykonano pomiary natężenia koercji H_c przed obciążeniem i po zerwaniu próbki klepsydrycznej. Natężenie koercyjne H_c oznacza taką wartość natężenia pola magnetycznego skierowanego przeciwnie do kierunku namagnesowania materiału, która powoduje zmniejszenie

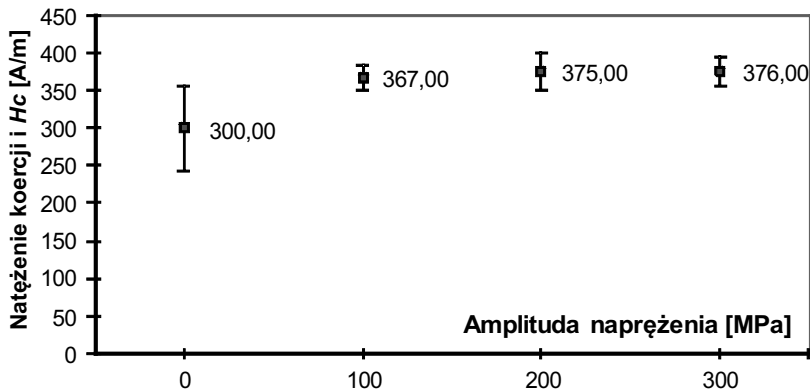
indukcji B w materiale do zera – czyli całkowite rozmagnesowanie materiału. Jest to jedna z cech charakterystycznych danego materiału magnetycznego. Parametr ten jest wielkością zależną od stanu materiału m.in.: składu chemicznego, naprężeń wewnętrznych materiału, odkształceń oraz zanieczyszczeń w mikrostrukturze materiału. Pomiar natężenia koercji wyznaczono na stanowisku laboratoryjnym Zakładu Materiałów Amorficznych i Nanokrystalicznych Instytutu Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego za pomocą koercjometru magnetycznego. Na rys. 8 przedstawiono wynik porównania.



Rys. 8. Analiza H_c dla próbek nowych i obciążonych zmęczeniowo do zerwania próbki

Analiza porównania wskazuje, że materiał po zerwaniu charakteryzuje się o około 20% niższym natężeniem koercji w porównaniu z materiałem nieobciążonym. Rozpatrując tylko zmiany natężenia koercji można stwierdzić, że parametr ten umożliwia diagnostykę procesów zmęczeniowych materiału.

Badanie zależności parametrów magnetycznych od zmęczenia materiału, polegało na obserwacji trendu zmian własności magnetoindukcyjnych materiału w funkcji amplitudy naprężeń zmęczeniowych w cyklu wahadłowym. Przyjęte do badań amplitudy naprężeń wynosiły: 100MPa, 200MPa i 300MPa. Dla wszystkich próbek przyjęto stałą liczbę cykli obciążeniowych wynoszącą $N = 2 \cdot 10^5$ oraz częstotliwość $f = 20$ Hz. Wyniki pomiarów H_c dla przyjętych amplitud naprężeń i przy przebiegu $N = 2 \cdot 10^5$ cykli przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wynik analizy zmian natężenia koercji H_c w funkcji amplitudy naprężenia

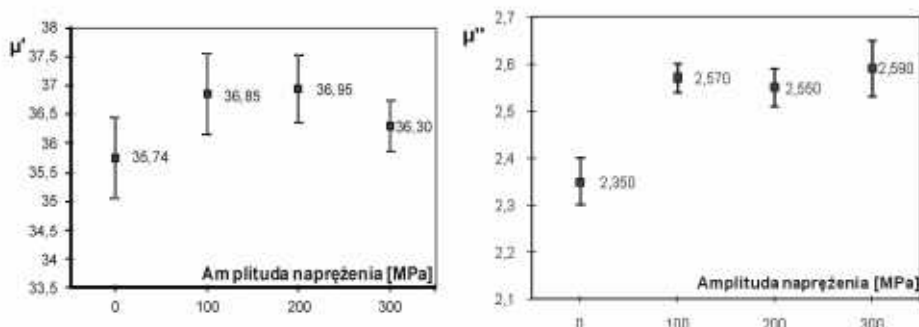
Z analizy przedstawionych rysunków wynika, iż dla stali P54T natężenie koercji H_c wzrasta wraz ze wzrostem amplitudy naprężeń działających na próbkę. Największa różnica występuje pomiędzy materiałem nieobciążonym a materiałem obciążonym i wynosi ona 19%. Dalsze przyrosty obciążeń wykazują niewielkie zmiany natężenia koercji - rzędu 3%.

Badania magneto-indukcyjne przeprowadzono na mierniku własności fizycznych PPMS (Physical Property Measurement System) firmy Quantum Design – rys. 10. Jest to nowoczesna aparatura badawcza, pozwalająca na zautomatyzowany pomiar właściwości fizycznych materiału. Za pomocą tego urządzenia wyznaczono parametry magneto-indukcyjne materiału takie jak: przenikalność magnetyczną – część rzeczywistą (μ'), część urojona (μ'') oraz tangens kąta strat ($\tan\delta$).

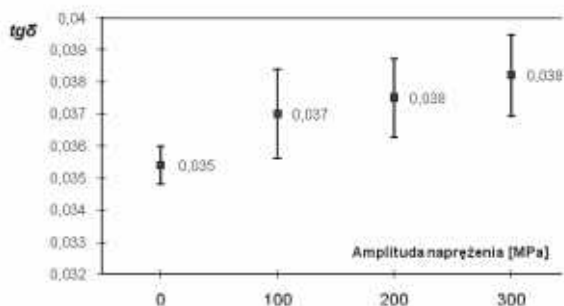


Rys. 10. Miernik własności fizycznych PPMS, wraz z osprzętem

Pomiary wielkości magneto-indukcyjnych prowadzone były w zakresie natężenia pola magnesującego H od 40 A/m do 1100 A/m w przedziale częstotliwości f od 15 Hz do 1030 Hz. Serie wykonanych pomiarów pozwoliły na uzyskanie bardzo dużej ilości danych dla pięćdziesięciu próbek stali P54T stosowanej na obręcze kolejowe. Wyniki przykładowych pomiarów wielkości magneto-indukcyjnych badanej stali zostały przedstawione na rysunkach 11 i 12.



Rys. 11. Zmiany przenikalności magnet. rzeczywistej (μ') i urojonej (μ'') w zależności od amplitudy naprężeń



Rys. 12. Zmiany tangensa kąta strat ($\text{tg}\delta$) w zależności od amplitudy naprężeń

Tangens kąta strat w funkcji amplitudy zadanego obciążenia wykazuje korelację dodatnią z amplitudą naprężenia działającego na próbkę. Wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia wzrasta tangens kąta strat (rys. 12). Różnica wartości średniej tego parametru dla amplitudy naprężenia równej 300 [MPa] a próbką nieobciążoną wyniosła 9,2%.

4. Badania własne

Wykazano, że parametry magneto-indukcyjne tj. tangens kąta strat $\text{tg}\delta$, przenikalność magnetyczna czynna i bierna, zmieniają się w granicach 10%

w zależności od obciążenia zmęczeniowego, co wskazuje na możliwość prowadzenia diagnostyki za pomocą badań magneto-indukcyjnych, nie tylko od pęknięć, ale i od degradacji zmęczeniowej materiału.

Parametrem istotnym z punktu widzenia badań stali stosowanej w transporcie, może być tangens kąta strat, wynika z tego metodyka sposobu pomiaru.

5. Wnioski

Przedstawiona w pracy metoda oceny zmęczeniowej stali wykorzystywanej w kolejnictwie metodą magnetyczną, polegała na laboratoryjnym wyznaczeniu zakresów zmian wybranych parametrów magnetycznych tj. natężenie koercji, przenikalność magnetyczna oraz tangens kąta strat w funkcji amplitudy naprężeń zmęczeniowych w cyklu wahadłowym. Do badań wybrano próbki stali P54T, czyli materiału, który począwszy od struktury wyjściowej do struktury o dużym stopniu zmęczenia charakteryzował się znaczną niejednorodnością: strukturalną, deformacyjną oraz wytrzymałościową.

Metody magneto-indukcyjne stosowane w badaniach nieniszczących polegają na wykrywaniu różnic fizycznych własności materiału badanych elementów za pomocą zmiennego pola magnetycznego. W praktyce postępuje się w ten sposób, że badany element, o określonych wymiarach, wykonany z materiału o danej elektrycznej przewodności właściwej i przenikalności magnetycznej, wprowadza się w zmienne pole magnetyczne cewki (spełniającej funkcję czujnika), zasilanej prądem zmiennym. Pod wpływem tego pola w elemencie indukują się prądy wirowe, które z kolei wytwarzają własne pole, skierowane zgodnie z regułą Lenza, przeciwnie do pola cewki. W rezultacie wokół cewki powstaje pole wypadkowe różne od pierwotnego. Zmiana, jakiej doznaje pole cewki wskutek wprowadzenia metalowego elementu, zależy od elektrycznych i magnetycznych własności materiału tego elementu w tym jego stanu eksploatacyjnego.

Zastosowanie w diagnostyce zmęczeniowej metod magnetycznych i magneto-indukcyjnych wzbogaca defektoskopię pęknięć o metodę wykrywania zmian zmęczeniowych w materiale, co pośrednio może poprawić bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Badania magnetyczne i magneto-indukcyjne są metodą tanią i skuteczną.

LITERATURA

- [1] Adamski M., Golasz J., Kalisiewicz J.: *Wnioskowanie o przyczynach wczesnych pęknięć kół kolejowych na podstawie pomiarów naprężeń własnych*, 22 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 1993.
- [2] Cegielnny E., Karwała K., Tułeczki A.: *Rola badań nieniszczących w zapewnieniu odpowiedniej jakości technologicznej zestawów kołowych pojazdów szynowych*. Problemy eksploatacji, Warszawa, Biuro Gamma, nr 2, 2002.
- [3] Chmiel E.: *Metody i kryteria diagnostyki szyn, obręczy i kół monoblokowych*, Spala, 1987.
- [4] Diener M.: *Towards better Rail Wheel Materiale*, ETH Zurich 2007.
- [5] Dietrich L., Socha G.: *Development of damage due to cyclic loading at different states of stress*. 22-nd Danubia Adria Symposium on Experimental Methods and Solid Mechanics, Monticelli Terme – Parma, Italy, September 28 – October 1, 2005.
- [6] ERADIS – Kolejowa Baza Danych Europejskiej Agencji Interoperacyjności i Bezpieczeństwa, 2011.
- [7] Heptner H., Strope H.: *Magnetyczne i indukcyjne badania metali*. Wydawnictwo Śląsk, 1972.
- [8] Rasek J., Stokłosa Z.: *Badania właściwości materiałów metodami magnetycznymi. Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji*, Seminarium Szkoleniowe, IPPT PAN, Zakopane, 15–17 grudnia 2004.
- [9] Żurek Z.H., Szudyga M.: *Magnetometric diagnostics of constructional steels*, Electrical Review, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2009.