

Zbigniew Hilary Żurek, Henryk Madej
Politechnika Śląska, Katowice

PARAMETRYCZNO-MAGNETYCZNA PROCEDURA DLA WCZESNEJ DIAGNOSTYKI WYEKSPLOATOWANIA ELEMENTÓW ZE STALI KONSTRUKCYJNYCH STOSOWANYCH W INSTALACJACH ENERGETYCZNYCH I W TRANSPORCIE

DIAGNOSTICS OF STRUCTURAL STEEL MEMBERS USED IN POWER SYSTEMS

Abstract: Diagnostics methods based on continuous analysis of energy transformation residual processes (mostly vibroacoustical methods) make it possible to detect pre-failure conditions. This is also true in case of other methods based on load counting, but these methods are costly and not widely used. Modern flaw detection methods are precise when it comes to crack detection, but they may hardly be applied to wear processes because of the low sensitivity. Operational diagnostics of constructional steel elements (such steel is either ferromagnetic or paramagnetic) may be run by assessing physical parameters change (magnetic parameters in particular). The paper presents one possible method of diagnosing wear processes with the help of magnetic methods; specific examples of testing steel elements used in power systems, transport and chemical industry are given. The results give an overview of material reaction to operational loads due to pressure, temperature, periodicity of mechanical loads, plastic strain arising from plastic periodicity and ratcheting effect. Correlation of material magnetic properties with load shows great potential of proposed magnetic diagnostics methods.

1. Pomiary parametrów fizycznych

Właściwości fizyczne materiałów ferromagnetycznych przemawiają za stosowaniem metod magnetycznych lub magneto-indukcyjnych w badaniach diagnostycznych. Potwierdzają to ogólne znane związki parametrów magnetycznych (efekty sprężysto - magnetyczne - Villariego, efekty plastyczno magnetyczne w stalach ferromagnetycznych (węglowych [1]) i parametrów elektryczne (PHYBAL, **Physically Based Lifetime Calculation**) z obciążeniami zmęczeniowymi materiału [2]. Zakres zmienności parametrów magnetycznych w procesie eksploatacji, szczególnie dla każdego materiału, decyduje o możliwości stosowania metody diagnostycznej. Zmienność parametrów magnetycznych jest ściśle powiązana z materiałem, jego składem chemicznym i charakterem obciążeń eksploatacyjnych. Wpływ charakteru obciążeń eksploatacyjnych na trend zmian podstawowych parametrów magnetycznych materiału jest zróżnicowany i w znacznej mierze poznany. W tabeli 1 podano ogólne związki parametrów magnetycznych ze stanem materiału.

Charakter obciążenia materiału wpływa na ilościowy i jakościowy obraz zmian

parametrów magnetycznych. Zakresy zmienności parametrów magnetycznych materiału ferromagnetycznego decydują o wyborze techniki pomiarowej dla badania diagnostycznego.

Zestawienia pokazane w tabeli 1 wykazuje zasadność korelowania zmian parametrów magnetycznych, jak natężenia koercji i przenikalności magnetycznej statycznej lub dynamicznej dla celów diagnostycznych. Badanie materiału w zakresach przenikalności początkowej czy remanencji magnetycznej jest utrudnione lub niemożliwe. Szukanie związków diagnostycznych w zakresie magnetyzacji nasycenia jest w wielu przypadkach niemożliwe.

2. Ferromagnetyczne stale wysoko stopowe stosowane w energetyce

Natężenie koercji H_c jest jednym z podstawowych parametrów umożliwiających ocenę procesów zmęczeniowych w elemencie wykonanym z materiału ferromagnetycznego. Najczęściej parametr ten wzrasta (tabela 1) z powodu degradacji struktury krystalicznej jak i domenowej. Odmienne reagują stale narażone na wysokie temperatury i naprężenia – na przykład stosowane w energetyce. Wysokie temperatury pracy powodują w pierwszym

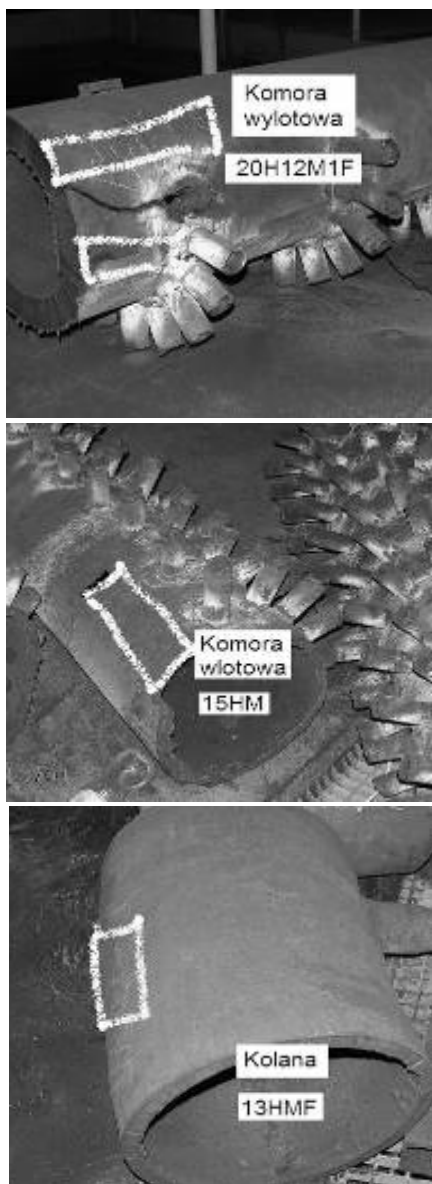
rzędzie zanik naprężeń wewnętrznych powstałych w procesie produkcji następnie wpływają na strukturę. Poziomy natężenia koercji tych materiałów ulegają obniżeniu w trakcie eksploatacji. Miary natężenia koercji są skutecznym wyznacznikiem czasu oddziaływania obciążeń. W niewielu przypadkach możliwe jest porównanie parametrów początkowych (wejściowych) materiału, z materiałem eksploatowanym w okresie kilku, lub kilkunastu lat. Na fotografiach zamieszczonych na rysunku 1 pokazano elementy instalacji wycofanej z eksploatacji po 159 200 godzinach pracy, w procesie rewitalizacji kotła K-3, w 2007 roku w Elektrowni Bełchatów. Fotografie

ilustrują kolejno: fragmenty komory wlotowej przegrzewacza II stopnia pary wtórnie przegrzanej (M-2), komory wylotowej pary świeżej z III st. przegrzewacza pary świeżej, kolana rurociągu pary wtórnie przegrzanej (RB) [4, 6]. Podobnie utrudnione jest badanie zmian materiału w przedziałach czasowych eksploatacji. Jediną możliwością stwarzającą ewentualne awarie. Przeprowadzono badania zmian natężenia koercji H_c . Wyniki podane na rysunku 2 wskazują na istotność związku zmian natężenia koercji z wyeksploatowaniem. Możliwości takiej nie daje większość metod defektoskopowych.

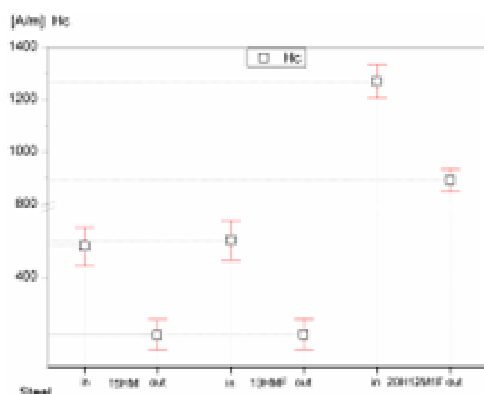
Tabela. 1. Charakterystyka czułości parametrów magnetycznych

Czynniki wpływające na zmienność parametrów magnetycznych					
Charakterystyka czynnika	Parametry charakterystyczne				
	μ_p	μ_{max}	J_s	B_r	H_c
Skład chemiczny	↕	↕	↕	↕	↕
Zanieczyszczenia	↓	↓	—	↕	↑
Odkształcenia sprężyste $\lambda > 0$	↓	↑	—	↑	↓
Odkształcenia sprężyste $\lambda < 0$	↓	↓	—	↓	↑
Odkształcenia plastyczne $\lambda > 0$	↓	↓	—	↓	↑
Odkształcenia plastyczne $\lambda < 0$	↓	↑	—	↑	↑
Anizotropia kryształów	↕	↑	—	↑	↓
Pęzanie wysokotemperaturowe	↑	↑	—	↓	↓
Częstotliwość	↓	↓	↓	↑	↑
Podmagnesowanie	↓	↓	—	↓	↓
Temperatura	↕	↕	↓	↓	↓

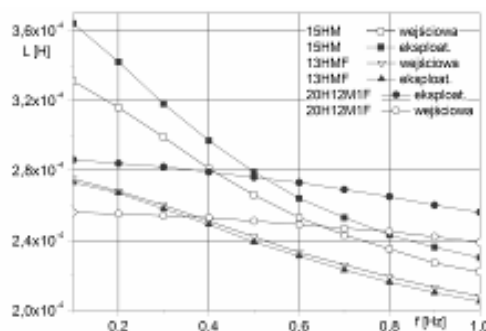
Objaśnienia oznaczeń:
 — bez wpływu, ↕ wzrost lub spadek, ↑ wzrost, ↓ spadek



Rys. 1. Elementy badanych instalacji



Rys.2. Porównanie pomiarów natężenia koercji



Rys.3. Przebieg indukcji w funkcji częstotliwości

Wpływ procesów zmęczeniowych jest widoczny w zmianach indukcyjności (rys. 3) badanych gatunków stali. Przeprowadzone pomiary w zakresie niskich częstotliwości wskazują na odmienny charakter wpływu procesów zmęczeniowych na badany materiał. Zmiany przenikalności magnetycznej materiału są istotne w zakresie w składowej biernej i tangensa kąta strat.

Badania struktury prowadzono na mikroskopie skaningowym Hitachi S-4200 sprzężonym z systemem EDS do mikroanalizy rentgenowskiej. Obserwacje wizualne przy powiększeniach 200, 500, 1000 i 2000 x prowadzono na całej powierzchni zglądu każdej z próbek.

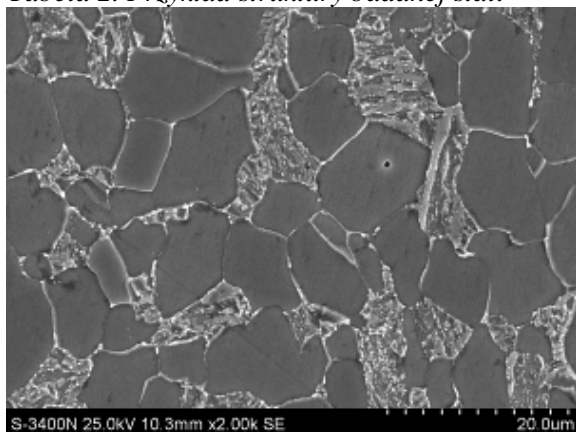
Charakterystyczne elementy struktury ujawnionych zmian dla każdej z próbek podano w tabeli 2. Przeprowadzone badania wykazały następujące zmiany struktur:

- stal 13HMF (feryt + perlit) → (feryt z wydzieleniami węglików),
- stal 15HM (feryt + perlit) → (feryt + perlit), w stanie wyjściowym - po zmęczeniu mechanicznym widoczne pustki zmęczeniowe,
- stal X20 (martenzyt) → (martenzyt z wydzieleniami węglików).

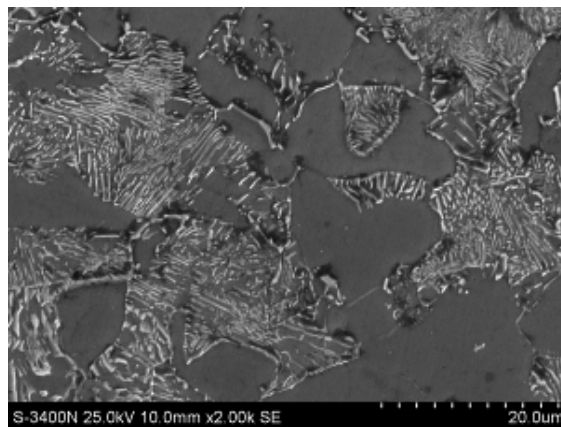
Badania materiału przed i po okresie eksploatacji nie dały podstaw do wyjaśnienia charakteru ilościowego i jakościowego zmian indukcyjności materiału.

Zróżnicowane zmiany struktur badanych materiałów wynikały z zakresów eksploatacyjnych temperatur i ciśnień roboczych. Zmiany parametrów magnetycznych są zależne od wielu czynników, wśród których najważniejsze to pełzanie wysokotemperaturowe i związane z tym zmiany struktury i jej układu. Nie badano odkształceń ziaren struktury.

Tabela 2. Przykład struktury badanej stali



Stal 15HM - stan wejściowy



Stal 15HM - stan wyjściowy

3. Ferromagnetyczne stale węglowe stosowane w transporcie

Przygotowanie próbek, wyznaczanie krzywych Wöhlera oraz skalowanie zmęczeniowe prowadzono w Zakładzie Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN [3]. Próbkę klepsydryczną wykonano z cylindrycznych prętów o średnicy 9 mm wyciętych na elektrodrażarce drutowej z wycinków obrotowej i koła monoblokowego pokazanego na rys. 4.



Rys.4. Wycinki koła monoblokowego

Próbki klepsydryczne wykonano ze stali konstrukcyjnej węglowej P54T (wg PN-84/H-84027/06), B2 (wg UIC 810-1) na obrotowe i stali stal ER7 (wg EN 13262:2004) na koła monoblokowe. $R_e = 400$ MPa, $R_m = 750 \div 880$ MPa, $A_5 = 15\%$ i twardości HB = 221. Skład chemiczny stali P54T oraz ER7 podano w tabelach 3 oraz 4.

Znajomość ograniczonej i trwałej wytrzymałości zmęczeniowej wyznaczonej na podstawie standardowej procedury Wöhlera nie daje żadnych podstaw do oceny ewolucji procesu rozwoju uszkodzeń pod wpływem obciążeń cyklicznych.

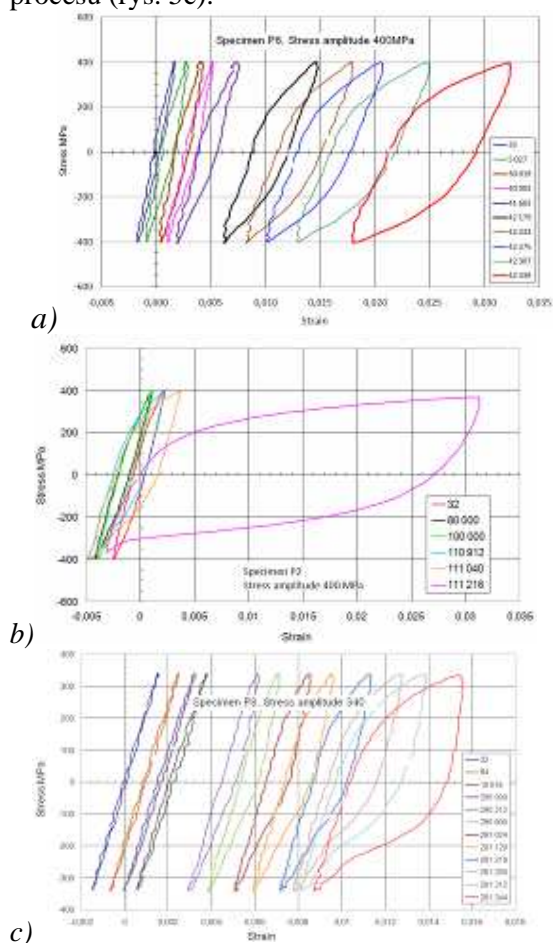
Monitorowanie zmian właściwości mechanicznych zachodzących pod wpływem obciążeń cyklicznych wymaga rejestracji naprężeń i odkształceń części pomiarowej próbki w kolejnych cyklach obciążenia.

Teoretyczne zachowanie metali w zakresie zmęczenia można podzielić na dwa zasadnicze typy pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń opisanych cykliczną plastycznością generowaną mikropoślizgami poprzedzającymi powstanie pasm poślizgów oraz opisanych przez ratcheting generowany lokalnymi odkształceniami wokół pustek, wtrąceń niemetalicznych i innych wad struktury.

Tabela 3-4. Skład chemiczny stali P54T i ER7

Stal P54T	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
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
Stal ER7	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Norma	0,52	0,8	0,4	0,02	0,015	0,3	0,3	0,3	0,05	0,06

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano trzy grupy reakcji materiału. W pierwszej podgrupie zaobserwowano przewagę mechanizmów ratchetingu nad mechanizmami cyklicznej plastyczności (rys. 5a). W drugiej podgrupie próbek zaobserwowano jednoczesny rozwój mechanizmów cyklicznej plastyczności i ratchetingu (rys. 5b). W trzeciej podgrupie zaobserwowano silny rozwój mechanizmów ratchetingu na początku procesu rozwoju uszkodzeń, z późniejszym zatrzymaniem mechanizmów uruchomionych na początku procesu (rys. 5c).

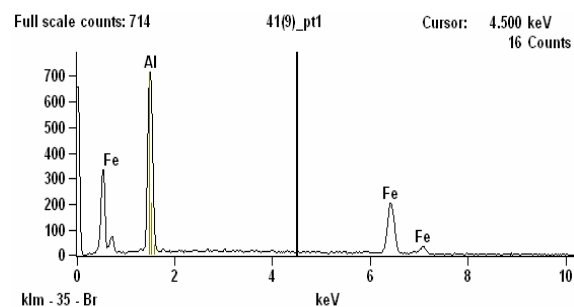
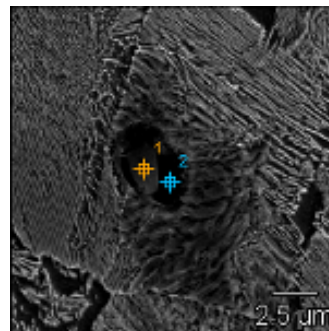


Rys. 5. Przykładowe przebiegi odkształceń próbek w funkcji liczby cykli

Zróznicowanie reakcji materiału wynikało z rozłożenia defektów i wad w strukturze materiału i utrudniło założony proces skalowania zmęczenia (korelowania) zmian parametrów magnetycznych z liczbą cykli oraz zakresami obciążeń mechanicznych i strukturą [7].

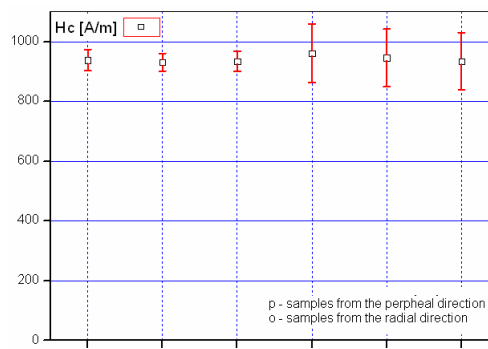
Próbki stali w stanie wyjściowym, (nie obciążane zmęczeniowo) wykazują strukturę

ferrytyczno-perlityczną. Ferryt występuje na granicach pierwotnych ziaren austenitu. Ujawniono ponadto w badanej strukturze wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenki aluminium Al_2O_3 i siarczki manganu MnS (Rys. 6). Analizę składu chemicznego ujawnionych wtrąceń przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej przedstawiono poniżej.



Rys. 6. Przykładowa struktura, defekt oraz spektrogram punktu 1

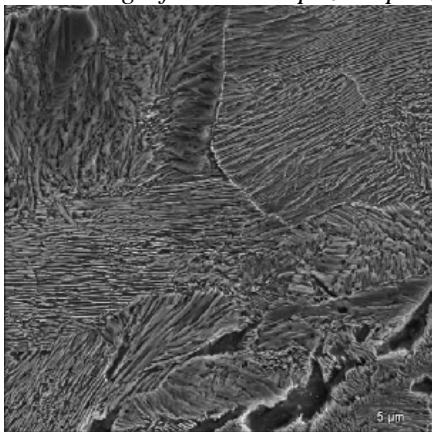
Zaobserwowane defekty i wtrącenia niemetaliczne były odpowiedzialne za wytrzymałość zmęczeniową badanych próbek i wpływały na zróżnicowany charakter zmian odkształceń w funkcji cykli obciążenia. Badano również wpływ procesu technologicznego (walcowanie, kucie) na parametry magnetyczne. Wykazano przy zbliżonym poziomie wartości średniej zwiększone wartości odchylenia standardowego dla próbek wycinanych w kierunku obwodowym (rys. 7).



Rys. 7. Wartości średnie oraz odchylenia standardowe serii próbek

Ze względu na istotny związek jednorodności stali i jej czystości na wytrzymałość zmęczeniową ograniczono w serii próbek wzorcowanych zakresy naprężeń maksymalnych do podzakresów 300 MPa, 200 MPa, i 100 MPa. Parametry magnetyczne materiału odniesiono do próbek nieobciążonych w danej serii. Struktury stali w stanie wyjściowym i po wprowadzeniu obciążeń zmęczeniowych podano w tabeli 5. Fotografie

Tabela 5-6. Fotografie struktur przed i po zadaniu obciążeń zmęczeniowych



Płytkowa budowa perlitu, stan wyjściowy, 3 mm od środka próbki, mikroskop skaningowy, pow. 1800x.

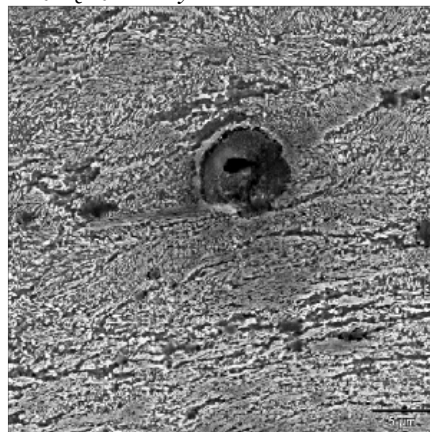
Badania parametryczne

Skuteczność badań defektoskopowych w obszarze detekcji stref zmęczenia mechanicznego jest ograniczona w zakresie metod jak i czułości detekcji. Jedną z możliwości przewidywania czasu eksploatacji jest badanie parametrów fizycznych w funkcji obciążeń zmęczeniowych. Przeprowadzono badania parametrów magnetycznych stali niskowęglowej w funkcji obciążeń zmęczeniowych. Zmiany zachodzące w stalach wysokostopowych w zakresie głównych parametrów magnetycznych (H_c , μ_r) sięgają poziomu 30-50% natomiast w stalach węglowych są niższe i sięgają wartości z przedziału od 10 do 15%.

Jeden z wykresów zamieszczony na rysunku 8 przedstawia zmiany tangensa kąta stratności dla jednej z kombinacji parametrów pomiaru t.j. przy częstotliwości pola magnetycznego 1060 Hz i natężeniu 800 A/m. Jest to wynik jeden z wielu kombinacji analizowanych parametrów pomiaru. Zmiany wskazują na związki zmienności parametrów magnetycznych z obciążeniami zmęczeniowymi i na możliwość zastosowania metody dla celów diagnostyki technicznej.

dotyczą części środkowej przewężenia próbki klepsydrycznej.

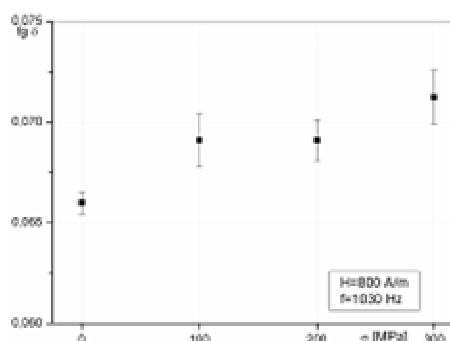
Procesy hartowania próbki oraz obciążenia zmęczeniowe w warstwie powierzchniowej zmieniają strukturę materiału jak pokazano w tabeli 6. Wpływ obciążeń zmęczeniowych przejawia się rozdrobnieniem i deformacją struktury, natomiast wpływ temperatury prowadzi do wymiany gazowej i zmian struktury.



Silne zdefektowanie w warstwie przypowierzchniowej

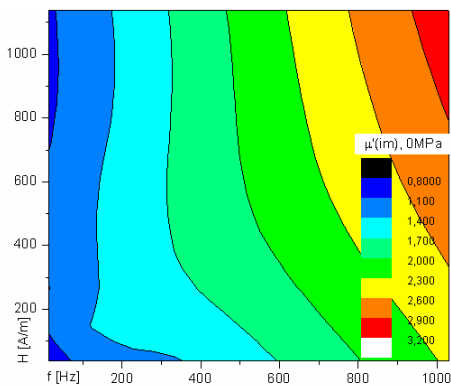
W wyniku wpływu obciążeń zmęczeniowych zanotowano istotne zmiany przenikalności magnetycznej biernej oraz stratności.

Większość stali konstrukcyjnych reaguje na procesy mechaniczne mierzalnymi istotnymi zmianami parametrów magnetycznych. Każda stal przejawia określoną charakterystyczną zależność związków magnetomechanicznych.



Rys. 8. Przykładowy przebiegi zmienności tangensa kąta stratności

Badania prowadzono w zakresie częstotliwości 1100 Hz i natężenia pola magnesuującego 1200 A/m. Przykładowe mapy przebiegu zmienności parametrów magnetycznych dla materiału wyjściowego pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Przykładowa mapa zmian parametrów magnetycznych w funkcji natężenia pola magnetycznego i częstotliwości

Stale opisane w artykule są ferromagnetykami i ich właściwości magnetyczne charakteryzuje pętla histerezy. Stal jest także przewodnikiem prądu elektrycznego. Efekty zmęczeniowe są spowodowane nano- i mikro- pęknięciami struktury wewnętrznej materiału, a te wpływają na charakterystykę magnesowania i zmniejszają przewodność elektryczną. Zatem poprzez badania pętli histerezy można oceniać stopień zmęczenia materiału. Parametry magnetyczne mogą być także wyznacznikiem stanu stali austenitycznych [5]. Badając pętlę histerezy w wolnozmiennym polu magnetycznym (kilka Hz), uzyskuje się informacje o właściwościach magnetycznych materiału. Zmienne pole magnetyczne indukują w badanym materiale prądy wirowe, które generują straty mocy, co ujawnia się w szerokości pętli histerezy. Prądy wirowe powodują także wypieranie pola magnetycznego na zewnątrz badanej próbki. Przeprowadzając badania próbek przy różnej częstotliwości natężenia pola magnetycznego można penetrować nano- i mikro- pęknięcia na różnych warstwach (głębokościach) badanego materiału.

Każda stal ma własną charakterystykę związków elektro- magneto- mechanicznych.

Poznanie charakteru tych związków i ich identyfikacja dla materiału nowego (baza odniesienia), pozwala na stosowanie metod magnetycznych w diagnostyce elementów stalowych i prognozowanie procesu pęknięcia. Przedstawiona metodyka jest nowa, rozwijająca się i należy do kręgu aktualnych światowych zagadnień badawczych. Jest jedną z przyszłościowych metod diagnostyki stopnia zmęczenia materiałów maszyn i urządzeń.

Wskazanie zmian w jednorodności strukturalnej przy znajomości historii eksploatacji i procesów obciążeń w poddanym badaniu elemencie umożliwia wykrywanie uprzedzające powstawanie mikropęknięć.

Literatura

- [1] Żurek Z.H.: *Magnetic monitoring of fatigue process of the rim material of railway wheel sets*, NDT&E International, 39 (2006), pp. 675-679.
- [2] P. Starke, F. Walther, D. Eifler: *PHYBAL - A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements*. International Journal of Fatigue 28 (9) (2006) 1028-1036
- [3] Żurek Z. H., Szudyga M.: *Magnetometric diagnostics of constructional steels*, Electrical Review, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2009, pp.118-122.
- [4] Żurek Z. H., Janeczek T., Maciejewski J.: *Steel Magnetic Parameters as Material Fatigue Diagnostics Criterion*. NDT.net, Issue 2009-03, pp. 251-257
- [5] Żurek Z. H., Czastkiewicz Z.: *Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych*. PAK, 4/2009, 229-232.
- [6] Żurek Z. H., Janeczek T., Maciejewski J., *Parametry magnetyczne stali, jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej*, PAK, 9/2008, 670-673.
- [7] 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)

Artykuł powstał w ramach grantu finansowanego przez MNiSzW nr N N510 238538

Autorzy

Zbigniew H. Żurek, dr hab. inż. prof nzw. Politechniki Śląskiej. Wydział Transportu.
e-mail: Zbigniew.zurek@polsl.pl

Henryk Madej, dr hab. inż. prof nzw. Politechniki Śląskiej. Wydział Transportu.
e-mail: Henryk.madej@polsl.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka