

## Zbigniew Hilary ŻUREK<sup>1</sup>, Tomasz JANECZEK<sup>1</sup>, Jacek MACIEJEWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ TRANSPORTU

<sup>2</sup> BOT BEŁCHATÓW

### Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej

Dr hab. inż. Zbigniew Hilary ŻUREK

Absolwent Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej w roku 1975. Pracownik Politechniki Śląskiej od 1976 roku. Doktorat na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej uzyskał w roku 1988. Tytuł doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie elektrotechniki otrzymał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 2006 roku. Obecnie zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego Politechniki Śląskiej na Wydziale Transportu.



e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl

Mgr inż. Tomasz JANECZEK

Absolwent Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej w roku 2000. Odbił studia podyplomowe na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w zakresie: Sieci Komputerowe, Systemy Mikrokomputerowe i Bazy Danych. W latach 2000-2006 pracował na stanowisku asystenta w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej, gdzie otworzył przewód doktorski. Obecnie pracownik CZH S.A w Katowicach.



e-mail: tomasz.janeczek@polsl.pl

Mgr inż. Jacek MACIEJEWSKI

Absolwent Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie w roku 1977. Po studiach podjął pracę w Elektrowni „Polaniec” na Wydziale Remontu Kotłów, gdzie pracował do 1984 roku. Obecnie zatrudniony jest w BOT Elektrownia Bełchatów S.A. na stanowisku Kierownika Wydziału Nadzoru Urządzeń Kotłowych.



e-mail: jacek.maciejewski@elb.bot.pl

#### Streszczenie

Ograniczone zastosowania defektoskopii w zakresie prognozy eksploatacyjnej inicjują rozwój diagnostyki procesów zmęczeniowych. Diagnostyka procesów zmęczeniowych wskazuje z wyprzedzeniem na miejsca potencjalnie zagrożone awarią (kumulacja mikropęknięć). Diagnostyka prowadzona jest na podstawie analizy przebiegu parametrów fizycznych szczególnie elektrycznych i magnetycznych materiału, podczas eksploatacji. Musi być poprzedzona niezależnymi badaniami wstępnymi dla każdego materiału. Wskazanie wrażliwych parametrów diagnostycznych materiału oraz poznanie ilościowych związków przyczynowo skutkowych, ułatwia dobór metod badawczych, co przedstawiono na przykładzie stali stosowanych w energetyce.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka magnetyczna, zmęczenie materiału.

#### Steel magnetic parameters as material fatigue diagnostics criterion

##### Abstract

Flaw detection procedures have their limitations when it comes to operational forecast and this induces development of fatigue processes diagnostics. Diagnostics of fatigue processes may point to potentially hazardous places (areas with accumulating microcracks). This diagnostics is conducted by analysing physical parameters courses (electrical and magnetic parameters in particular) during operation. Initial and independent testing must be run at the start of diagnosis. Selection of testing procedures is made easy, if material's sensitive diagnostic parameters are known together with quantitative relations between cause and effect. This paper presents this selection on the basis of power engineering steels example.

**Keywords:** material magnetic diagnostics, material fatigue.

#### 1. Wstęp

Właściwości fizyczne materiałów ferromagnetycznych przemawiają za stosowaniem metod magnetycznych lub magnetoindukcyjnych w badaniach diagnostycznych. Potwierdzają to ogólne znane związki parametrów magnetycznych (efekt Villario, zmęczenie mechaniczne materiału [1]) i elektrycznych (PHYBAL,

Physically Based Lifetime calculation [2]) z obciążeniami zmęczeniowymi materiału. Zakres zmienności parametrów magnetycznych w procesie eksploatacji, charakterystyczny dla każdego materiału, decyduje o możliwości stosowania metody diagnostycznej. Zmienność parametrów magnetycznych jest ściśle powiązana z materiałem, jego składem chemicznym i charakterem obciążeń eksploatacyjnych. Jeden ze sposobów badania eksploatacyjnej zmienności parametrów magnetycznych opisany zostanie dla stali stosowanych w energetyce. Wpływ charakteru obciążeń eksploatacyjnych na parametry magnetyczne materiału jest zróżnicowany. W tabeli 1 podano ogólne związki parametrów magnetycznych ze stanem zmęczeniowym od obciążeń eksploatacyjnych.

Tabela 1. Parametry materiału w funkcji charakteru obciążeń  
Table 1. Material parameters vs. load character

Rodzaj obciążeń	Parametr			
	Przenikalność magnetyczna $\mu$		Natężenie koercji $H_c$	
	Trend	Wrażliwość parametru	Trend	Wrażliwość parametru
Mechaniczne cyklicznie zmienne stale sprężyste	↓	**	↑	**
Mechaniczne cyklicznie zmienne stale kruche	↓	*	↑	*
Mechaniczne kontaktowe lub toczne [3, 4, 5]	↓	***	↑	***
Mechaniczne wysoko temperaturowe	↑, ↓	*, **	↓, ↑	**

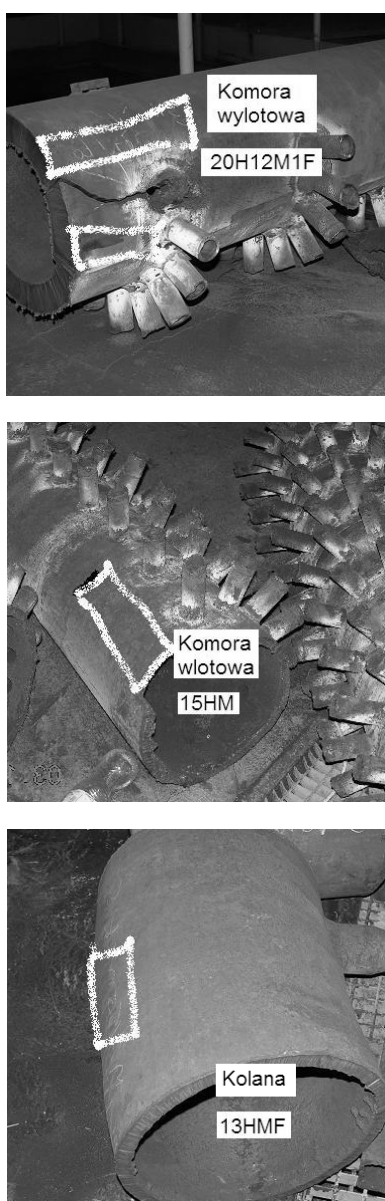
Poziom wrażliwości parametru: \* - niski, \*\* - średni, \*\*\* - wysoki

Charakter obciążenia materiału wpływa na ilościowy i jakościowy obraz zmian parametrów magnetycznych. Zakresy zmienności parametrów magnetycznych materiału ferromagnetycznego decydują o wyborze techniki pomiarowej dla przyszłego badania diagnostycznego.

#### 2. Pomiary natężenie koercji

Natężenie koercji jest jednym z podstawowych czynników, który umożliwia ocenę procesów zmęczeniowych w elemencie wykonanym z materiału ferromagnetycznego. Najczęściej parametru ten wzrasta z powodu degradacji struktury krystalicznej jak

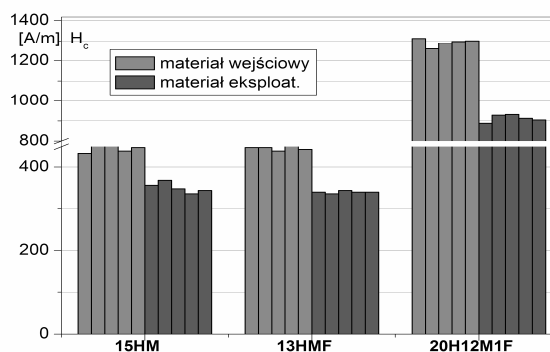
i domenowej. Odmienne reagują stale narażone na wysokie temperatury i ciśnienia – na przykład stosowane w energetyce. Wysokie temperatury pracy powodują w pierwszym rzędzie zanik naprężeń wewnętrznych powstałych w procesie produkcji. Poziomy natężenia koercji tych materiałów ulegają obniżeniu w trakcie eksploatacji. Miary natężenia koercji są skutecznym wskaźnikiem 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 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). Kolano instalacji pokazane na rysunku 1 jest ważnym elementem instalacji z punktu widzenia badań. W elemencie tym mogło dochodzić do dodatkowych koncentracji naprężeń mechanicznych, szczególnie po powierzchniach zewnętrznych łuków.



Rys. 1. Fragmenty instalacji energetycznych z zaznaczonymi miejscami pobrania materiału do próbek

Fig. 1. Fragments of power engineering installations; material sample locations are marked

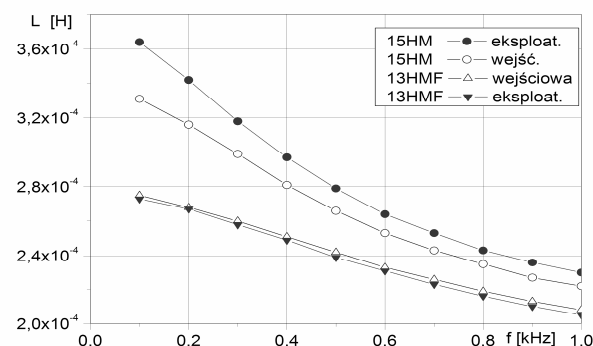
Badania zmienności parametrów magnetycznych stali energetycznych w procesie eksploatacji stały się możliwe dzięki współpracy ze służbami nadzoru technicznego Elektrowni Bełchatów. Przebadano materiały wejściowe zgromadzone w magazynach z materiałami instalacji eksploatowanych, wykonanymi ze stali: 13HMF, 15HM oraz 20HM12M1F. Pierwsze porównania (rys. 2) dotyczyły zmian natężenia koercji. Zmiany parametru  $H_c$  związane z eksploatacją są na tyle znaczące, że umożliwiają wstępną klasyfikację stanu materiału, co nie jest możliwe dla większości metod defektoskopowych.



Rys. 2. Porównanie wyników pomiarów natężenia koercji  
Fig. 2. Comparison of coercion measurements results

### 3. Przenikalność magnetyczna

Kolejne pomiary dotyczyły wyznaczenia zmian dynamicznych przenikalności magnetycznej materiału. Diagnostyczne punktowe badanie materiału na obiekcie możliwe jest przy zastosowaniu pola magnesującego o niskich wartościach. Pomiar przenikalności magnetycznej przy zastosowaniu metody indukcyjnej przeprowadzono w polu o wartości nie przekraczającej 100 A/m. Porównanie zmian indukcyjności cewki pomiarowej, w funkcji częstotliwości i gatunku badanego materiału przedstawiono na rysunku 3.

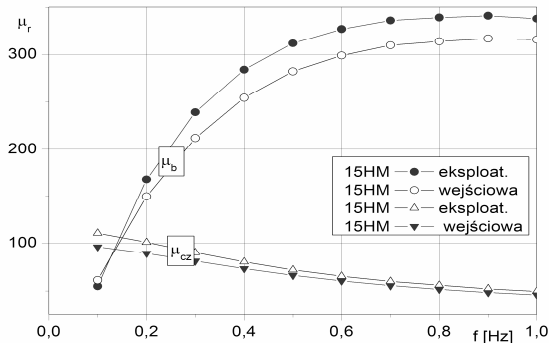


Rys. 3. Przebiegi zmian indukcyjności układu pomiarowego w funkcji gatunku materiału i częstotliwości

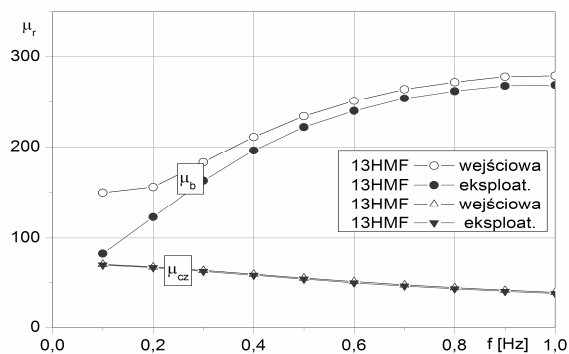
Fig. 3. Inductance of measurement circuit vs. material type and frequency

Znaczące zmiany parametru indukcyjności związanej z eksploatacją zaobserwowano dla stali 15HM. W stali 13HMF nie wykryto tak wysokich różnic. Przyczyną nieznacznych zmian indukcyjności mogą być różnice w parametrach pracy, charakterze obciążeń elementu, składzie chemicznym. Z pomierzonych parametrów indukcyjności na stanowisku laboratoryjnym wyprowadzono kolejno: przenikalność magnetyczną czynną, bierną i tangens kąta strat. Parametry te rozpatrywane łącznie, w sposób bardziej szczegółowy charakteryzują zmiany eksploatacyjne materiału. Na reali-

zowanym etapie badań nie analizowano poszczególnych składników  $\text{tg}\delta$ . Przebiegi dynamicznej przenikalności magnetycznej dla stali 15HM i 13 HMF zamieszczono na rysunkach 4 i 5.



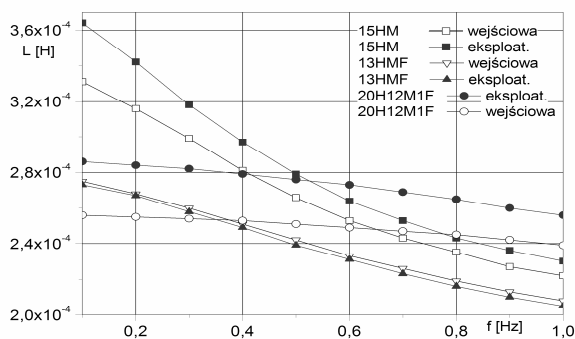
Rys. 4. Przebiegi przenikalności czynnej i biernej dla stali 15HM  
Fig. 4. Active and passive permeability of 15 HM steel



Rys. 5. Przebiegi zmian przenikalności czynnej i biernej dla stali 13HMF  
Fig. 5. Active and passive permeability of 13HMF steel

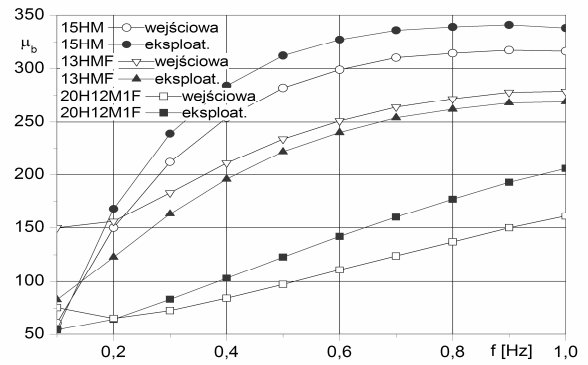
Na rysunku 6 pokazano zestawienie zmian indukcyjności dla trzech badanych gatunków stali.

Przyczyny braku reakcji stali 13HMF na procesy zmęczenia procesu eksploatacyjnego nie zostały wyjaśnione na wstępnym etapie przeprowadzonych badań.



Rys. 6. Zestawienie zmian indukcyjności w funkcji częstotliwości  
Fig. 6. Inductance variability vs. frequency

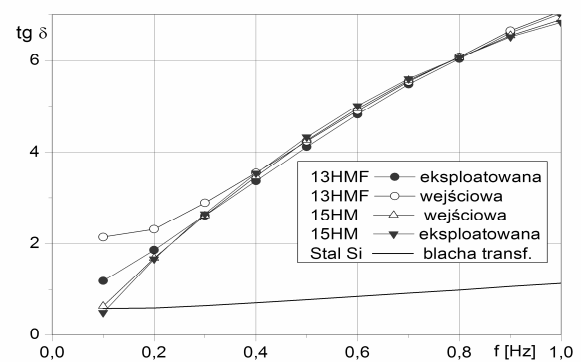
Przewiduje się badania próbek wyżej wymienionej stali pobranych z różnych miejsc instalacji. Dla badanych stali zaobserwowano zmiany wartości przenikalności biernej (rys. 7).



Rys. 7. Zestawienie zmian przenikalności biernej w funkcji częstotliwości  
Fig. 7. Passive permeability variability vs. frequency

#### 4. Tangens kąta strat

Przenikalność bierna decyduje o wartości stratności magnetycznej materiału. Stratność materiału jest związana z procesem eksploatacji. Obserwacja zmian stratności w zakresie niskich częstotliwości może być pomocna w rozróżnianiu materiału eksploatawanego od wejściowego. Współczynnik  $\text{tg}\delta$  stali konstrukcyjnych ma wysokie wartości. Parametry magnetyczne tej stali znacznie odbiegają od parametrów stali stosowanych w elektrotechnice, co pokazano na podstawie zachowania się stali krzemowej.

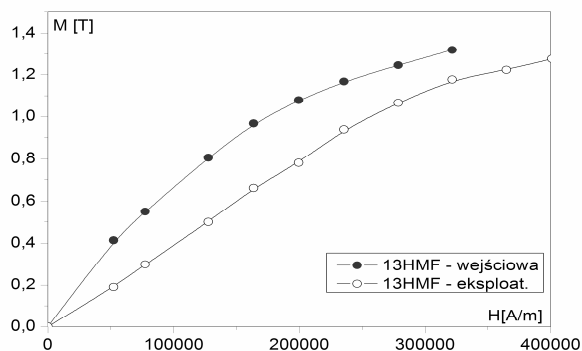


Rys. 8. Porównanie stratności badanych stali konstrukcyjnych  
Fig. 8. Comparison of specific losses of different constructional steels

W celu dokładnego opisu zróżnicowania parametrów magnetycznych stali konstrukcyjnych podano (rys. 8) dodatkowo przebiegi tangensa kąta strat stali elektrotechnicznej.

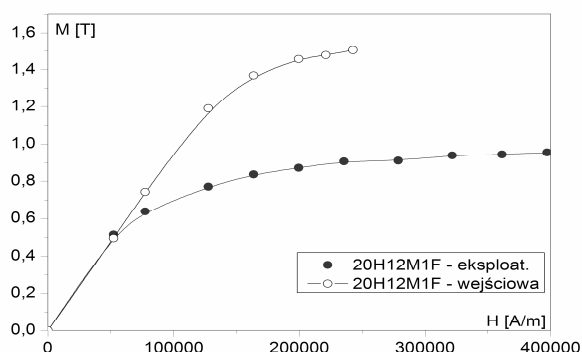
#### 5. Pomiary namagnesowania

Jednym ze sposobów wyznaczenia krzywej pierwszego namagnesowania a także poziomu nasycenia magnetycznego materiału jest pomiar pośredni, za pomocą wagi magnetycznej. Jest to pomiar niszczący. Pomiar ten wymaga pobrania próbki materiału o masie ok. 1 mg. Za wyborem pomiaru wagą magnetyczną przemawia to, że większość instytutów badawczych posiada aparaturę do pomiaru stali elektrotechnicznej, dla których poziomy pół magnetycznych potrzebnych do ich nasycenia są znacznie niższe. Krzywe namagnesowania uzyskane za pomocą wagi magnetycznej (po przeliczeniu i przeskalowaniu za pomocą pomiaru wzorca niklu), zamieszczono na rysunku 9 i 10.



Rys. 9. Krzywe pierwotnego magnesowania stali 13HMF  
Fig. 9. Primary magnetization curve of 13 HMF steel

Podobnie jak w pomiarach indukcyjności, stal 13HMF charakteryzuje zbliżony poziom nasycenia magnetycznego przed i po eksploatacji.



Rys. 10. Krzywe pierwotnego magnesowania stali 20H12M1F  
Fig. 10. Primary magnetization curve of 20H12M1F steel

Dla stali 20H12M1F wykazano znaczny wpływ eksploatacji na zmianę poziomu nasycenia magnetycznego.

## 6. Podsumowanie

Poziomy parametrów magnetycznych materiału przed i po czasie eksploatacji różnią się istotnie za wyjątkiem przenikalności magnetycznej stali 13HM (przedmiot dalszych badań). Wyniki przemawiają za zasadnością zastosowania metod magnetycznych i magneto indukcyjnych w diagnostyce instalacji energetycznych w zakresie niskich częstotliwości oraz niskich wartości pól magnetycznych. Eksploatacyjny przedział zmian parametrów magnetycznych omawianych stali może być kryterium diagnostyki zmęczeniowej. Prowadzone są dalsze badania.

## 7. 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, Rockstroch B\*, Bizoń K.: Supplementary magnetic tests for railway wheelsets wheels, 15 Railway Conges In Prague 2007 (23-27.08.2007)
- [4] Żurek Z. H.: Application of flaw detection methods for detection of fatigue processes in low-alloyed steel, European NDT Days In Prague (03-09.11.2007)
- [5] Żurek ZH, Janeczek T.: Untersuchung des Ermüdungsprozesses in dem band der Bahn-Radsätze, RAD SCHIENE, Dresden, 2008

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Symposium Pomiarów Dynamicznych

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej organizuje w bieżącym roku już szóste z kolei Symposium Pomiarów Dynamicznych. Sympozja odbywają się w cyklu trzyletnim, a tegoroczne zaplanowane jest na 26 – 28 października 2008.

Komitet Naukowy oraz organizatorzy, czyli wymieniony Instytut wraz z Wydawnictwem PAK, zapraszają do czynnego wzięcia udziału w Symposium wszystkie osoby, którym zagadnienia dynamiki w technice pomiarowej nie są obce. Obszar tematyczny miernictwa dynamicznego obejmuje zarówno właściwości dynamiczne czujników i przetworników pomiarowych, w tym również mikroelektronicznych (MEMS) jak i sytuacje pomiarowe, w których zmienność sygnałów warunkuje poprawny dobór układów i algorytmów pomiarowych.

W ramach tegorocznego Symposium planujemy między innymi trzy panele dyskusyjne

- Tworzenie miar dokładnościowych wielkości dynamicznych i jakości dynamicznej narzędzi pomiarowych

- Algorytmy numerycznego odtwarzania mesurandu
- Dynamika przetworników A/C i C/A

do których wprowadzenie wygłoszą wybitni specjaliści z danych dziedzin technik pomiarowych, a dyskusje na naszych sympozjach są zawsze owocne.

**Zgłoszenia uczestników będą również przyjmowane po zakończeniu okresu wakacyjnego !**

Szczegóły na stronie prowadzonej przez Instytut Metrologii Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej:

<http://www.imeia.elekr.polsl.pl/pd>

Zwracamy uwagę na możliwości publikacyjne referatów podane na naszej stronie.