ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: ELEKTRYKA z. 176 Nr kol. 1500

Zbigniew ŻUREK[1)]

# EFEKTY MAGNETYCZNE UŻYTECZNE W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono znane efekty magnetyczne począwszy od efektu Joule'a odkrytego w 1842 roku. Szczególną uwagę poświęcono efektom magnetomechanicznym, a w szczególności efektowi Villariego, przydatnemu w pomiarach naprężeń. Podano podstawowe związki magnetomechaniczne dla ferromagnetyków. Zamieszczono pętle histerezy dla dwóch gatunków drutów ze stali węglowych poddawanych naprężeniom jednoosiowym rozciągającym. Wykazano ścisłą zależność magnetyzacji od stanu naprężenia. W końcowej części opisano próbę zastosowania magneto-rezystancyjnego mostka w wykrywaniu stanu naprężeń wirujących elementów maszyn i wskazano na przydatność tej metody jako uzupełniającej dla pozostałych metod diagnostyki.

# MAGNETIC EFFECTS USEFUL IN TECHNICAL DIAGNOSTIC

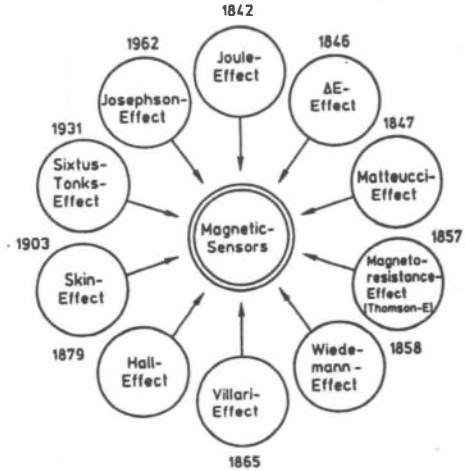
**Summary:** The paper presents known magnetic effects beginning from Joule's effect. Particular attention is focused on Villari's magnetic effect, which can be utilized in stress measurements. Basic magnetomechanic formulas and property descriptions are analysed. Hysteresis loops for two types of carbonic steel wires under unaxial tensile stress are shown. A precise relation between the magnetisation state and mechanical stress is noted. The concluding part of the paper presents a practical application of a magneto-resistive bridge to reveal internal stresses and to evaluate the values of tension and amplitude of vibrations of rotating machine parts. It is proved that measuring magnetic flux changes can be applied as supplementary means of diagnosing machine parts.

**Key words:** Villari's effect, magnetomechanic formulas, machine diagnostic

## 1. WPROWADZENIE

Diagnostyka techniczna jest działalnością zmierzającą do poznania stanu technicznego maszyny lub określenia czasu jej właściwej pracy. Posiada w dyspozycji wiele metod i narzędzi pomiarowych. Część z nich oparta jest na przetwornikach piezoceramicznych, przetwornikach piezomagnetycznych i tensometrii. W chwili obecnej, dzięki rozwojowi w technologii produkcji magnetorezystorów, zauważamy nawrót w praktycznych zastosowaniach pomiarowych do znanych efektów magnetycznych.

Począwszy od 1842 roku, w którym to odkryty został i zdefiniowany przez Joule'a, efekt magnetyczny, znany powszechnie pod nazwą magnetostrykcji, odkryto kolejnych dziewięć efektów magnetycznych (rys.1). Nazwy efektów magnetycznych, ich odkrywców, rok odkrycia i objaśnienia zilustrowano na rysunku 1 i zebrano w tabeli 1[1].




Rys. 1. Znane efekty magnetyczne [3]
Fig. 1. Known magnetic effects [3]

[1)] Dr inż., Instytut Transportu, Politechnika Śląska, tel./fax (48 32) 255 43 71 e-mail:

Tabela 1

Znane i wykorzystywane efekty magnetyczne

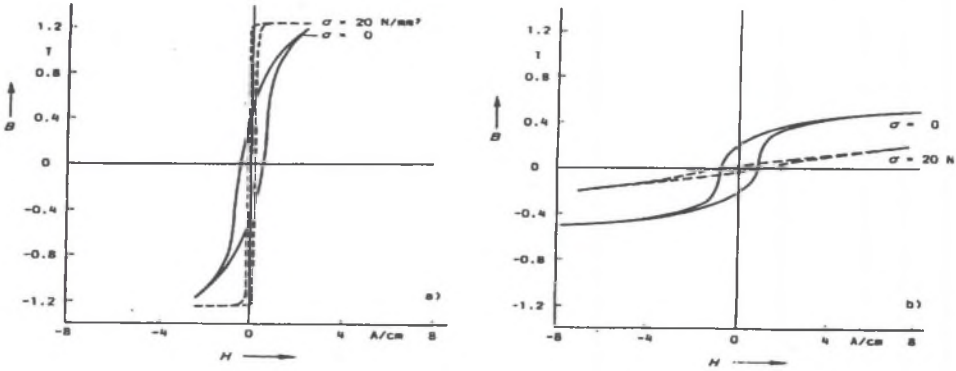
| Rok odkrycia | Nazwa efektu /efekt | Objaśnienie efektu | Zastosowanie techniczne |
|---|---|---|---|
| 1842 | Joule'a o | zmiana kształtu pod wpływem pola magnetycznego | przetworniki magnetostrykcyjne |
| 1846 | ΔE | zmiana E pod wpływem pola magnetycznego | opóźnienia akustyczne dla składowych liniowych pola |
| 1847 | Matteucciego * | skręcanie pręta ferromagnetycznego w podłużnym polu magnetycznym | przetworniki magnetoelastyczne |
| 1856 | Thomsona | zmiana oporności wraz z polem magnetycznym | przetworniki magnetorezystancyjne |
| 1858 | Wiedemanna * | skręcanie pręta przewodzącego prąd w wyniku działania pola magnetycznego | przetworniki siły i naprężeń skręcania |
| 1865 | Villariego o | zmiana magnetyzacji od naprężeń | przetworniki magnetoelastyczne |
| 1879 | Halla | powstanie poprzecznego naprężenia po przyłożeniu pola magnetycznego prostopadle do płynącego prądu w materiale | przetworniki magnetogalwaniczne |
| 1903 | Powierzchniowy | płynięcie prądu po zewnętrznej warstwie | przetworniki położenia |
| 1931 | Sixtusa | magnetyzacja pulsowa przez duże skoki Barkhausena | przetworniki zbliżenia |
| 1962 | Josepsona | efekt tunelowy pomiędzy dwoma nadprzewodzącymi materiałami z wyjątkowo cienką warstwą oddzielającą | czujniki Wiegenda i magnetometry SQUID |

Objaśnienie: symbolami o,* oznaczono pary efektów odwracalnych.

Efekty magnetyczne przyczyniły się do powstania przetworników, których działanie oparte zostało na zjawiskach piezomagnetycznych i magnetogalwanicznych. Do badań naprężeń w oparciu o efekt Villariego używa się przetworników pola magnetycznego.

## 1.1. Efekt Villariego

W rozważaniach dotyczących efektu Joule'a i Villariego wielu autorów badało materiały o szczególnym składzie i budowie. Dydaktycznym przykładem są wykresy przedstawione na rysunku 2 [2]. Dotyczą one jednak krystalicznego stopu NiFe oraz krystalicznego czystego Ni.




Rys. 2. Zmiany krzywych magnetyzacji pod obciążeniem σ. (a) krystaliczny stop 68%NiFe, $\lambda_s = +25 \cdot 10^{-6}$; (b) krystaliczny czysty Ni, $\lambda_s = -35 \cdot 10^{-6}$ [2]

Fig. 2. Changes of magnetisation loops under stress σ. (a) crystalline alloy 68% Ni Fe, $\lambda_s = +25 \cdot 10^{-6}$; (b) crystalline pure Ni, $\lambda_s = -35 \cdot 10^{-6}$ [2]

### 1.2. Magnetostrykcja i magnetoelastyczna konwersja - efekt Villariego

Stosunek energii magnetosprężystości $W\sigma$ do całkowitej zawartej energii $W_i$ w badanej próbce powiązany jest magnetomechanicznym współczynnikiem $K_{33}$ [2].

$$K_{33}=\frac{W_\sigma}{\sum W_i}=\frac{W_\sigma}{W_H+W_\sigma+W_K+W_u+W_N} \tag{1}$$

gdzie:

$W_H$ - energia zewnętrznego pola magnetycznego (proporcjonalna do natężenia pola i wektora magnetyzacji),
$W_\sigma$ - energia magnetosprężystości sprężystości (związana z magnetostrykcją $\lambda_s$ i naprężeniem $\sigma$),
$W_K$ - energia anizotropii magnetokrystalicznej,
$W_u$ - indukowana pod wpływem pola energia anizotropii,
$W_N$ - energia anizotropii kształtu.

W przypadku szczególnym, gdy $W_K$ i $W_u$ dąży do zera, a wartość $W_N$ jest bardzo mała, równanie (1) przyjmuje postać:

$$\frac{W_\sigma}{\sum W_i}=\frac{W_\sigma}{W_\sigma+W_H}, \tag{2}$$

$$W_H=-J_s\,H\cos\varphi, \tag{3}$$

$$W_\sigma \approx \frac{3}{2}\lambda_S\,\sigma\,\sin^2\varphi, \tag{4}$$

$$\sigma=\frac{1}{\mu_r}\frac{J_S^2}{3\lambda\mu_0} \tag{5}$$

gdzie:

$J_s$ - magnetyzacja nasycenia,
$\mu_0$ - przenikalność magnetyczna próżni,
$\varphi$ - kąt między magnetyzacją a wektorem pola magnetycznego,
$\mu_r$ - przenikalność magnetyczna względna,

$$\mu_r=\frac{J_s^2}{3\cdot\mu_0\lambda_s\sigma}=\frac{J_s^2}{3\mu_0\lambda_s E}\frac{1}{\varepsilon} \tag{6}$$

E - moduł Younga,
$\varepsilon$ – odkształcenie.

Zależność magnetomechanicznego współczynnika $K_{33}$ i modułu Younga E opisuje zależność (7). Dla bardzo wysokiego współczynnika $K_{33}$, równego 0.95, $\Delta E$ przyjmuje wartość ok. 10%.

$$\frac{\Delta E}{E}=\frac{K_{33}}{1-(K_{33})^2}. \tag{7}$$

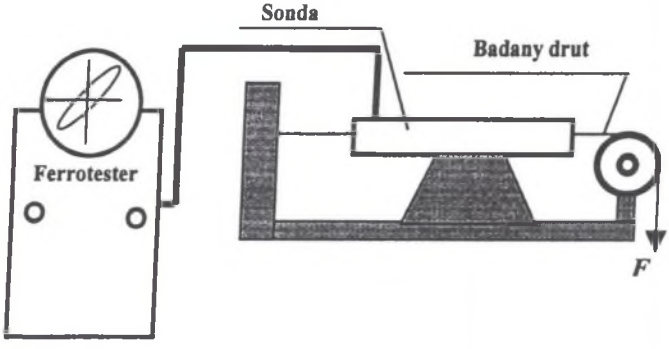
## 2. BADANIE ZALEŻNOŚCI MAGNETOMECHANICZNYCH DLA WYBRANYCH GATUNKÓW STALI WĘGLOWYCH I STOPOWYCH

Badania prowadzone w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej ukierunkowane były przede wszystkim [4,5,6] na stal ST3S i ST5S. Próbki poddawano jednoosiowemu stanowi naprężeń, najczęściej zginaniu i skręcaniu statycznemu i dynamicznemu. Pomierzone zmiany natężenia pola magnetycznego bezpośrednio przy powierzchniach próbek wykazywały zależności proporcjonalne pomiędzy stanem naprężeń, strzałką ugięcia a wydłużeniem pomierzonym tensometrem [5]. Pomiary te nie były poprzedzone badaniami zmian magnetyzacji w funkcji zmiany naprężeń.

### 2.1. Wyznaczanie pętli histerezy dla wybranych gatunków stali węglowych

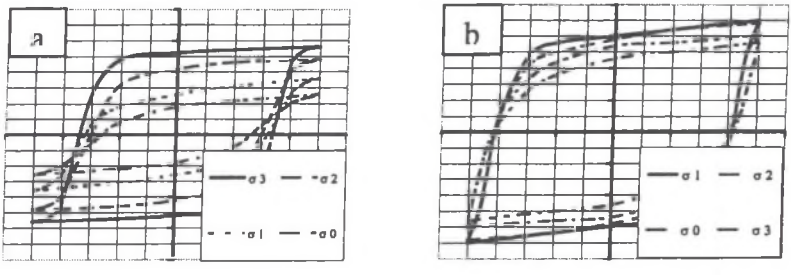
Brak danych o ilościowych i jakościowych zmianach magnetyzacji w podstawowych stalach węglowych uniemożliwiał prowadzenie symulacji programem FEM (Finite Elements Method),

wpływu zmian przenikalności na deformacje pola wokół próbki. Przeprowadzono zatem badania kilku typów drutu o średnicy 1.2 mm na stanowisku pomiarowym, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.




Rys.3. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania pętli histerezy w drucie poddawanym jednoosiowemu stanowi naprężeń
Fig. 3. Scheme of measurement post used to get hysteresis loops in wire under one-axis stress state

Wyniki pomiarów wykonanych przy pomocy ferrotestera przedstawiono na rysunku 4.




Rys. 4. Krzywe magnesowania wybranych drutów stalowych pod wpływem naprężeń mechanicznych, parametry pomiaru podano w zestawieniu
Fig. 4. Hysteresis loops of chosen steel wires under tensile stress, parameters of measurement listed in table

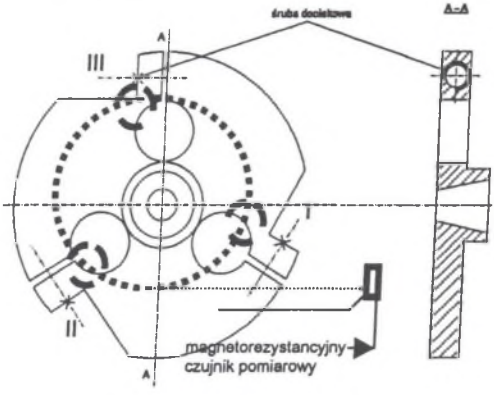
Tabela 2

| Wykres/ Typ drutu | Podstawowe składniki stopowe drutu [%] | | | $J_s$ max | H max | $\sigma_0$ [MPa] | $\sigma_1$ [MPa] | $\sigma_2$ [MPa] | $\sigma_3$ [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | [T] | [KA/m] | | | | |
| a - SG2 | 0,07 | 0,85 | 1,2 | 0,477 | 5,68 | 0 | 186 | 279 | 469 |
| b - SP2 | 0,08 | 0,6 | 1,2 | 1,034 | 1,31 | | | | |

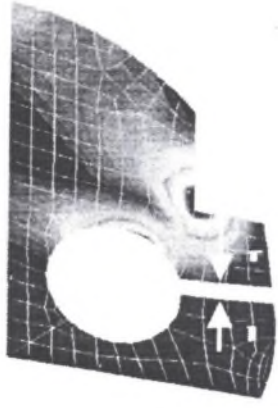
## 3. STANOWISKO POMIAROWE I PROGRAM BADAŃ

Do badań zaprojektowano krążek stalowy przedstawiony na rysunku 5. Przez odpowiednie rozstawienie otworów i nacięć uzyskano możliwość wpływu na statyczny stan naprężeń w jednym, dwóch lub trzech miejscach (I, II i III) poprzez zmianę stopnia dokręcenia śruby. Linią grubą kropkowaną zaznaczono promień, na którym dokonywano pomiaru natężenia pola magnetycznego. Okręgami kreślonymi linią przerywaną zaznaczono strefy największych zmian naprężeń, które potwierdzono symulacją MES dla wycinka krążka jak na rysunku 6 [7].

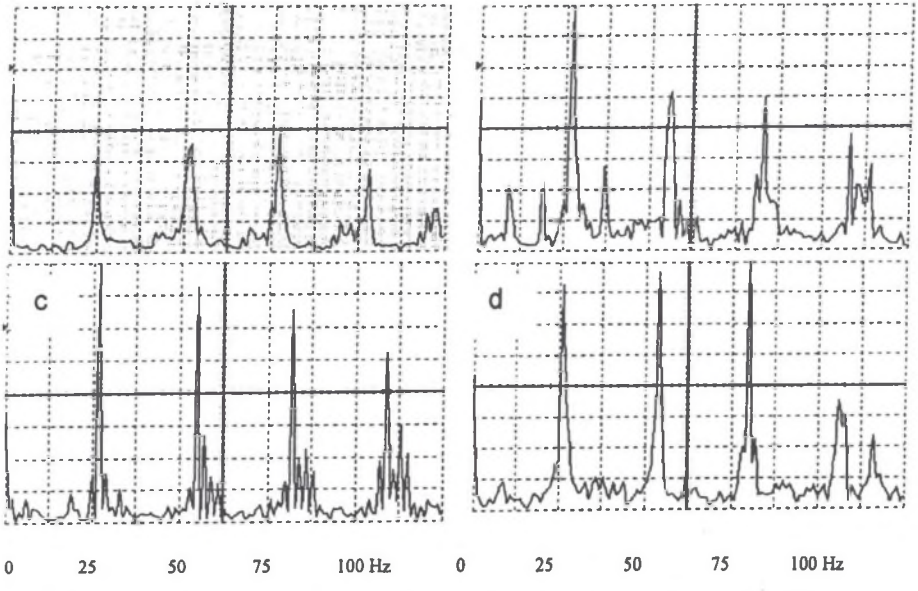
Wpływ naprężeń na zmiany natężenia pola magnetycznego, które mierzono w odległości 3 mm od powierzchni krążka spowodował pojawienie się dodatkowych prążków na charakterystykach widmowych. Charakterystyki widmowe zamieszczone na rysunku 7 przedstawiają wpływ stanu naprężenia po dokręceniu kolejnych śrub I,II i III oraz wpływ efektu relaksacji naprężeń po zdjęciu obciążenia [4].




Rys. 5. Krążek ze stali ST3S poddany badaniom wpływu naprężeń na obraz pola magnetycznego
Fig. 5. Experimental trolley made from steel ST3S under stress



Rys. 6. Rozkład naprężeń uzyskany symulacją MES dla fragmentu krążka
Fig. 6. Stress distribution get by simulation MES for part of trolley




Rys. 7. Charakterystyki widmowe będące wynikiem w kolejnych strefach krążka: a - bez obciążenia, B - z obciążeniem w strefie I i II, c - z obciążeniem w strefie I, II i III, d - w kilka minut po zdjęciu obciążenia
Fig. 7. Spectrum characteristics get from changes of stress at following parts of trolley: a - without load, b - load at part I and II, c – load at part I,II,III, d – at few minutes after unloading

## 4. WNIOSKI

- Parametry magnetomechaniczne stali niskostopowych umożliwiają pomiar naprężeń poprzez pomiar natężenia pola magnetycznego mostkami magnetorezystancyjnymi.
- Przetworniki magnetorezystancyjne są dogodnymi i tanimi narzędziami pomiarowym.
- Pomiary stanów naprężeń poprzez pomiar pola magnetycznego mogą wzbogacić istniejące metody diagnostyki maszyn.

## LITERATURA

1. Boll R.: Sensors. A comprehensive survey - Introduction, Vacuumschmelze GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, str. 3.
2. Hinz G., Voigt H.: Sensors. A comprehensive survey - Magnetoelastic sensors, Vacuumschmelze GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, str. 99-102.
3. Overshott K. J., Sensors: A comprehensive survey - Physical Principles, Brighton Polytechnic UK, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, str. 35.
4. Sitarz M., Żurek Z.: Diagnostyka obręczy zestawów kołowych z wykorzystaniem pola magnetycznego. ZN Transport 2000, Politechnika Śląska Instytut Transportu (w druku).
5. Żurek Z.H.: Przetworniki magnetorezystancyjne pola magnetycznego w badaniach stanów naprężeń mechanicznych próbki stalowej, Politechnika Śląska, Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, VIII Seminarium Naukowe, Katowice 2000, strony 303-308.
6. Żurek Z.H.: Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne jako narzędzia pomiarowe w diagnostyce technicznej, Politechnika Wrocławska, XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych – Diagnostyka maszyn elektrycznych, SME 2000, strony 38-41 zeszyt 21/49.
7. Żurek Z.H.: Badania naprężeń w wirujących elementach maszyn poprzez pomiar pola magnetycznego, Politechnika Śląska, XVII Ogólnopolska Konferencja – Przekładnie zębate, Węgierska Górka 2000, strony 205-212.
8. Żurek Z.H.: Użyteczność wybranych metod i narzędzi pomiarowych w diagnostyce technicznej, Politechnika Śląska, XXVII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, 2000, strony 263-274.

Recenzent: Dr hab. inż. Adam Jagiełło
Profesor Politechniki Krakowskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

**Abstract**

The paper presents a discussion of different magnetic properties of ferromagnetic materials. (Table 1. and Fig.1.) Particular attention is focused on Villari's magnetic effect, which can be utilized in stress measurements. Basic magnetomechanic formulas and property descriptions are analysed (equations 1-1 to 1-7). Figure 4 shows the magnetisation curves for carbon steel wires of two grades with applied longitual stress forces .A precise relation between the magnetisation state and mechanical stress is noted. The concluding part of the paper presents a practical application of a magneto-resistive bridge to reveal internal stresses and to evaluate the values of tension and amplitude of vibrations of rotating machine parts. Measurements of magnetic flux changes were carried out (Fig. 5.). It is proved that the measured magnetic flux changes can be applied as supplementary means to diagnosing machine parts. The measurement results are shown on spectrum diagrams (Fig.7.)