



Zbigniew H. ŻUREK

BADANIA STANU FERROMAGNETYCZNYCH ELEMENTÓW MASZYN W POLU MAGNETYCZNYM



Gliwice 2005



POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYTY NAUKOWE NR 1678

Zbigniew H. ŻUREK

05

BADANIA STANU FERROMAGNETYCZNYCH ELEMENTÓW MASZYN W POLU MAGNETYCZNYM

**GLIWICE 2005** 

#### SPIS TREŚCI

| W  | Wykaz ważniejszych pojęć i określeń używanych w pracy   | 7             |
|----|---|---------------|
| 1  | 1. WSTĘP  | 9             |
|    | 1.1. Wprowadzenie   | 9             |
|    | <ol> <li>1.2. Defektoskopia magnetyczna.</li> <li>1.3. Diagnostyka stanu ferromagnetycznych elementów maszyn</li> </ol> | 11            |
|    | w polu magnetycznym   |               |
|    | <ul><li>1.4. Cel, założenia i zakres pracy</li><li>1.5. Program badań. Układ pracy</li></ul>                            | 15<br>16      |
| 2  | 2. PODSTAWY TEORETYCZNE I BAZA POMIAROWA  | 19            |
|    | 2.1. Podstawy fizyczne i materiałowe badań magnetycznych zmęczenia n  | nechanicznego |
|    | stali konstrukcyjnych niskowęglowych i niskostopowych   |               |
|    | 2.2. Efekty magnetyczne Joule'a i Villariego stanów sprężystych materiał  | łu 24         |
|    | 2.3. Pole magnetyczne przy powierzchni materiału ferromagnetycznego   |               |
|    | 2.4. Zakresy namagnesowania materiału<br>2.5. Magnetorezystancyjne przetworniki pomiarowe                               |               |
|    |   |               |
| 3. | 3. BADANIE PARAMETRÓW MAGNETYCZNYCH MATERIAŁU   |               |
|    | 3.1. Stanowisko pomiarowe i kalibracja układu pomiarowego   |               |
|    | 3.2. Badanie efektu Villariego  |               |
|    | 3.2.1. Materiał badań   | 40            |
|    | 3.2.2. Krzywe magnesowania pierwotnego  |               |
|    | 3.3. Zakres pomiarowej czułości magnetycznej materiału  |               |
|    | 3.4. Rozbudowa katalogu materiałowego programu symulacyjnego MES  | pola          |
|    | 2.5 Drzykład wykorzystanie paramatrów magnetogradyczych materiału   |               |
|    | 5.5. Fizykiad wykorzystama parametrów magnetospięzystych materiału.   |               |
| 4. | 4. MAGNETYCZNE ODWZOROWANIE STANU NAPRĘŻEŃ I DRG  | AŃ            |
|    | W MATERIALE FERROMAGNETYCZNYM   |               |
|    | 4.1. Odkształcenia sprężyste zginania   | 55            |
|    | 4.1.1. Stanowisko pomiarowe   | 55            |
|    | 4.1.2. Badanie podobieństwa   |               |
|    | 4.2. Statyczny stan naprężeń w elemencie wirującym  |               |
|    | 4.2.1. Stanowisko pomiarowe   |               |
|    | 4.2.2. Pomiary I analiza  |               |
| _  |   |               |
| 5. | >. SUNDA PUMIAKUWA  |               |
|    | 5.1. Budowa i zasada pracy sondy  |               |
|    | 5.1.1. Konstrukcja sondy  |               |
|    | 5.1.2. Namagnesowanie materiału w polu magnetycznym sondy   |               |
|    | 5.1.3. Pole magnetyczne w strefie przetwornika pomiarowego  |               |

**Opiniodawcy** Prof. dr hab. Krystyn PAWLUK Prof. dr hab. inż. Sławomir TUMAŃSKI

#### Kolegium redakcyjne

Redaktor naczelny – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ Redaktor działu – Prof. dr hab. inż. Marian PASKO Sekretarz redakcji – Mgr Elżbieta LESKO

Redakcja Mgr Kazimiera SZAFIR

Redakcja techniczna Alicja NOWACKA

PL ISSN 0072-4688

© Copyright by Zbigniew H. ŻUREK Gliwice 2005

# 20Mag

| 4         |  |
|-----------|--|
| <b>-r</b> |  |

| 5.2. Błąd pomiaru   |
|---|
| 5.2.1. Błąd przetwarzania przetwornika  |
| 5.2.2. Błąd powodowany zmianą odległości pomiaru  |
| 5.2.3. Powtarzalność pomiaru  |
| 6. APLIKACJE LABORATORYJNE METODY POMIAROWEJ  |
| 6.1. Padania nanrażań sanda namiarawa 90  |
| 6.1.1. Domiar naprężeń jednorodnych w próbce rozciaganej  |
| 6.1.2. Symulacia i pomiar nateżenia pola magnetycznego przy powierzchni koła                                      |
| zebatego  |
| 6.1.3. Badanie nierównomierności naprężeń w połączeniu wciskowym  |
| 6.2. Badanie zmęczenia materiału  |
| 6.2.1. Magnetyczne metody pomiaru zmęczenia materiału ferromagnetycznego 93                                       |
| mechanicznie 94   |
| 6.2.3. Pomiar zmian namagnesowania warstwy wierzchniei  |
| 6.3. Detekcia wad   |
| 6.3.1. Pomiar magnetycznego pola rozproszenia   |
| 6.3.2. Wnioski wstępne 103  |
| 7.1. Badanie zestawów kołowych  |
|   |
| 8. WNIOSKI I UWAGI KONCOWE 113  |
| 9. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ 114  |
| ZAŁĄCZNIKI 115  |
| <b>Z1.</b> Efekty magnetyczne i zjawiska fizyczne wykorzystywane w budowie przetworników pomiarowych              |
| Z2. Krzywe magnesowania i związki magnetomechaniczne wybranych gatunków stali 118                                 |
| <b>Z3.</b> Porównanie programów Flux 2D/3D i FEMM Version 3.2 2D  |
| Z4. Ocena analityczna i symulacyjna rozkładu indukcji w obwodzie do badania próbek<br>z nieciągłościami przekroju |
| LITERATURA  |
| STRESZCZENIE  |

# CONTENTS

| Reference list of the more important notions and definitions used in elaboration     | 7    |
|--|------|
| 1. INTRODUCTION  | 9    |
| 1.1 Introduction   | 0    |
| 1.2 Magnetic crack detection   | 11   |
| 1.3. Condition diagnosis of ferromagnetic machine elements in the magnetic field     | 12   |
| 1.4. Assumption, purpose and range of elaboration                                    | 15   |
| 1.5 Research programme Configuration of the work                                     | 16   |
| 1.5. Research programme. Configuration of the work                                   | . 10 |
| 2. THEORETICAL AND MEASUREMENT BASE  | . 19 |
| 2.1. Physical and material basis of magnetic researches of mechanical fatigue of     |      |
| low-carbon and low-alloyed constructional steel                                      | . 20 |
| 2.2. Joul and Villar magnetic effects of elastic material conditions                 | . 24 |
| 2.3. Magnetic field at ferromagnetic material surface                                | . 28 |
| 2.4. Ranges of material magnetization  | . 31 |
| 2.5. Magnetoresitor measurement converters   | . 32 |
| 3. RESEARCH OF MATERIAL MAGNETIC PARAMETERS  | . 36 |
| 3.1. Research stand and calibration of measurement system                            | . 36 |
| 3.2. Villar effect research  | . 39 |
| 3.2.1. Material for research   | . 40 |
| 3.2.2. Primary magnetization curves  | . 41 |
| 3.3. Range of measurement magnetic sensitivity of material                           | . 46 |
| 3.4. Development of material catalogue of simulation programme MES of magnetic field | 49   |
| 3.5. Example of magnet-elastic material parameters utilization                       | . 51 |
| 4. MAGNETIC MAPPING OF STRESSES AND VIBRATIONS CONDITIONS                            |      |
| IN FERROMAGNETIC MATERIAL  | . 55 |
| 4.1. Elastic strains of bending  | . 55 |
| 4.1.1. Research stand  | . 55 |
| 4.1.2. Similarity research   | . 61 |
| 4.2. Statical stress condition in whirling element                                   | . 63 |
| 4.2.1. Research stand  | . 64 |
| 4.2.2. Measurements and analysis   | . 65 |
| 4.3. Remarks and preliminary conclusions   | . 66 |
| 5. MEASURING PROBE   | . 69 |
| 5.1.Measuring probe  | . 69 |
| 5.1.1. Probe construction  | . 69 |
| 5.1.2. Material magnetization in magnetic field of the probe                         | . 70 |
| 5.1.3. Magnetic field in measuring transducer zone                                   | . 72 |

| -     |
|-------|
| 6     |
|       |
| · · · |

|    | 5.2. Measurement error                                    | 74 |
|----|---|----|
|    | 5.2.1. Transducer conversion error                        | 75 |
|    | 5.2.2. Error caused by the change in measurement distance | 76 |
|    | 5.2.3. Repeatability of measurement                       | 78 |
|    |   |    |
| 6. | APPLICATION OF MEASURING METHODE IN LABORATORY            | 80 |

# 6.1. Research of stresses by measuring probe 80 6.1.1. Measurement of homogeneous stresses in stretched sample 80 6.1.2. Simulation and measurement of magnetic field intensity at gear wheel 80 surface 85 6.1.3. Measurement of stress inequality in pressed connection 87 6.2. Measurement of material fatigue 93 6.2.1. Magnetic methods of ferromagnetic material fatigue measurements 93 6.2.2. Magnetic measurements of material fatigue of mechanical cooperated 94 6.2.3. Measurements of magnetization changes of surface layer 97 6.3. Defect detection 99 6.3.1. Measurements of magnetic stray field 99 6.3.2. Preliminary conclusions II 103

# 7. APPLICATIONS OF MEASURING METHODE FOR INDUSTRAIAL PRACTICE 105 7.1. Measurement of wheels of wheel sets 105 7.2. After repairing measurements of pivots of wheel sets 107

| 8. | CONCLUSIONS . | AND FINA | L REMARK | S | <br>113 | 5 |
|----|---------------|----------|----------|---|---------|---|
|    |               |          |          |   |         |   |

| 9. FURTHER REASERCH DIRECTIONS KIERUNKI |     |
|---|-----|
| ENCLOSURES                              | 115 |

| <b>Z1.</b> Magnetic effects and physical phenomena used in construction of measuring transducers  | 115  |
|---|------|
| Z2. Magnetization curves and relations magnet-mechanical of chosen grade of steel   | 118  |
| <b>Z3.</b> Comparison of programmes Flux 2D/3D and FEMM Version 3.2 2D  | 130  |
| <b>Z4.</b> Analytical and simulation evaluation of induction distribution in circuit for sample measurements with section discontinuity | 136  |
| BIBLIOGRAPHY  | 138  |
| SUMMARY   | .149 |

#### WYKAZ WAŻNIEJSZYCH POJĘĆ I OKREŚLEŃ UŻYWANYCH W PRACY

Interdyscyplinarny charakter tematyki pracy sprawia, że wśród zagadnień materiałowych mechanicznych i elektrotechnicznych pojawiają się oznaczenia o tej samej symbolice. Poniżej podano ważniejsze oznaczenia, ich znaczenie oraz podstawowe pojęcia i definicje stosowane w pracy.

| B <sub>n</sub>                |      | składowa normalna indukcji magnetycznej,  |
|-------------------------------|------|---|
| Bt                            | -    | składowa styczna indukcji magnetycznej,   |
| $B_{\sigma}$                  |      | indukcja pod obciążeniem mechanicznym $\sigma$ ,  |
| $\Delta l/l$                  | _    | magnetostrykcja długości,   |
| $\Delta V/V$                  | _    | magnetostrykcja objętości,  |
| $\lambda = \Delta l/l$        | _    | definicja współczynnika magnetostrykcji,  |
| 1s                            | _    | współczynnik magnetostrykcji dla magnetyzacji nasycenia $J_s$ ,                             |
| <100>, <1                     | 10>  | <111> – oznaczenia osi dla kierunków krystalograficznych,                                   |
| $\lambda_{100} = \lambda_{c}$ | 1115 | $= \lambda_s$ – opis anizotropii materiału, zrównanie wartości współczynników               |
| 100                           |      | magnetostrykcii.  |
| $J_{s}$                       | _    | magnetyzacja nasycenia przy $B_{max}$ ,   |
| J                             | _    | magnetyzacja.   |
| Ja                            | _    | magnetyzacja od napreżeń.   |
| JARM                          | _    | magnetyzacja dla szczególnej wartości nateżenia magnesowania                                |
| WIKINI                        |      | charakteryzująca zakres magnetycznej reakcji materiału.                                     |
| MRM                           | _    | magnetyczna reakcja materiału.  |
| MMRM                          | _    | metoda magnetycznej reakcji materiału.  |
| W <sub>H</sub>                | _    | energia pola magnetycznego (proporcionalna do nateżenia pola i polaryzacji                  |
|                               |      | magnetycznej).  |
| W_                            | _    | energia magnetospreżysta (zwiazana z magnetostrykcja $\lambda_i$ i napreżeniami $\sigma$ ). |
| Wv                            | _    | energia anizotropii magnetycznej zawarta w budowie kryształu.                               |
| W.                            | _    | iednoosiowa energia anizotronii.  |
| WN                            | _    | energia anizotronii kształtu.   |
|                               | _    | stała magnetyczna.  |
| Huy. He                       | _    | wzgledna przenikalność magnetyczna.   |
| Here                          | _    | maksymalna wzgledna przenikalność magnetyczna (przy obciażeniu).                            |
| E                             | _    | moduł Younga.   |
| 2                             | _    | odkształcenie.  |
| н.                            | _    | nateżenie koercii.  |
| 0                             | _    | rezystywność  |
| HV                            | _    | mikrotwardość Vickersa.   |
| $\Lambda^2$                   | _    | kwadrat szerokości linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich.                             |
| tøδ.                          | _    | tangens kata strat relaksacvinych.  |
| FEMM                          | _    | Finie Element Magnetic Metod.   |
| $\Delta o/o$                  |      | współczynnik magnetorezystywności.  |
| Hk                            | _    | pole anizotronii (Hk= 2 K/Js).  |
| K                             | _    | stała anizotropii materiału.  |
| N                             | _    | współczynnik odmagnesowania.  |
| Ha                            | _    | nateżenie zewnetrznego pola magnetycznego.  |
| Hw                            | _    | nateżenie pola magnetycznego w badanej próbce.  |
| S                             | _    | czułość magnetospreżysta,   |
| Φ                             | _    | strumień magnetyczny zwojnicy z rdzeniem.   |
| $\phi_0$                      | _    | strumień magnetyczny dla powietrzą zwoinicy bez rdzenia.                                    |

- $\sigma$  naprężenie mechaniczne,
- R<sub>e</sub> granica plastyczności,
- R<sub>m</sub> granica wytrzymałości,
- $A_5$  wydłużenie,
- Z przewężenie,
- KCU udarność,
- S czułość magnetosprężysta,
- Smax czułość magnetosprężysta maksymalna,
- S<sub>E</sub> mocowa czułość magnetosprężysta,
- S<sub>MP</sub> czułość magnetyczno-pomiarowa,

dodatkowe wprowadzenie w tekście innych oznaczeń będzie każdorazowo dokładnie objaśniane.

#### Definicje

**Diagnostyka techniczna** [technical diagnostics] – dziedzina wiedzy obejmująca całokształt zagadnień teoretycznych i praktycznych, dotyczących identyfikacji i oceny aktualnych, przeszłych i przyszłych stanów obiektu technicznego z uwzględnieniem jego otoczenia [153], wykorzystująca między innymi wyniki obserwacji procesów resztkowych [153] (drgania, hałas i temperatura), generowanych podczas funkcjonowania obiektu (diagnostyka wibroakustyczna, cieplna).

**Krzywa "życia" maszyny** [*curve of machine's "life*"] – przedstawienie przebiegu zużywania się maszyny zobrazowany miarą symptomu S w procesie eksploatacji  $\Theta$ [153] wyrażonym między innymi czasem lub wykonaną liczbą cykli.

#### Krzywa Lorenza – krzywa życia maszyny

"Historia obciążeń" – zbiór informacji o charakterze obciążeń i ich wartości w korelacji z czasem lub liczbą cykli podzespołu badanego elementu konstrukcyjnego [25, 26]. Charakter obciążeń to liczba cykli, ich symetria i wartość naprężeń (nisko- lub wysokocyklowe [64]).

**Magnetyczne pole rozproszenia** [magnetic flux leakage (wyciek)] – pole wychodzące poza główny obwód magnetyczny. W konstrukcjach maszyn i urządzeń magnetycznych pole to jest źródłem strat i zakłóceń. W defektoskopii magnetycznej pole to jest podstawowym źródłem informacji o nieciągłości obiektu, w diagnostyce magnetycznej stanu jest źródłem informacji o stanie obecnym i przyszłości obiektu. Pole to jest specjalnie wzbudzone od zewnętrznego źródła magnetycznego pola testujacego.

**Defektoskopia magnetyczna** – jedna z nieniszczących metod identyfikacji niejednorodności materiału, wykorzystująca obecność magnetycznego pola rozproszenia nad niejednorodnością materiału. Niejednorodność może być opisywana za pomocą parametrów geometrycznych (wymiar i usytuowanie) lub fizycznych, jak: konduktywność, przenikalność elektryczna i magnetyczna [123].

**Diagnostyka magnetyczna stanu** [conditio magnetical diagnostic] – dziedzina wiedzy obejmująca całokształt zagadnień teoretycznych i praktycznych dotyczących identyfikacji i oceny aktualnych, przeszłych i przyszłych stanów elementu obiektu technicznego z uwzględnieniem jego otoczenia, wykorzystująca między innymi wyniki obserwacji zmian zewnętrznego pola magnetycznego od kalibrowanego zewnętrznego źródła wzbudzenia. Diagnostyka magnetyczna bada stany naprężeń sprężystych lub zmęczeniowych w materiale elementu, zanim wystąpią zmiany ciągłości wykrywane na przykład defektoskopią magnetyczną. Informacje pozyskane z analizy rozkładu pola magnetycznego służą do oceny stanu aktualnego i przyszłych stanów elementu, a więc do określenia czasu życia [aut].

**Magnetyczna krzywa zmęczenia materiału** – przedstawienie przebiegu utraty pierwotnego stanu technicznego elementu maszyny na podstawie korelacji szczególnego związku parametrów magnetycznych  $\chi_r/H_c$  lub  $\mu_r/H_c$  z funkcją czasu lub liczba cykli obciążeń zmęczeniowych mechanicznych [aut].

#### 1. WSTĘP

#### 1.1. Wprowadzenie

Praca dotyczy głównie zagadnień magnetycznej metody oceny stanu oraz prognozy przyszłościowej elementu maszyny wykonanego ze stali konstrukcyjnej. Autor bada korelacje między stanem naprężeń mechanicznych sprężystych i zmęczeniowych a parametrami magnetycznymi materiału. Podejmuje badanie zależności parametrów magnetycznych materiału elementu, zanim wystąpią pierwsze odznaki braku ciągłości materiału wykrywane defektoskopią magnetyczną. Źródła literaturowe krajowe i zagraniczne, z nielicznymi wyjątkami, potwierdzają szybki rozwój elektromagnetycznych metod testowania materii w zakresie potrzeb defektoskopii (p.1.2). Diagnostyka materiału ferromagnetycznego poprzedzająca rozwój wad ukierunkowana na potrzeby przemysłu jest w literaturze nielicznie prezentowana (p. 1.3).

Magnetyczne pole elementu wykonanego ze stali konstrukcyjnej, wzbudzone z zewnętrznego źródła testującego, zmienia się pod wpływem złożonych procesów postępujących w materiale powodowanych długotrwałym obciążeniem mechanicznym w zakresie obciążeń zmęczeniowych, a także sprężystych. Występujące korelacje pomiędzy stanem obciążeń mechanicznych elementu z parametrami magnetycznymi materiału jak i deformacje materiału wywołane mechanicznym obciążeniem zmęczeniowym mogą podlegać badaniom magnetycznym.

Bezpośrednie zastosowanie metod defektoskopii magnetycznej najczęściej oderwane od zbioru zależności opisujących właściwości magnetyczne w funkcji obciążeń mechanicznych nie daje oczekiwanych rezultatów. Wykrywanie naprężeń wewnętrznych i odkształceń sprężystych czy plastycznych metodami defektoskopii magnetycznej jest niemożliwe w zakresie nasycenia materiału. Może być zakłócone niejednorodnością materiału czy jego kierunkowością ukształtowaną albo zmienioną w procesie technologicznym produkcji. Dlatego też występuje trudność bezpośredniego powiązania sygnałów pomiarowych z urządzeń defektoskopowych ze zmianami ilościowymi i jakościowymi od obciążeń mechanicznych zmęczeniowych, a tym bardziej z ich historią opisaną przez liczbę cykli, wartość naprężeń mechanicznych i współczynnik symetrii obciążeń.

Zaproponowana metodologia badawcza rozdziela fazy oddziaływania mechanicznego na element pod względem skutków występujących w materiale od obciążeń sprężystych, zmęczeniowych, przechodzących stopniowo wskutek zmęczenia materiału w odkształcenia plastyczne i pękanie. Każda z faz wymaga odmiennego ich analizowania:

- faza obciążenia sprężystego opisana jest związkiem przenikalności magnetycznej z naprężeniami w zakresie sprężystości materiału (efekt Villariego),
- faza procesu zmęczenia opisana jest zmianami parametrów magnetycznych, oddziałującymi na namagnesowanie elementu ( $\mu_t$ ,  $\chi_r$ ) i opisującymi proces zmęczenia ( $\mu_t/H_c$ ,  $\chi_r/H_c$ ) [194],
- faza rozwoju defektów ciągłości materiału (pęknięcia) wywołujących znaczne ilościowo przyrosty składowej normalnej magnetycznego pola rozproszenia (większe od 1 do 2 rzędów wielkości w stosunku natężenia pola magnetycznego od naprężeń mechanicznych czy zmęczenia materiału) możliwe do badania dowolnymi metodami defektoskopowymi.
- Dla każdej z wymienionych faz niezbędne jest wstępne wyznaczenie:
- czułości magnetosprężystej badanego materiału,
- decydującego parametru magnetycznego opisującego zmęczenie materiału,
- zakresu zmian charakterystyk magnesowania w procesie zmęczenia,

 bazy pomiarowej, tj. lokalizacji punktu, odległości pomiaru, typu sondy pomiarowej wraz z układem pomiarowo-rejestrującym, ponieważ mierzone są względne zmiany natężenia pola magnetycznego, które następnie należy przeliczać.

Stawiane są coraz wyższe wymagania jakościowe w odniesieniu do wszelkiego typu urządzeń oraz konstrukcji inżynierskich. Szeroko pojęta jakość obejmuje głównie takie cechy elementów konstrukcyjnych i materiałów użytych do ich wykonania, jak: niezawodność, trwałość, stabilność struktury i właściwości stanu powierzchni, masa właściwa oraz cechy proekologiczne. W szczególności niezawodność i trwałość elementów maszyn i urządzeń eksploatowanych przez dłuższy czas, głównie pod obciążeniem mechanicznym, lecz często również cieplnym, chemicznym (korozyjnym) i radiacyjnym, zależy w znacznym stopniu od stabilności struktury warunkującej stałość właściwości cech eksploatacyjnych materiałów, z których wykonano elementy konstrukcyjne.

Struktura materiału i wykonanego z niego elementu jest pojęciem szerokim i obejmuje makrostrukturę, mikrostrukturę, substrukturę i budowę krystaliczną lub molekularną [45].

Uwarunkowana składem chemicznym i technologią wytwarzania makrostruktura dotyczy takich cech, jak: segregacja, anizotropia, włóknistość, rozmieszczenie wad i zanieczyszczeń. Mikrostruktura odnosi się do rodzaju, wielkości, kształtu i rozmieszczenia ziaren (krystalitów), faz występujących w materiale oraz struktury ich połączeń – granic ziaren. Pojęcie substruktury obejmuje zdefektowanie wnętrza kryształu występującego w materiale technicznym w postaci zniekształconej, tj. jako krystalit, czyli ziarno. Budowa krystaliczna określona jest przez układ krystalograficzny determinowany przez chemiczny i fazowy skład materiału [45, 64, 87].

Zachodzące w materiale pod wpływem obciążenia eksploatacyjnego elementu konstrukcyjnego zmiany struktury, wpływające na zmiany właściwości, odnoszą się prawie wyłącznie do mikrostruktury i substruktury. Obciążenie eksploatacyjne ma najczęściej charakter obciążenia mechanicznego zmęczeniowego, co stanowi przedmiot podjętych badań. W ogólnym ujęciu materiał poddany długotrwałemu obciążeniu mechanicznemu przechodzi kolejne fazy [42, 64, 73, 150, 182, 188, 190], które obejmują odkształcenia sprężyste, odkształcenia plastyczne, umocnienie lub osłabienie oraz utratę spójności (pękanie, dekohezja).

Elementy maszyn, urządzeń i budowli są eksploatowane w zakresie wystepowania odkształceń sprężystych, natomiast pod działaniem długotrwałego obciażenia mechanicznego w zakresie naprężeń zmęczeniowych i przy ewentualnym oddziaływaniu innych typów obciążeń w materiale moga wystapić efekty strukturalne, charakterystyczne dla odkształcenia plastycznego oraz umocnienia lub osłabienia. Efekty te to wzrost gęstości defektów struktury krystalicznej - wakansów dyslokacji i błędów ułożenia, mikroodkształceń i mikropeknieć, przemian fazowych indukowanych napreżeniami, procesów wydzielania faz wtórnych. Występowanie tych zjawisk sygnalizuje destabilizację struktury i właściwości użytkowych materiału, z którego wykonano element konstrukcyjny. Zaznacza się to szczególnie ostro w przypadku obciążeń cyklicznych, wywołujących zmeczenie materiału [64, 81, 150], oraz w procesach pełzania [42, 45]. Zmiany wywołane lokalnym odkształceniem plastycznym lub zmęczeniowym wpływają na właściwości fizyczne i mechaniczne materiału. W zakresie właściwości mechanicznych zmienia się głównie granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, sprężystość oraz twardość. Istotną rolę odgrywają także zmiany współczynników magnetycznych i cieplnych. Do badania przytoczonych zmian właściwości materiału wykorzystywane są metody badawcze mechaniczne, magnetyczne, akustyczne, rentgenograficzne, optyczne; tworzone są ich odmiany wykorzystujące związki właściwości fizycznych, jak magnetyczno-akustyczne [1, 2], lub zmieniające sposób obróbki sygnału [15, 16]. Szczególnie przydatne w grupie metod badań fizycznych okazuja się czułe metody badań magnetycznych. Do grupy tej między innymi można zaliczyć podstawowe badania

magnetyczne z detekcją magnetycznego pola rozproszenia [32, 33, 41, 78-79, 134, 187], wiroprądowe [15, 16, 19, 33, 37, 41], wykorzystujące efekt szumu Barkhausena [74, 101, 109, 111,121, 152], pamięci magnetycznej MPM [24, 28, 29], oceny zmiany parametrów magnetycznych, jak i kształtu domen magnetycznych [30, 38, 93, 151]. W zakresie efektów magnetycznych [9, 11, 12, 13, 14] (Vilariego, Joule'a, Widemanna, Mateuciego,) proces zmęczenia materiału ferromagnetycznego objawia się stopniowym zanikiem efektów [1, 61] magnetosprężystych i mechaniczno-magnetycznych. Powstają strefy odkształceń plastycznych przechodzace w pekanie materiału.

W pracy zaproponowano metodę magnetycznej diagnostyki stanu. Zastosowanie tej metody wymaga charakterystycznego dla każdego materiału zakresu namagnesowania w celu uzyskania największej reakcji magnetycznej materiału. Namagnesowanie to jest znacznie mniejsze od magnetyzacji nasycenia. Proponowana metoda nazwana została Metodą Reakcji Magnetycznej Materiału (MRMM) [181, 182]. Podobieństwa metody co do zasad i budowy urządzeń badawczych znanych w klasycznej defektoskopii magnetycznej wynikają ze sposobów magnesowania i detekcji magnetycznego pola rozproszenia [41, 80], znanych chronologicznie na przykładzie metod i urządzeń badawczych Bertholda i Forstera (ponad 70 publikacji). Podstawowe różnice wynikają z faktu badania zmian w namagnesowaniu materiału a nie detekcji magnetycznego pola rozproszenia powodowanego defektem ciągłości materiału. Określeniu optymalnych zakresów magnesowania charakterystycznych dla danego materiału w zakresach mechanicznych obciążeń sprężystych, a także zmęczeniowych poświęcono znaczny zakres pracy.

#### 1.2. Defektoskopia magnetyczna

Ostatnia faza obciażenia eksploatacyjnego, w której dochodzi do utraty spójności materiału, nadała kierunek rozwoju metod defektoskopii magnetycznej. Wśród nich znaczące miejsce znalazły defektoskopia magnetyczna, ukierunkowana na badanie magnetycznego pola rozproszenia [41, 78-80, 134] oraz metoda wiropradowa, wykorzystująca zmiany przewodności materiału [15, 41]. Rozwineły się one w oparciu o właściwości magnetyczne materiału i efekty magnetyczne w materiałach ferromagnetycznych. Niezależna droge rozwoju przyjeły metody oparte na zjawisku szumu Barkhausena [74, 101, 152]. Zaleta metod magnetycznych jest możliwość nieniszczącego diagnozowania materiału elementu a nie lokalnie na jego wycinkach jak w badaniach metalograficznych. Za pośrednictwem metod defektoskopii magnetycznej realizuje sie przede wszystkim cele bezpośrednie, jak: wykrywanie, rozpoznanie, opis nieciągłości i makrostruktury. Istnieją także cele odległe, jak ocena ryzyka uszkodzenia elementu wskutek rozwoju mikropeknieć w materiale [1, 25, 71, 74, 182]. Nadal poszukuje sie metod badawczych magnetycznych [1, 30, 38, 93, 182] ze względu na brak metod uniwersalnych [73]. Spośród metod defektoskopii magnetycznej, umożliwiającej wykrycie zmęczenia materiału, można wymienić metody wiroprądowe, Barkhausena lub emisji magnetyczno-akustycznej. Wykrywalność faz zmęczenia materiału na poszczególnych etapach procesu obciażenia za pomocą wymienionych metod badawczych jest cześciowa [73]. Podobnie metoda MPM (Metoda Pamięci Magnetycznej) [24, 28], związana z magnesowaniem w naturalnym polu ziemskim, nie daje zadowalających rezultatów ze względu na trudność w interpretacji zmian pomierzonego pola i korelacji ze stanem technicznym [87, 182].

Badania magnetyczne stanu elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnej można kierunkować na potrzeby przemysłowe, dla określonej grupy stali o zidentyfikowanych właściwościach magnetycznych skorelowanych z charakterem obciążeń oddziałujących na element. Ważne jest zróżnicowanie wpływu na parametry magnetyczne materiału obciążeń

zmęczeniowych nisko- i wysokocyklowych [64]. W pierwszym przypadku obciążeń, w którym obciążenia są stałe, dochodzi między innymi do zmian w strukturze monokrystalicznej, w drugim przypadku, w którym zadane podczas badań odkształcenia są stałe, dochodzi do segregacji pierwiastków na granicach ziaren [42, 45, 64].

Z punktu widzenia eksploatacji i potrzeb użytkownika metody diagnostyczne powinny być nieniszczące, umożliwiające w diagnozowanym elemencie kontrolę kolejnych faz oddziaływania obciążenia mechanicznego. Podstawa zaproponowanej metody leży w poznaniu zakresu indywidualnych zmian parametrów magnetycznych badanego materiału w funkcji historii obciążeń i skorelowaniu ich z odpowiednimi fazami obciążenia.

Trudność realizacyjna celu diagnostycznego metodami defektoskopowymi wynika przede wszystkim z zadań pierwotnych (detekcja wad), dla których defektoskopia magnetyczna została zastosowana. Bezpośrednie zastosowanie metod defektoskopii magnetycznej do oceny zmian w strukturze materiału poddawanego obciążeniu najczęściej nie przynosi spodziewanych wyników. W konsekwencji wprowadza się modyfikacje metod magnetycznych co do zakresów pomiarowych, konstrukcji i wymiarów sond pomiarowych, jak i sposobów obróbki oraz analizy sygnału [1, 2, 15, 16].

## 1.3. Diagnostyka stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym

Diagnostyka stanu ferromagnetycznych elementów maszyn, będąca wiodącym tematem pracy, jest zagadnieniem nowym nie tylko w kraju, ale i za granicą. Porusza dwa aspekty. Pierwszy, to możliwość połączenia badań magnetycznych z mechaniką przez tworzenie magnetomechanicznych symulacji obciążeń [194]. Drugi aspekt to przeniesienie zmian właściwości magnetycznych materiału do całościowego opisu stanu technicznego eksploatowanego elementu, dające podstawy magnetycznej diagnostyki stanu [195]. Aktualność zagadnienia wymagała poszerzonych badań literaturowych z zakresu materiałów magnetycznych (Journal of Magnetism and Magnetic Material IMMM, Magnetic IEEE), zmęczenia materiału (Journal of Fatigue), nieniszczących metod badań (Nondestructive Testing & Evaluation NTD&E), przetworników pomiarowych i pomiaru (Instrumentation and Measurement IEEE, Sensors and Acutators) z punktu widzenia bezpośredniego zastosowania metod i rozwiązań do badania nieniszczącego i bezstykowego materiałów na obiektach przemysłowych eksploatowanych z nieznaną co do charakteru i wartości historią obciążeń mechanicznych.

Główny cel prowadzenia diagnostyki stanu elementów maszyn to możliwość wskazania perspektywy czasowej niezawodnej pracy urządzeń. Za pomocą najbardziej rozpowszechnionych metod wibroakustycznych, których miejsca w technice diagnostycznej nie sposób pominąć [3, 153], pełnozakresowej oceny uzyskać nie można. Wibroakustyka jest metodą diagnostyki technicznej, opartą na efektach rozproszenia przetwarzanej energii oraz utraty parametrów mechanicznych powierzchni współpracujących elementów. Współpracujące elementy podlegają odkształceniom plastycznym i ścieraniu – tworzą się luzy większe od zakładanych przez konstruktora. Maszyna emituje coraz większy hałas, wzrastają drgania, zwiększa się ilość wagowa produktów zużycia powierzchni współpracujących (np. opiłki w oleju skrzyni przekładni zębatej). Straty procesu przemiany energii wyznaczają stan maszyny. Opisany w ten sposób proces utraty właściwości użytkowych maszyny, znany jako krzywa Lorentza [3], służy do oceny ilościowej zjawiska oraz daje wnioski służące do przewidywania czasu niezawodnej pracy maszyny lub urządzenia. Nie wszystkie elementy konstrukcji inżynierskich oceniać można z punktu widzenia pomiaru procesów resztkowych przemiany energii mechanicznej. Sięgamy po możliwości innych metod badawczych. Istnieją metody bardziej subtelne od metod wibroakustycznych, a polegające na zliczaniu i analizie obciążeń zmęczeniowych, wykrywanych tensometrycznie i emitowanych drogą radiową lub satelitarną do odległych ośrodków technicznej kontroli. Metody te opracowano na Uniwersytecie w Manchester (rosiński@umanchester.uk) i zastosowano do kontroli pracy urządzeń o znaczeniu militarnym, bardzo drogich lub niebezpiecznych dla środowiska w przypadku awarii. Metody te, stosowane w ograniczonym zakresie ze względów technologicznych i finansowych, należą jednak do przyszłościowych.

Istota diagnostyki stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym polega na nadzorowaniu z zewnątrz zmian magnesowania materiału w funkcji czasu lub liczby cykli obciążenia mechanicznego zmęczeniowego. Tematykę niniejszej pracy ukierunkowano na badania stali konstrukcyjnych i eksploatowanych konstrukcji wykonanych z tych stali. Wyboru materiału i zakresu badań dokonano ze względu na specjalizację Katedry Transportu Szynowego Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Badaniami objęto gatunki stali stosowanej w kolejnictwie do produkcji kolejowych zestawów kołowych.

Koncepcja badawcza diagnostyki stanu elementu wynika bezpośrednio ze zmian stanu magnesowania materiału, będącego następstwem procesu obciążeń. Istnieją powiązania faz obciążeń materiału z jego parametrami magnetycznymi oraz zjawiskami fizycznymi i materiałowymi podczas obciążeń wywołujących odkształcenia sprężyste, plastyczne i zmęczeniowe [66, 68 – 70, 87,107, 108, 112 – 115, 182, 186], aż po utratę spójności materiału (pękanie). Namagnesowanie elementu zależy od przenikalności magnetycznej materiału. Istnieje możliwość wyprowadzenie informacji diagnostycznej z pomiaru natężenia pola magnetycznego. Korelacja zmian magnetyzacji z funkcją cyklu obciążeń [38] poprzez wszystkie fazy pracy materiału umożliwia wykorzystanie pomiarów pola magnetycznego jako nośnika informacji diagnostycznych o przewidywanym niezawodnym okresie pracy elementu. Powiązanie liczby cykli z istotnym parametrem magnetycznym materiału da odpowiedź na zadane pytanie o możliwość diagnostyki stanu materiału elementu ferromagnetycznego metodą magnetyczną.

Pomijanie charakteru zmian parametrów magnetycznych materiału z obciążeniem mechanicznym zmęczeniowym było podstawowym powodem braku efektów przy stosowaniu klasycznych metod defektoskopii magnetycznej do oceny zmęczenia materiału. Zmiany w wartości magnetyzacji nasycenia dla odkształceń plastycznych pomierzone na próbce czystego żelaza wynoszą ułamki procent wobec kilkudziesięciu procent dla zmian przenikalności magnetycznej [112], podobnie jak w zakresie MRMM. Stosowanie metod wiroprądowych może odnieść sukces, jeżeli zbadany zostanie bezpośredni związek zmian przewodności magnetycznej materiału z wartością obciążeń zmęczeniowych.

Temat diagnostyki stanu w polu magnetycznym (brak terminu w słowniku diagnostyki technicznej [153]) jest niezwykle aktualny nie tylko w kraju, ale i w skali światowej. Zakres badań jest szeroki. Rozpoczynają go badania kształtu i zmiany układu domen magnetycznych w procesie magnesowania [30], oceny wpływu zależności mechaniczno-magnetycznych [38, 151], nowych współczynników oceny czułości magnetycznej materiału ferromagnetycznego [93], ewolucji metod opartych na szumach Barkhausena [101], metod analizy wyników w badaniach wiroprądowych [15, 16], po zaproponowaną przez autora metodę reakcji magnetycznej materiału MRMM [182], będącą metodą magnetyczno-pomiarową z kontrolowanym magnesowaniem [176-186]. Od roku 1996 w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej, a obecnie Katedrze Transportu na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej trwają prace nad wykorzystaniem zjawisk magnetycznych do praktycznego zastosowania diagnosty-ki magnetycznej (wykrywanie zmęczenia materiału) w transporcie i budowie maszyn.

Zaproponowana przez autora metoda diagnostyki magnetycznej przetestowana została w licznych badaniach eksperymentalnych oraz symulacyjnych. Zaproponowane badania

elementów maszyn przez połączenie symulacji magnetycznych i mechanicznych jak i weryfikacji wyników pomiarów nie mają bezpośredniego odpowiednika w literaturze krajowej [114]. W literaturze światowej z ostatnich lat opisywane są badania efektów zmęczenia wysokocyklowego stali konstrukcyjnych i związki z natężeniem pola koercji [38, 195], dające możliwość bezpośrednich zastosowań przemysłowych.

W przedstawionym ujęciu diagnostyka magnetyczna może pełnić rolę wspomagającą dla diagnostyki wibroakustycznej a w wielu przypadkach dotyczących elementów wykonanych z podatnych materiałów ferromagnetycznych (o odpowiednim współczynniku magnetostrykcji i czułości magnetosprężystej) może tworzyć niezależną metodę diagnostyczną i badawczą. Ideę nowego podejścia do zagadnienia diagnostyki pokazano schematycznie na rysunku 1.1. Przedstawiono zależności pomiędzy diagnostyką wibroakustyczną a magnetyczną dla wybranych parametrów magnetycznych, które stanowią środki oceny stanu elementu charakteryzującego proces eksploatacji elementu maszyny.

Diagnostyka magnetyczna o szerokim zastosowaniu wymaga poznania reakcji magnetycznej określonych grup materiałów na oddziaływanie mechaniczne oraz wymaga przyjęcia na początku eksploatacji pomiarowego punktu odniesienia. Punkt ten może być monitorowany ciągle lub cyklicznie. Wymóg stosowania ściśle określonej bazy pomiarowej wynika z istoty magnetyzmu, a także lokalnych zmian kierunkowości materiału wyjściowego wprowadzonej procesem obróbki. Zaproponowana w pracy metoda diagnostyki stanu powstała w wyniku badań parametrów magnetycznych stali konstrukcyjnych węglowych niskostopowych na zestawy kołowe. Pełny zakres badań w zakresie obciążeń sprężystych i zmęczeniowych przeprowadzono dla stali na obręcze zestawów kołowych. Zakres obciążeń sprężystych badano na stanowisku badawczym z mechanicznym układem obciążającym i pomiarowym siły. W zakresie obciążeń zmęczeniowych badano stal obręczy zestawu kołowego na sterowanej elektronicznie maszynie wytrzymałościowej MTS Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz na stanowisku badawczym AMSLER-a.



Rys. 1.1. Zbieżność celu dla metod diagnostyki technicznej Fig. 1.1. Convergence of aim for methods of technical diagnostic Zgromadzone doświadczenia umożliwiły opracowanie metodyki badań dającej możliwość diagnozowania materiału w całej masie, a nie tylko lokalnie [154, 157, 176, 177] w zakresie obciążeń sprężystych [176, 178, 179] i zmęczeniowych [182, 186, 148]. Oceniając reakcję magnetyczną materiału na drodze pomiaru zewnętrznego pola magnetycznego można wykazać, że materiał odwzorowuje w niej stan i charakter naprężeń sprężystych, a także zmęczeniowych [5, 13, 31,179, 180]. Czułość magnetosprężysta materiału ma swoje odniesienie do wartości mierzonego pola magnetycznego przy powierzchni materiału. Podobne korelacje występują przy badaniu zmęczenia mechanicznego [38, 184, 186], co wykazano eksperymentalnie [184, 186].

#### 1.4. Cel, założenia i zakres pracy

Podstawowym celem pracy jest wykazanie, że wśród metod magnetycznych możliwe jest określenie procedury badawczej dla osiągnięcia celu, jakim jest prognoza stanu elementu. Cel ten można osiągnąć poprzez modyfikację stosowanych metod magnetycznych. W pracy zaprezentowana zostanie metoda magnetyczno-pomiarowa, która polega na analizie zmian natężenia pola magnetycznego przy powierzchni materiału. Warunkiem powodzenia tej metody jest przede wszystkim przyjęcie ściśle określonej bazy pomiarowej. Trzeba dysponować wiedzą o zakresach wartości magnesującego pola magnetycznego, w których występują największe zmiany istotnych parametrów paramagnetycznych materiału (MRMM) zależnych od obciążeń sprężystych i zmęczeniowych.

Procedurę badania stanu materiału metodą magnetyczną rozpoczęto od oceny:

- właściwości fizycznych stali pod względem podatności na badania magnetyczne,
- właściwości materiału wyjściowego,
- odpowiedzi magnetycznej materiału w fazie obciążeń sprężystych,
- odpowiedzi magnetycznej materiału w fazie obciążeń zmęczeniowych,
- użyteczności przetworników pomiarowych,
- czynników wpływających na utratę czułości pomiarowej przetworników,
- zakresów pomiarowych wykluczających możliwość detekcji obciążeń mechanicznych zmęczeniowych.

Zaproponowane postępowanie badawcze oparto na podstawowej tezie o możliwości zastosowania badań magnetycznych w zakresie szczególnych zakresów magnetyzacji ferromagnetyka (natężenia pola magnesującego dla największych zmian magnetyzacji materiału (J<sub>MRM</sub>) do diagnostyki stanu elementu wykonanego z materiału ferromagnetycznego. W zakresie odkształceń sprężystych możliwość prowadzenia badań materiału elementu, determinowana jest wartością współczynnika magnetostrykcji  $\lambda_s$ . Współczynnik ten dla stali konstrukcyjnych i maszynowych jest mały i niekorzystny z punktu widzenia pomiarów magnetycznych stanu naprężenia naprężeń [61].

Po pierwsze należało udowodnić możliwość prowadzenia pomiarów naprężeń dla materiałów ze współczynnikami  $\lambda_s \leq 1$ . Dowód przeprowadzono badając czułość magnetosprężystą stali stosowanej w produkcji kolejowych zestawów kołowych.

Po drugie należało wskazać możliwość powiązania ilościowego i jakościowego zakresu zmian parametrów magnetycznych materiału i zewnętrznego pola magnetycznego z liczbą cykli w procesie cyklicznego obciążenia mechanicznego [13, 31, 87, 112]. W zakresie obciążeń zmęczeniowych osiągnięcie celu było możliwe w wyniku doświadczalnych badań laboratoryjnych.

Ostatni krok to wykazanie, że metoda magnetyczna pozwalająca badać naprężenia i zmęczenie materiału jest równocześnie czułą metodą defektoskopową.

Możliwość stosowania magnetorezystorów do badań defektoskopowych, pomimo ich zdecydowanie niekorzystnych cech konstrukcyjnych [141-144, 123], wykazano na stanowisku doświadczalnym podczas badania osi zestawów kołowych [123-130] oraz w badaniach symulacyjnych. Kolejno wymienione cele cząstkowe i tezy z nimi związane zmierzają do przeniesienia metody na szerszy zakres stali konstrukcyjnych (w energetyce), a tym samym prognozowania niezawodnej pracy elementu. Przeprowadzone badania na grupie stali konstrukcyjnych mają stworzyć podstawy do zaprojektowania oprzyrządowania pomiarowego i aparatury, za pomocą których przeanalizowane zostaną poszczególne fazy obciążeń mechanicznych stali w aplikacjach laboratoryjnych i przemysłowych. Do podstawowych zakresów badawczych podjętych samodzielnie przez autora pracy należy wyznaczenie:

- krzywych pierwotnego magnesowania dla wybranych gatunków stali konstrukcyjnej,
- czułości magnetomechanicznej w zakresie efektu Villariego,
- zakresu największych zmian przenikalności magnetycznej,
- użytecznego zakresu natężenia pola magnesującego,
- granicznego zakresu natężenia pola magnetycznego,
- symulacji magnetomechanicznych i obszaru zastosowań,
- oceny stanu naprężeń w elemencie wykonanym z materiału ferromagnetycznego,
- podstaw magnetycznej diagnostyki stanu,
- praktycznej realizacji diagnostyki stanu zmęczenia mechanicznego elementu ferromagnetycznego.

Dalsza realizacja celu to:

- propozycja metody pomiaru i wybór przetwornika pomiarowego,
- przeprowadzenie symulacji pomiaru,
- ocena ważniejszych przyczyn wpływających na czułość przetworników magnetorezystancyjnych i błąd pomiaru (detekcji),
- wykonanie sondy pomiarowej [154, 167] i urządzenia pomiarowego,
- przeprowadzenie grupy badań aplikacyjnych laboratoryjnych w zakresie wykrywania i pomiaru obciążeń statycznych i dynamicznych, jak i zmęczenia materiału,
- przeprowadzenie badań dla aplikacji przemysłowych w zakresie zmęczenia stali stosowanych w energetyce.

Opracowanie przez autora koncepcji metody badawczej diagnostyki stanu materiału oraz zaproponowanie urządzeń i metodyki pomiarowo-badawczej skraca czas osiągnięcia możliwości oceny ryzyka eksploatacji w zakresie eksploatacji elementów wykonanych ze stali niskowęglowych (np. stosowanych na zestawy kołowe). Osiągnięciem nie do pominięcia jest wskazanie przyczyn trudności stosowania istniejących magnetycznych metod defektoskopowych w badaniu zmęczenia materiału.

#### 1.5. Program badań. Układ pracy

Praca zawiera siedem rozdziałów, zakończenie oraz załączniki, które poszerzają zakresy tematyczne poruszone w poszczególnych rozdziałach, a nie są związane z tematem wiodącym. W rozdziale pierwszym, umiejscowiono problematykę pracy wśród zagadnień diagnostyki technicznej elementów maszyn wykonanych z materiałów ferromagnetycznych, zwracając uwagę na związki przyczynowo-skutkowe, jak materiał i obciążenie oraz stan, wpływające na zastosowania lub ograniczenia metod badawczych. Przedstawiono główne i cząstkowe cele badawcze oraz sposób ich realizacji. Wskazano na niemożliwość rozdzielenia badań magnetycznych od parametrów magnetycznych materiału oraz, co bardzo istotne, podano przyczyny w trudnościach bezpośredniego zastosowania urządzeń defektoskopii magnetycznej w badaniach zmęczenia materiału.

17

Rozdział drugi opisuje właściwości fizyczne, a szczególnie magnetyczne, stali konstrukcyjnych. Wskazuje na ograniczenia badań magnetycznych ze względu na skład chemiczny i właściwości materiału. Dalej opisano na podstawie literatury podstawowe przetworniki pomiarowe [106, 123, 141], umotywowano wybór przetwornika, podano uwarunkowania związane z pomiarem. Wskazano na złożone związki pomiędzy przenikalnością magnetyczną materiału a zewnętrznym polem magnetycznym przy jego powierzchni.

W rozdziale trzecim opisano pomiar krzywych pierwszego magnesowania na specjalnym stanowisku pomiarowym do próbek prętowych. Wyznaczono krzywe dynamiczne przenikalności magnetycznej. Wyniki uzyskano z pomiarów statycznych krzywej magnesowania i przenikalności magnetycznej wykonanych na stanowiskach profesjonalnych. Przebadano główne stale stosowane do produkcji zestawów kołowych. Wyznaczono zakresy maksymalnych zmian czułości piezomagnetycznej materiału. Podano wartości natężenia pola magnetycznego w zakresie największych zmian indukcji magnetycznej materiału i przenikalności magnetycznej dla zakresu obciążeń sprężystych. Wyniki wprowadzono do katalogów materiałowych programów symulacyjnych MES pola magnetycznego FIUX 8.1 i FEMM 3.3. Zastosowane programy symulacyjne porównano (zał. 3).

Rozdział czwarty zawiera unikalne wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez autora monografii, wykazujące korelacje zmian natężenia pola magnetycznego ze stanem dynamicznych odkształceń sprężystych [179]. Wykazano wysoką zgodność przebiegu zmian natężenia pola magnetycznego w czasie ze stanem naprężeń i drgań mierzonych równoległymi metodami badawczymi. Na wybranych przykładach opisano możliwości detekcji stanu naprężeń w elementach utwierdzonych i wirujących [178]. W dalszej części rozdziału podano unikalne przykłady symulacji pomiaru naprężeń powstałe przy wyko-rzystaniu danych materiałowych pomierzonych i wprowadzonych do katalogu materiałów programu symulacyjnego.

Rozdział piąty koncentruje się na układach pomiarowych zaproponowanych przez autora pracy oraz symulacji ich pracy przy wybranych parametrach eksploatacyjnych. Szczególną uwagę zwrócono na trudności prowadzenia badań metodami magnetycznego, jej wartość w stosunku do mierzonej składowej normalnej natężenia pola magnetycznego, jej wartość w stosunku do mierzonej składowej stycznej, wpływającej znacznie na czułość pomiarową przetwornika magnetorezystancyjnego. Przebadano strefy lokalizacji przetwornika MR pod kątem wpływu składowej odmagnesowującej. Podano obszary możliwej lokalizacji przetwornika pomiarowego. Oceniono spadek czułości wpływający na błąd pomiaru przy niezachowaniu odległości pomiaru, która również zmienia udziały składowych natężenia pola magnetycznego. Oceniono błąd powodowany niemożnością zagwarantowania stałej odległości pomiarowej. Podano optymalne zakresy odległości, szerokość szczeliny pomiarowej, odległość przetwornika od powierzchni materiału. Ocenę przeprowadzono na podstawie symulacji w programie FLUX 2/3D i FEMM 3.3. Oprócz zgodności wyników w modułach 2D tych programów wskazano na znaczną przewagę programu FEMM, analizując czas od projektu po wynik obliczeń. Podano przykłady pomiaru i symulacji numerycznej pomiaru.

Rozdział szósty jest zbiorem aplikacji laboratoryjnych wskazujących na możliwości zastosowań przemysłowych. Zawiera przykłady wskazujące na możliwość badania stanu koła zębatego przekładni. Przedstawia magnetyczną kontrolę prawidłowości połączenia wciskowego [189, 193]. Opisuje badania zmęczenia materiału prowadzone w IPPT PAN, a wygłoszone na seminariach organizowanych przez IPPT PAN, dotyczących badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji [182, 191] oraz opublikowanych w pracach naukowych konferencji Narodowego Górniczego Uniwersytetu Ukrainy [186]. Rozdział siódmy przedstawia aplikacje przemysłowe metody. Są to wyniki badań etapu powierzchni tocznej zestawu kołowego. Opisuje praktyczną realizację procesu detekcji fazy zmęczenia materiału jeszcze przed powstaniem pęknięć możliwych do wykrycia metodami defektoskopowymi obecnie dopuszczanymi przez normę, a także badania magnetyczne procesu naprawy lub regeneracji elementów zestawu kołowego na zlecenie i przy współpracy z PKP CARGO S.A.

Praca kończy się podsumowaniem i wnioskami oraz precyzuje kierunki dalszych badań, które wyniknęły podczas realizacji pracy. Załączniki uzupełniają i poszerzają zagadnienia głównego zakresu pracy.

#### 2. PODSTAWY TEORETYCZNE I BAZA POMIAROWA

Badanie stanu elementu ferromagnetycznego polega na pomiarze natężenia zewnętrznego pola magnetycznego przy powierzchni elementu namagnesowanego od przyłożonego źródła pola magnetycznego. Namagnesowanie elementu ferromagnetycznego zależne jest od wielu czynników zewnętrznych, szczególnie mechanicznych i termicznych, wpływających na parametry magnetyczne materiału. Wartość pomierzonego natężenia pola magnetycznego jest funkcją zmian struktury i ciągłości materiału. Zapewnia to możliwość realizacji badań obciążeń sprężystych i zmęczeniowych aż po uszkodzenie elementu (lokalna utrata ciągłości), jak przedstawia schemat (rys. 2.1).





Pomiaru zewnetrznego pola magnetycznego dokonujemy za pomocą przetworników pomiarowych magnetorezystancyjnych, hallotronowych lub indukcyjnych. Badanie wpływu obciążeń sprężystych i zmęczeniowych realizujemy za pomocą pomiaru składowej stycznej nateżenia pola magnetycznego przy powierzchni materiału. Ponieważ wartość natężenia pola magnetycznego maleje z potęgą trzecią w funkcji odległości, dlatego przetwornik pomiarowy musi być usytuowany jak najbliżej powierzchni. Najbardziej odpowiedni byłby hallotron o konstrukcji umożliwiającej pomiar składowej stycznej w stosunku do jego struktury pomiarowej. Wobec braku dostępności tego typu przetworników wybrano przetwornik magnetorezystancyjny serii KMZ, firmy PHILIPS. Podstawową wadą wymienionych przetworników jest silny wpływ składowej odmagnesowującej na spadek ich czułości pomiarowej, jak i samą możliwość pomiaru. Użyteczność przetworników KMZ do pomiaru składowej stycznej przy nieznacznym udziale składowej odmagnesowującej pola odmagnesowującego potwierdzono eksperymentalnie. W badaniach defektoskopowych ze względu na znaczny udział tej składowej należałoby stosować przetwornik hallotronowy, jednak, jak wykazały eksperymenty, stosowanie magnetorezystorów serii KMZ w detekcji nieciagłości materiału jest także możliwe.

#### 2.1. Podstawy fizyczne i materiałowe badań magnetycznych zmęczenia mechanicznego stali konstrukcyjnych niskowęglowych i niskostopowych

Stal konstrukcyjna ze względu na dobre właściwości mechaniczne jest podstawowym materiałem stosowanym w technice. Stopy żelaza, będące w większości przypadków magnetyczne, diagnozować można także magnetycznie, nie wykluczając innych metod. Wielkościami magnetycznymi fizycznymi czułymi na strukturę realną materiału są przede wszystkim:

- przenikalność magnetyczna początkowa i maksymalna,
- natężenie koercji,
- straty histerezowe,
- straty wiroprądowe,
- straty relaksacyjne.

Zmienność parametrów magnetycznych materiału od temperatury jest na tyle istotna, że w fundamentalnym dziele: "Ferromagnetyzm" Bozorth wskazał, że obok naprężeń, temperatura jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na jego parametry. Zmienność przenikalności materiału w danej ustalonej temperaturze [97] może być wywołana między innymi:

- procesem obróbki plastycznej,
- procesem obróbki cieplnej,
- szybkością chłodzenia,
- czynnikiem chłodzącym,
- relaksacją naprężeń,
- czasem starzenia,
- obciążeniami sprężystymi i zmęczeniowymi.

Metodę magnetyczną można stosować do analizy struktury realnej oraz wyznaczania faz w stopach żelaza. Istnieje wiele odmian tej metody, w których wykorzystuje się odpowiednią wielkość fizyczną lub przebieg danego zjawiska. Stosowane są urządzenia oparte na pomiarze:

- przenikalności magnetycznej,
- magnetyzacji nasycenia,
- magnetycznego pola rozproszenia,
- strat magnetycznych.

Przenikalność magnetyczna ferromagnetyka zależy od wielu czynników wewnętrznych. W materiałach magnetycznych z anizotropią magnetyczną, a do takich zaliczyć można stale konstrukcyjne, przenikalność magnetyczna względna opisana jest zależnością [112–114]:

$$\mu_{r} = \frac{12J_{s}^{2} \delta k_{B}T}{24\mu_{0}k_{B}T \left[ K_{ef} + \frac{3}{2}\lambda_{ef}\sigma \right] + pw^{2} \operatorname{cl}\left[1 - e^{-t/\tau}\right]},$$
(2.1)

- gdzie:  $J_s$  magnetyzacja nasycenia,
  - T temperatura termodynamiczna,
  - $x_B$ stała Boltzmanna,
  - grubość efektywnej ścianki domenowej,
  - szerokość domeny,
  - $\mu_0$  stała magnetyczna,
  - $K_{ef}$  efektywna stała anizotropii magnetokrystalicznej,
  - $\lambda_{ef}$  efektywny współczynnik magnetostrykcji,

- σ naprężenie mechaniczne,
- p parametr zależny od rodzaju ścianki domenowej,
- stężenie elementów oddziałujących z wektorem spontanicznej magnetyzacji (mogą to być atomy międzywęzłowe węgla, azotu, tlenu),
- w stała oddziaływania danego elementu z wektorem magnetyzacji spontanicznej,
- t czas liczony od momentu rozmagnesowania (redystrybucji elementów porządkujących się kierunkowo),
- $\tau$  czas relaksacji dojścia do stanu równowagi.

Jak widać ze wzoru (2.1), także budowa domeny magnetycznej wpływa na przenikalność magnetyczną materiału.

W stalach konstrukcyjnych oprócz zmian parametrów magnetycznych od zewnętrznych czynników mechanicznych (w granicach odkształceń sprężystych) występują przemiany fazowe powodowane odkształceniami plastycznymi. W stalach austenityczno-martenzy-tycznych (A+M) dochodzi nieraz do wydzielenia fazy martenzytycznej. Spodziewane zmiany przenikalności magnetycznej materiału i natężenia koercji mogą zostać zakłócone lokalnymi przemianami fazowymi, zmieniającymi diametralnie namagnesowanie.

Dla fazy amorficznej stała anizotropii magnetokrystalicznej  $K_{ef}$  jest zazwyczaj równa zero. W przypadku gdy mamy do czynienia z fazą amorficzną i krystaliczną oraz gdy rozmiary fazy krystalicznej są mniejsze od długości oddziaływania wymiennego  $L_{wym}$ , wówczas [43, 69]:

$$K_{ef} = \frac{K_1^4 d^6}{4^3},$$
 (2.2)

gdzie:  $K_1$  – stała anizotropii magnetokrystalicznej fazy krystalicznej,

- d średnia średnica fazy krystalicznej,
- A stała oddziaływania wymiennego;

gdy występuje tylko faza krystaliczna, wówczas  $K_{\rm ef} = K_1$ .

Parametry magnetyczne zależą od składu chemicznego [115], struktury realnej, temperatury i obróbki cieplnej. Na przykład skład chemiczny w stopach Fe-Cr-Ni silnie wpływa na ich skład fazowy (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Skład fazowy stopów Fe-Cr-Ni Fig. 2.2. Diagram of phase composition Fe-Cr-Ni

gdzie: równoważnik chromu:

$$Cr_{F} = 1 \times %Cr + 1 \times %Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb + ...(\%Ti, W, Ta, Al),$$
 (2.3)

21

a równoważnik niklu dany jest zależnością:

$$Ni_E = 1 \times \% Ni + 30 \times \% C + 1.5 \times \% Si + 0.5 \times \% Mn + ...(\% Co, N).$$
(2.4)

Procentową zawartość ferrytu  $k_f$  w stopach austenitycznych można obliczyć ze wzoru:

$$f = \frac{J_w}{V_p} - J_a$$

$$J_{sf} - J_a$$

$$(2.5)$$

gdzie:  $J_a$  – magnetyzacja austenitu (2,31·10<sup>-4</sup> T),

 $V_{\rm p}$  – objętość materiału,

 $J_{\rm sf}$  – magnetyzacja ferrytu,

 $j_w$  – dipolowy moment magnetyczny.

Zawartość ferrytu w stali austenitycznej ma silny wpływ na jej plastyczność i na namagnesowanie. Obciążenia zmęczeniowe materiału, a także obciążenia zmęczeniowe współpracujących powierzchni mogą być przyczyną zmiany fazy materiału, która wpływa na właściwości mechaniczne oraz magnetyczne materiału [107, 108, 145].

Magnetyzacja nasycenia ferrytu zależy od składu chemicznego. Zazwyczaj przyjmuje się liniową zależność od zawartości poszczególnych pierwiastków zgodnie ze wzorem [115]:

$$J_{sf} = 2,16 - 0,32\%C - 0,41\%N - 0,077\%Si - 0,03\%Mo - 0,02\%Mn - 0,04\%Cr - 0,034\%Ni - 0,18\%W - 0,16\%Ti.$$
(2.6)

Wypadkowy dipolowy moment magnetyczny jw można wyznaczyć za pomoca wagi magnetycznej:

$$F = j_w \frac{\partial H}{\partial z}, \qquad (2.7)$$

gdzie: F – siła działająca na próbkę,

# $\frac{\partial H}{\partial z}$ – gradient składowej z pola magnetycznego.

Dipolowy moment magnetyczny przypadający na jednostke objętości próbki jest w przybliżeniu liniowo zależny od zawartości procentowej ferrytu. Zawartość ferrytu można także określić z magnetycznego pola rozproszenia w pobliżu punktu remanencji.

$$k_f = \frac{J_r}{V_p \cdot J_{rf}} 100\% , \qquad (2.8)$$

gdzie:  $k_{\rm f}$  – procentowa zawartość ferrytu,

 $V_{\rm p}$  – objętość próbki,

 $J_{\rm rf}$  – magnetyzacja ferrytu w pobliżu remanencji,

 $j_r$  – wypadkowy dipolowy moment magnetyczny w pobliżu punktu remanencii.

Magnetyzacja ferrytu J<sub>rf</sub> w pobliżu remanencji jest proporcjonalna do magnetyzacji nasycenia ferrytu J<sub>sf</sub> i jest zależna od geometrii próbki poprzez współczynnik C zgodnie z zależnością:

$$J_{rf} = C \cdot J_{sf} \quad . \tag{2.9}$$

Procent ferrytu wyznaczamy ze wzoru:

$$k_f = \frac{j_r}{V_p \cdot C \cdot J_{sf}} \, \% \, . \tag{2.10}$$

Stale węglowe niskostopowe stosowane w kolejnictwie mogą mieć strukturę dwufazową, na przykład austenityczno-martenzytyczną. Pojawienie się fazy martenzytycznej w materiale obciążanym mechanicznie jest wczesną informacją o postępującym procesie destrukcji materiału. Twarde i kruche strefy martenzytyczne w obecności materiału sprężystego będą na pewno przyczyną pękania elementu materiału podczas jego dalszej eksploatacji.

Kolejnym istotnym parametrem magnetycznym umożliwiającym badanie stali konstrukcyjnych jest natężenie koercji. Wzrost natężenia pola koercji związany jest zazwyczaj ze spadkjem przenikalności magnetycznej materiału. Natężenie koercji związane jest z mikrostrukturą materiału i strukturą domenową. Natężenie pola koercji  $H_{\rm C}$  zależy w następujący sposób od stałej anizotropii magnetokrystalicznej  $K_1$ , magnetyzacji spontanicznej  $J_s$  [112 – 115]:

$$H_{c} = \frac{2K_{1}}{\mu_{0}J_{s}}a - N_{ef} \cdot \frac{J_{s}}{\mu_{0}},$$
(2.11)

gdzie parametry a i Nef zależą od struktury domenowej i mikrostruktury materiału.

Zmiany nateżenia pola koercji mogą także pochodzić od nierówności powierzchni ferromagnetyków [112-115]:

$$H_{e}^{pow} = \frac{\pi \cdot h_{l} \cdot \gamma}{J_{sp} \cdot h_{0} \cdot l},$$
(2.12)

gdzie: y – energia ścianki domenowej na jednostkę powierzchni,

 $h_0$  – średnia grubość materiału,

 $h_1$  – amplituda zmian grubości,

- l długość fali nierówności,
- $J_{sp}$  magnetyzacja spontaniczna.

W materiałach ferromagnetycznych, a także w stalach konstrukcyjnych istnieje związek pomiędzy podatnością magnetyczną ( $\chi_w = \mu_w - 1$ ) a natężeniem pola koercji. Związek ten jest dla danego materiału wielkością stałą, jak podaje zależność [66, 68]:

$$\cdot H_C = const. \tag{2.13}$$

Jeżeli uwzględnimy istotny wpływ struktury domenowej (2.1) poprzez efektywną grubość ścianek domenowych  $\delta$  i średnią szerokość domen L, to zależność (2.13) przyjmie postać [69]:

x.

$$H_C \le J_s \cdot \frac{\delta}{L},\tag{2.14}$$

gdzie  $J_s$  –magnetyzacja nasycenia.

Zależność ta może być wyznacznikiem procesu zmęczenia. Wraz z procesem zmęczenia wartość iloczynu  $\chi$  i  $H_c$  ulega zmianie. W badaniach przemysłowych podatność magnetyzacji r można kontrolować pośrednio poprzez pomiar zmian namagnesowania. W pracy do oceny stopnia zmęczenia materiału D<sub>M</sub> zaproponowano modyfikację zależności (2.14) w postaci wzoru [195]:

$$D_M = k \frac{\mu_r}{H} = f(\varepsilon, L_{(\sigma)}), \qquad (2.15)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – odkształcenia plastyczne,

- $L_{(\sigma)}$  liczba cykli zmęczeniowych,
- $H_{\rm c}$  natężenie koercji,
- µr magnetyczna przenikalność względna materiału,
- k współczynnik proporcjonalności.

Przedstawiona zależność umożliwiła stworzenie magnetycznej krzywej zmęczenia materiału, ułatwiającej badanie aktualnego stanu elementu i przewidywania jego trwałości.

Współczynnik  $D_{\rm M}$  opisuje proces zmęczenia z większą rozdzielczością aniżeli parametr przenikalności magnetycznej  $\mu$ , ma jednak głównie zastosowanie laboratoryjne. Obróbka plastyczna (walcowanie), a także i odkształcenia plastyczne wpływają zasadniczo na oba wymienione parametry magnetyczne. Na rysunku 2.3 przedstawiono wpływ odkształcenia plastycznego w słabych polach magnetycznych na  $H_c$  i  $\mu_r$  w żelazie elektrolitycznym [112, 115].



*Rys.* 2.3.  $H_c$  i  $\mu_r$  w funkcji odkształcenia plastycznego Fig. 2.3.  $H_c$  i  $\mu_r$  as function of plastic deformation

Podobna zależność występuje wraz z rozwojem procesu zmęczenia materiału od obciążeń cyklicznie zmiennych [38, 184, 186]. Umożliwia opis procesu zmęczenia materiału poprzez kontrolę zmian parametrów przenikalności magnetycznej i natężenia koercji. W miarę rozwoju procesu zmęczenia natężenie koercji wzrasta, a przenikalność materiału maleje. Dla każdego gatunku stali procesy te przebiegają odmiennie. Związki te są potwierdzeniem słuszności zaprezentowanej w pracy metody jako jednej z możliwych do zastosowan przemysłowych badań magnetycznych. Nie wykluczają znaczenia i użyteczności metod wiroprądowych czy emisji magnetyczno-akustycznej, jeżeli powiązane zostaną ze zmianami parametrów magnetycznych i mechanicznych materiału.

#### 2.2. Efekty magnetyczne Joule'a i Villariego stanów sprężystych materiału

Ferromagnetyk lub ferrimagnetyk poddane działaniu pola magnetycznego podlegają zmianom długości  $\Delta l/l = \lambda$ , a w zakresie magnetyzacji nasycenia o  $\lambda_s$ . Dla magnetyków miękkich magnetycznie zmiany te wahają się w granicach od 35 µm/m do 100 µm/m. Dla dużych natężeń pól magnetycznych lub nowych materiałów [46] współczynnik ten dochodzi do 2000 µm/m. Efekt ten został odkryty przez Joule'a w 1842 roku i znany jest pod nazwą magnetostrykcja [13]. Oprócz zmian długości w ferromagnetykach występują równolegle zmiany objętości  $\Delta V/V$ . Magnetostrykcja związana jest także z efektem zmiany modułu sprężystości  $\Delta E$ . W zakresie odkształceń sprężystych naprężenia w metalach magnetycznych są ściśle powiązane z magnetostrykcją. Zależność ta zanika lub ulega znacznemu ograniczeniu w wyniku naprężeń wywołanych odkształceniami plastycznymi takimi jak: tłoczenie, cięcie, prostowanie i gięcie.

Efekt magnetostrykcji osiąga swą maksymalną wartość [13, 87] przed nasyceniem namagnesowania. W zależności od materiału występuje on w granicach 70-80 % nasycenia.

W materiałach z dodatnim współczynnikiem magnetostrykcji magnetyzacja zwiększa się przy rozciąganiu, a zmniejsza przy ściskaniu. W materiałach z ujemną magnetostrykcją zjawisko następuje odwrotnie. Typowym przykładem materiału o dodatnim współczynniku magnetostrykcji jest żelazo, a z ujemnym współczynnikiem  $\lambda$  – nikiel [13, 31, 87]. Zjawisko magnetostrykcji uzależnione jest od składu chemicznego i budowy materiału. Efektywny współczynnik magnetostrykcji można opisać w następującej postaci [115]:

$$\lambda_{ef} = \alpha \cdot \lambda_s^c + (1 - \alpha) \cdot (\lambda_{so}^{am} + k\alpha) + \alpha \cdot \lambda_s^s \cdot \frac{S}{V}, \qquad (2.16)$$

gdzie:  $\alpha$  – ułamek objętościowy fazy krystalicznej,

S/V – powierzchnia właściwa fazy krystalicznej,

 $\lambda_s^c$  – współczynnik magnetostrykcji fazy krystalicznej,

- $\lambda_{so}^{am}$  współczynnik magnetostrykcji fazy amorficznej,
- k parametr zmian fazy amorficznej podczas krystalizacji,
- $\lambda_s^s$  współczynnik magnetostrykcji oddziaływania powierzchniowego.

Energia magnetycznego oddziaływania atomów zależy od kierunków osi krystalograficznych kryształów. Rozmieszczenie magnetycznych momentów, obszaru namagnesowania samorzutnego w krysztale jest różne w poszczególnych materiałach. Dla żelaza kierunek ten jest zgodny z osią <000>, dla niklu <111>. Magnetostrykcja kryształów o strukturze regularnej rozróżnia współczynniki magnetostrykcji liniowej dla kierunków określonych osiami krystalograficznymi. Dla kierunków krystalograficznych <100> i <111> współczynniki magnetostrykcji w materiałach izotropowych wynoszą odpowiednio [13, 31]:

$$\lambda_{<100>} = \frac{2AJ_s^2}{G}, \qquad (2.17)$$

$$\lambda_{<111>} = \frac{4AJ_s^2}{3G},\tag{2.18}$$

gdzie: G-moduł sprężystości dla ścinania,

A – stała zależna od struktury kryształu (A = 0,4 dla sieci przestrzennie centrowanej),

 $J_{\rm s}$  – magnetyzacja nasycenia,

 $\lambda_{<100>}$ ,  $\lambda_{<111>}$  oznaczają maksymalne wartości magnetostrykcji określone dla kierunków krystalograficznych <100> i <111>.

W uproszczeniach prowadzących do opisu materiału izotropowego, w którym  $\lambda_{<100>} = \lambda_{<111>} = \lambda_s$ , jak (permaloj o zawartości 60% Ni) współczynnik magnetostrykcji podany jest wzorem (2.19).

$$\lambda = \frac{dl}{l} = \frac{3}{2} \lambda_{<100>} \left( \cos^2 \varphi - \frac{1}{3} \right),$$
(2.19)

gdzie:  $\cos\varphi = a_1\beta_{1+}a_2\beta_{2+}a_3\beta_3$  – wartość cosinusa dla kąta pomiędzy wektorem magnetyzacji, a kierunkiem pomiaru magnetostrykcji,

 $\alpha_i$  i  $\beta_i$  – cosinusy kierunkowe w stosunku do osi układu współrzędnych.

Energia magnetosprężysta opisana jest wzorem:

$$E_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \varphi \,, \tag{2.20}$$

gdzie: λ<sub>s</sub>-współczynnik magnetostrykcji nasycenia,

 $\sigma$ – naprężenie,

 $\varphi$  – kąt między wektorem magnetyzacji nasycenia  $J_{\rm s}$ a osią kierunku naprężeń  $\sigma$ .

Zjawiskiem odwrotnym do magnetostrykcji jest konwersja magnetosprężysta, polegająca na zmianie parametrów magnetycznych ferromagnetyków pod wpływem naprężeń zewnętrznych. Zależność ta, związana z ferromagnetykami, nazwana od odkrywcy efektem Villariego, umożliwia pomiar obciążeń mechanicznych w elementach maszyn. W określonym zakresie natężeń pola magnetycznego i naprężeń efekt Vilariego jest odwrotnością efektu Joule'a. Wartość współczynnika magnetostrykcji opisuje podatność materiału do badań magnetycznych naprężeń. Zmiany przenikalności materiału od obciążeń sprężystych wyprowadzane są z zachodzących w materiale procesów energetycznych [46, 61].

Efekt Villariego zdefiniowany jest jako stosunek energii sprężystości  $E_{\sigma}$  do całkowitej zawartej energii  $E_{c}$ , wraz z energią pola magnetycznego w badanej próbce ferromagnetyka. Stosunek ten jest nazwany współczynnikiem magnetomechanicznym i przyporządkowano mu oznaczenie  $K_{33}$  [46].

$$K_{33} = \frac{E_{\sigma}}{E_{c}} = \frac{E_{\sigma}}{E_{H} + E_{\sigma} + E_{K} + E_{u} + E_{N}},$$
(2.21)

- gdzie:  $E_H$  energia pola magnetycznego (proporcjonalna do natężenia pola i polaryzacji magnetycznej),
  - $E_{\sigma}$  energia magnetosprężysta (związana z magnetostrykcją  $\lambda_s$  i naprężeniami  $\sigma$ ),
  - $E_K$  energia anizotropii magnetycznej zawarta w budowie kryształu,
  - $E_{\rm u}$  jednoosiowa energia anizotropii,
  - $E_{\rm N}$  energia anizotropii kształtu,
  - E<sub>c</sub> energia całkowita.

Uwzględniając przeważający udział energii magnetosprężystej i energii pola magnetycznego nad pozostałymi składnikami, wzór 2.21 przyjmuje postać uproszczona:

$$K_{33} = \frac{E_{\sigma}}{E_{\sigma} + E_H},\tag{2.22}$$

$$E_H = -J_s H \cos\varphi \tag{2.23}$$

$$E_{\sigma} \approx \frac{3}{2} \lambda_{S} \sigma \sin^{2} \varphi, \qquad (2.24)$$

gdzie  $\varphi$  – kąt między magnetyzacją a kierunkiem naprężeń.

Po przekształceniu wzoru (2.22), otrzymamy następującą zależność:

$$\approx \frac{1}{\mu_r} \frac{J_s^2}{3\lambda_s \mu_0} , \qquad (2.24a)$$

(2.26)

gdzie:  $J_s$  – magnetyzacja nasycenia,

 $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni (współczynnik magnetyczny).

Po przekształceniu otrzymamy zależność na przenikalność względną:

$$\mu \approx \frac{J_s^2}{3 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_s \cdot \sigma} = \frac{J_s^2}{3 \mu_0 \lambda_c E_V} \frac{1}{\varepsilon} , \qquad (2.25)$$

gdzie:  $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna,

 $E_Y$  – moduł Younga,

 $\varepsilon$  – odkształcenie wzdłużne,

 $\lambda_s$  – współczynnik magnetostrykcji.

Zapis termodynamiczny omawianych zależności przedstawia równanie [5]:

$$\left(\frac{\partial l}{\partial H}\right)_{\sigma} = \left(\frac{\partial B}{\partial \sigma}\right)_{H} = d \; .$$

27

Zmiany magnetyzacji J lub indukcji magnetycznej B od naprężeń  $\sigma$  są równoważne zmianom odkształceń magnetostrykcji  $\lambda = \Delta l/l$  od zmian natężenia pola magnetycznego H. Związki te definiują czułość "piezomagnetyczną" d materiału [56–60]. Zależnie od znaku magnetostrykcji kierunek działania sił może zmniejszać lub zwiększać magnetyzację.

Odwracalne zmiany magnetosprężyste występują w ograniczonym zakresie we wszystkich materiałach spolaryzowanych magnetycznie, wykazujących magnetostrykcję. Złożone przeliczenia termodynamiczne [59–60], opisane podstawową zależnością (2.12), sprowadzają się do wykazania tożsamości:

 $d \equiv \lambda . \tag{2.27}$ 

Współczynnik magnetostrykcji  $\lambda$  jest równoważny współczynnikowi czułości *d*. Wpływ naprężeń na związki magnetomechaniczne materiału (o magnetostrykcji dodatniej i ujemnej) dla czystego Ni oraz stopu 68% NiFe [46] pokazano na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Pętle histerezy magnetycznej Fig. 2.4. Magnetic hysteresis loop

Współczynniki magnetostrykcji stopów żelazo - nikiel uzyskiwały maksymalny współczynnik magnetostrykcji  $24\cdot10^{-6}$  przy zawartości 20% lub 40 % niklu. Współczynniki magnetostrykcji współczesnych materiałów sięgają rzędu 2000 $\cdot10^{-6}$ . Zestawienia ważniejszych pierwiastków i materiałów o wysokich i bardzo wysokich współczynnikach magnetostrykcji [46, 87] zamieszczono w tabelach 2.2 i 2.3. Materiały, o których jest mowa w opracowaniu, są materiałami konstrukcyjnymi o współczynnikach magnetostrykcji <  $2\cdot10^{-6}$ . Współczynniki magnetostrykcji żelaza technicznego są zależne od jego czystości i zmieniają się nieliniowo od 0,58 $\cdot10^{-6}$  do 4,40 $\cdot10^{-6}$  dla żelaza elektrolitycznego przy liniowym wzroście natężenia pola magnetycznego magnesującego [87]. Wpływ zanieczyszczeń jest także istotny. Dla żelaza technicznego o zanieczyszczeniach w przedziale od 0,3% do 0,4% współczynnik magnetostrykcji może wzrosnąć do 5,31 $\cdot10^{-6}$ . Pierwiastki stopowe krzemu i węgla zmieniają współczynnik magnetostrykcji. Dla zawartości krzemu od 2% do 8% dla osi krystalograficznych [13] współczynnik magnetostrykcji zmienia się od 27 $\cdot10^{-6}$  do  $-9\cdot10^{-6}$  [13, 31]. Obróbka cieplna, obróbka plastyczna, temperatura materiału także wpływają na wartość współczynnika magnetostrykcji [13, 87].

Cyklicznemu obciążeniu materiałów w zakresach naprężeń zmęczeniowych towarzyszą zmiany własności fizycznych. Zjawiska fizyczne, towarzyszące procesowi zmęczenia, wymagają wydatku energetycznego wyrażonego równaniem (2.28) [61]:

$$\Delta E_f = \Delta E_{mech} + \Delta E_{entr} + \Delta E_{mag} + \Delta E_{cros}, \qquad (2.28)$$

#### gdzie: $\Delta E f$ – jednostkowa energia procesu zmęczenia,

- $\Delta E_{\rm mech}$  energia przemian mechanicznych,
- $\Delta E_{entr}$  energia przepływu strumienia cieplnego,
- $\Delta E_{mag}$  energia przepływu pola magnetycznego,

 $\Delta E_{cross}$  – energia oddziaływania efektu magnetomechanicznego (Vilariego).

Jeżeli analizie energetycznej procesu zmęczenia poddać znormalizowaną próbkę (czystego żelaza lub niklu) badaną na stanowisku laboratoryjnym, a zmęczeniową liczbę cykli zadać w przeciągu godzin lub dni, to przeniesienie metody badawczej na obiekt rzeczywisty eksploatowany i obciążany w okresach lat lub dziesięcioleci jest w zasadzie niemożliwe. Energia przemian mechanicznych i cieplnych zachodzących w obiekcie nie jest do odtworzenia. Badanie składnika  $\Delta E_{cross}$  pod kątem zmian zależności magnetomechanicznych wymagałoby wprowadzenia w obiekt wzorcowych obciążeń mechanicznych i opracowania metod pomiaru zmian magnetycznych materiału. W przeważającej mierze, wynikającej z potrzeb przemysłowych, metodyka ta jest nieużyteczna.

#### 2.3. Pole magnetyczne przy powierzchni materiału ferromagnetycznego

Zmiana parametrów magnetycznych materiału (od naprężeń sprężystych i zmęczeniowych) przy niezmiennym zewnętrznym polu magnetycznym przejawia się zmianą namagnesowania, a szczególnie zmianą składowej stycznej natężenia pola magnetycznego przy powierzchni materiału.

Problem ten uwzględniono przy konstruowaniu przetwornika pomiarowego służącego do wykrywania zmian natężenia pola magnetycznego od obciążeń sprężystych i zmęczeniowych. Poświęcono im wiele eksperymentów symulacyjnych i technicznych [154–161]. Podczas badań element magnesowany jest zewnętrznym polem magnetycznym  $H_{zew}$  i osiąga namagnesowanie *M*. Różnica pomiędzy stycznymi natężenia pola *H* i namagnesowania *M* przy powierzchni materiału to efekt będący reakcją materiału na zmiany magnesowania. Schemat blokowy badania faz stanu obciążeń mechanicznych materiału w nieniszczącej metodzie magnetycznej przedstawia rysunek 2.5.



#### Rys. 2.5. Schemat blokowy badania stanu ferromagnetyka Fig. 2.5. Diagrams of ferromagnetic state investigation

W każdym przypadku pomiar przeprowadzany jest na granicy ośrodków, tj. powietrza i ferromagnetyka (materiału badanego elementu). Zasady pomiaru składowych pola magnetycznego na granicy ośrodków oparte są na prawach magnetyzmu. Jeżeli przenikalności magnetyczne na granicy ośrodków wynoszą odpowiednio  $\mu_1$  i  $\mu_2$ , to moduły i kierunki wektorów indukcji oraz natężenia pola magnetycznego ulegają zmianie [41, 116]. Niezmienne pozostają składowe normalne indukcji magnetycznej: 29

 $B_{1n} = B_{2n}$ 

oraz składowe styczne natężenia pola magnetycznego:

$$H_{2t}$$
. (2.30)

Linie pola magnetycznego przechodząc z jednego ośrodka do drugiego ulegają załamaniu, a tangensy kątów z obu stron granicy ośrodków spełniają równość:

 $H_{1} =$ 

$$\frac{g\alpha_1}{g\alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$
 (2.31)

Jak wspomniano, w rozpatrywanych przypadkach ośrodkami są powietrze ( $\mu_1$ ) i materiał (stal) ( $\mu_2$ ), zatem:

$$g\alpha_1 \ll tg\alpha_2. \tag{2.32}$$

Zasadę ciągłości składowych normalnych indukcji magnetycznej i składowych stycznych natężeń pola magnetycznego na granicy ośrodków o przenikalności magnetycznej  $\mu_1$  i  $\mu_2$  przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Składowe wielkości pola magnetycznego na granicy dwóch ośrodków Fig. 2.6. Components of magnetic field at boundary of two mediums

Magnetorezystancyjny mostkowy przetwornik pomiarowy serii KMZ, usytuowany równolegle nad powierzchnią ferromagnetyka, przetwarza natężenie składowej stycznej zewnętrznego pola magnetycznego zależne od wartości składowej stycznej natężenia pola pod powierzchnią. Każdy pomiar zakłócony może być udziałem składowej ortogonalnej pola magnetycznego (rys. 2.7). Prawo ciagłości składowej stycznej umożliwia korelację wyników pomiaru natężenia pola magnetycznego przy powierzchni ze zmianami magnetomechanicznymi magnesowanego materiału. Taką zasadę pomiarową zastosowano w pomiarach sił i naprężeń w ferromagnetykach oraz w szeroko rozumianej diagnostyce technicznej.

Badanie magnetycznego pola rozproszenia od wad ciągłości w materiale ferromagnetycznym związane jest z pomiarem składowej normalnej natężenia pola magnetycznego. Badania defektoskopowe wymagają stosowania przetworników hallotronowych. Przeprowadzone badania wykazały możliwość zastosowania przetworników magnetorezystancyjnych do detekcji wad ciągłości od 0,001 mm, przy czym długość wady musi być większa od 2 mm. Przetworniki magnetorezystancyjne, pomimo ich cech konstrukcyjnych ograniczających zastosowanie, charakteryzują się dostateczną czułością w wykrywaniu magnetycznego pola rozproszenia, zbliżoną do metod magnetycznych fluorescencyjno proszkowych.

W pomiarze magnetycznego pola rozproszenia istotne jest odmagnesowanie elementu. Jeżeli element wykonany z materiału ferromagnetycznego magnesowany jest zewnętrznym polem magnetycznym  $H_z$ , np. od magnesów sondy, zostaje namagnesowany do wartości  $H_w$  podanej wzorem [100]:

$$H_{w} = H_{z} - N \cdot J = \frac{H_{z}}{1 + (\mu_{z} - 1) \cdot N},$$
(2.33)

gdzie: N - współczynnik odmagnesowania,

- J magnetyzacja materiału,
- $\mu_{\rm r}$  przenikalność materiału,
- $H_z$  natężenie zewnętrznego pola magnetycznego,
- H<sub>w</sub> natężenie pola magnetycznego w badanej próbce.



Rys. 2.7. Pole magnetyczne w strefie pomiaru Fig. 2.7. Magnetic field in measure zone

Wartości współczynników odmagnesowania N istotne w pomiarach są trudne do wyznaczenia [53]. Złożoność kształtów elementów maszyn uniemożliwia proste analityczne wyznaczanie współczynnika odmagnesowania. Na wynik namagnesowania mają wpływ przenikalność kształtu i przenikalność ciała [100]. Dla ferromagnetyków o  $\mu_r <<$ ,1 przenikalność ciała opisana jest zależnością:

$$\mu_{r(k)} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_r} + \frac{1}{m}},$$
(2.34)

gdzie:  $\mu_{r(k)}$  – przenikalność ciała związana z kształtem, wymiarem i kierunkiem magnesowania,

m = 1/N -przenikalność kształtu.

Przenikalność kształtu jest granicą, jaką może osiągnąć przenikalność ciała, gdy  $\mu \rightarrow \infty$ . Pole magnetyczne pośredniczy w procesie pomiaru naprężeń, detekcji procesów zmęczenia materiału czy badaniu nieciągłości. Sonda pomiarowa jest detektorem zmian magnetycznych w materiale. W celach pomiaru należy wyznaczyć korelacje pomiędzy polem magnetycznym a stanem elementu i dla każdego przypadku przeprowadzić skalowanie. Zasadniczą cechą diagnostyki magnetycznej czy wibroakustycznej nie jest sam pomiar wartości sygnałów diagnostycznych, lecz porównywanie przebiegu pomiarowego z jego wzorcem dla obiektu sprawnego [3]. Porównywanie może być prowadzone za pomocą analizy amplitudowo-częstotliwościowej czy analizy falkowej. W badaniach magnetycznych wystarczające jest porównywanie amplitud wartości mierzonego pola magnetycznego dla danej lokalizacji na powierzchni badanej.

#### 2.4. Zakresy namagnesowania materiału

Podczas badań elementów maszyn metodami magnetycznymi spotykamy materiały o bliżej nieokreślonym składzie i obróbce plastycznej, a tym samym parametrach magnetycznych. Zakres namagnesowania materiału i znajomość tego zakresu są bardzo ważne, ponieważ decydują o możliwości stosowania metody magnetycznej. Waga zagadnienia namagnesowania materiału przedstawiona zostanie na przykładzie żelaza elektrolitycznego. W tabeli 2.1 zamieszczono zakresy zmian niektórych parametrów fizycznych charakteryzujących odkształcenia plastyczne żelaza elektrolitycznego [112 – 115].

Tabela 2.1

Zmienność parametrów fizycznych materiału w procesie odkształcenia plastycznego

| Wielkość fizyczna   | Oznaczenie       |             | Reakcja j   | oarametru |        | Czułość      |  |
|---|------------------|-------------|-------------|-----------|--------|--------------|--|
| T ALL   |                  | %           |             |           |        | parametru    |  |
| Odkształcenie plastyczne  | 3                | 20 1        | 40↑         | 60 1      | 80 1   | * →<br>***** |  |
| Przenikalność magnetyczna   | μ                | 25↓         | 31↓         | 41↓       | 47↓    | ***          |  |
| Natężenie koercji   | H <sub>c</sub>   | 50↑         | 66 ↑        | 71 ↑      | 108↑   | ***          |  |
| Magnetyzacja nasycenia  | Js               | 0,01↓       | 0,02↓       | 0,03↓     | 0,04↓  | *            |  |
| Masa właściwa   | d                | 0,0003<br>↓ | 0,0009<br>↓ | 0,007↓    | 0,013↓ | *            |  |
| Elektryczny opór właściwy   | ρ                | 61          | 11 1        | 181       | 23 ↑   | **           |  |
| Mikrotwardość   | HV               | 14 1        | 36↑         | 53↑       | 71 ↑   | ***          |  |
| Kwadrat szerokości linii dyfrakcyjnych<br>promieni rentgenowskich | $\Delta^2$       | 88 ↑        | 178 ↑       | 256 ↑     | 344 ↑  | ****         |  |
| Magnetyzacja częściowa ( $\approx 0,3 J_s$ )                      | J <sub>MRM</sub> | 25↓         | 31↓         | 41↓       | 47↓    | ***          |  |

Wśród właściwości magnetycznych materiałów ferromagnetycznych poddawanych starzeniu analizowane są [87, 112 – 115]: zmiany natężenia pola koercji  $H_c$ , wartość tangensa kąta strat na histerezę magnetyczną  $tg\delta_h$ , przenikalność magnetyczna  $\mu_r$ , tangens kąta strat relaksacyjnych tg $\delta_r$ . Próba oceny materiału elementu poprzez badanie materiału w zakresie wartości magnetyzacji nasycenia nie jest w warunkach praktycznych możliwa. Odkształcenia plastyczne powodujące znaczne zmiany przenikalności magnetycznej i natężenia pola koercji (do 50%) są przyczyną nieznacznych lub nawet nieistotnych ze względu na możliwości zastosowań praktycznych zmian magnetyzacji nasycenia od 0,01% do 0,04 %.

#### Wnioski wstępne:

Opisana w pracy ocena stanu materiału przez pomiar namagnesowania dotyczy szczególnych charakterystycznych zakresów wartości namagnesowania, dla których zarówno w zakresie obciążeń sprężystych jak i zmęczenia materiału występują maksymalne wartości odpowiedzi magnetycznej materiału, nazwane w pracy magnetyczną reakcją materiału (MRM). Sposób ten wzbogaca metody badań magnetycznych przez wprowadzenie nowych charakterystyk magnetycznych materiału, opisujących podatność magnetosprężystą materiału i umożliwia prowadzenie diagnostyki magnetycznej w skali przemysłowej.

W magnetycznej diagnostyce stanu elementu ze stali konstrukcyjnej stosować można jedynie natężenia pola magnetycznego dla namagnesowania materiału do wartości równej J<sub>MRM</sub>.

#### 2.5. Magnetorezystancyjne przetworniki pomiarowe

Od czasu odkrycia przez Thomsona magnetorezystancyjnego efektu w materiałach ferromagnetycznych (załącznik Z1) w roku 1857 do opisania w literaturze pierwszego czujnika magnetorezystancyjnego upłynęło 109 lat. Badania nad materiałami i efektami magnetorezystancyjnymi trwają nadal. Typowe parametry i składy chemiczne stopów mgnetorezystancyjnych przedstawiono w tabeli 2.2 [141, 142].

Klasyczne materiały magnetorezystancyjne

Tablica 2.2

| Material          | Δρ/ρ | ρ                    | H <sub>k</sub> | H <sub>c</sub> | Λ    |
|-------------------|------|----------------------|----------------|----------------|------|
| Wateria           | %    | 10 <sup>-8</sup> Ω·m | A/m            | A/m            | 10-6 |
| NiFe (81/19)      | 2,2  | 22                   | 250            | 80             | ~0   |
| NiFe (86/14)      | 3,0  | 15                   | 200            | 100            | -12  |
| NiCo (70/30)      | 3,8  | 26                   | 2500           | 1500           | -20  |
| NiCo (50/50)      | 2,2  | 24                   | 2500           | 1000           | ~0   |
| NiFeCo (60/10/30) | 3,2  | 18                   | 1900           | 300            | -5   |
| NiFeCo (74/10/16) | 2,8  | 23                   | 100            | 250            | ~0   |

Ponieważ właściwości struktury elementów magnetorezystancyjnych narzucają sposób pomiaru, dlatego zostaną one szerzej omówione na przykładzie magnetorezystorów serii KMZ firmy Philips [106].

Zmiana rezystancji magnetorezystora pod wpływem namagnesowania opisywana jest równaniem [141]:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \cos 2\vartheta, \qquad (2.35)$$

gdzie:  $\Delta \rho / \rho$  – współczynnik magnetorezystywności,

 $\vartheta$  – kąt pomiędzy kierunkiem przepływu prądu a kierunkiem magnetyzacji.

Podstawowa zależność charakteryzująca magnetorezystor przedstawia się następująco:

$$\Delta R/R = f(H). \tag{2.36}$$

Wartość rezystancji magnetorezystora jest ściśle uzależniona od:

 $\varphi$  – kąta między kierunkiem wektora magnetyzacji a osią anizotropii materiału,

 $\varepsilon$  – kąta ścieżki magnetorezystora utworzonego z osią anizotropii,

 $\mathcal{G}$  – kąta pomiędzy kierunkiem przepływu prądu a kierunkiem magnetyzacji.

Związki pomiędzy kątami przedstawia rys. 2.7.

W zależności od kąta y zmiany rezystancji magnetorezystora opisuje zależność (2.35) [112]:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \left[ \frac{1}{2} \cos 2\gamma - \cos 2\gamma \left( \frac{H_x}{H_k + H_y} \right)^2 + \sin 2\gamma \frac{H_x}{H_k + H_y} \sqrt{1 - \left( \frac{H_x}{H_k + H_y} \right)^2} \right], \quad (2.37)$$

gdzie:  $H_x$ ,  $H_y$ - składowe zewnętrznego pola magnetycznego,

 $H_k$  – pole anizotropii ( $H_k = 2K/J_s$ ),

K – stała anizotropii materiału,

 $J_{\rm s}$  – magnetyzacja.



- Rys. 2.8. Magnetorezystor  $R_x$  umieszczony w polu magnetycznym:  $H_x$ ,  $H_y$  składowe zewnętrznego pola magnetycznego, L oś anizotropii (łatwego magnesowania), J oś magnetyzacji,  $I_w$  kierunek przepływu prądu
- Fig. 2.8. Magnetoresistant element  $R_x$  placed in magnetic field:  $H_x$ ,  $H_y$  tangential and normal of external magnetic field L – anisotropy axis (easy magnetisation), J – magnetisation axis, $I_w$  – direction of flux current

Podstawiając za  $H_x/H_y=h_x$  oraz  $H_y/H_y=h_y$ , otrzymuje się zależność:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \left[ \frac{1}{2} \cos 2\gamma - \frac{h_x^2}{\left(1 + h_y\right)^2} \cos 2\gamma + h_x \sqrt{1 - \left(\frac{h_x}{1 + h_y}\right)^2} \sin 2\gamma \right].$$
(2.38)

Dla szczególnego przypadku ścieżki magnetorezystora wytrawionej pod kątem  $\gamma = 45^{\circ}$  otrzymuje się charakterystykę w przybliżeniu liniową, opisaną zależnością:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{H_k + H_y} H_x.$$
(2.39)

Dla magnetorezystora usytuowanego pod kątem 45 stopni w stosunku do kierunku strumienia pola magnetycznego istnieje obszar pracy, w którym charakterystyka przetwarzania jest liniowa i symetryczna, jak pokazano na rysunku 2.9.

W sondach pomiarowych zastosowano mostkowe magnetorezystory Firmy Philips serii KMZ10A, KMZB,KMZ10C [88]. Są to przetworniki magnetorezystancyjne wielościeżkowe produkowane w technologii Barber-pole. Według tej technologii na ścieżce ferromagne-tycznej naniesione są dodatkowe elektrody z materiału przewodzącego, ułożone pod kątem  $\gamma = 45^{\circ}$  do kierunku ścieżki materiału ferromagnetycznego, linearyzujące charakterystykę przetwarzania. Charakterystykę przetwarzania wyznaczono w funkcji natężenia pola magne-tycznego wewnątrz cewki długiej. Dla przetwornika pomiarowego KMZ10B wykonano serię pomiarów. Uśrednione wyniki przedstawiono na rysunku 2.9.

Parametry podstawowego typoszeregu przetworników mostkowych magnetorezystancyjnych serii KMZ przedstawiono w tabeli 2.3 [109, 141, 142]. Czułość magnetorezystora serii KMZ zależy od napięcia zasilania. Dane katalogowe opisują najczęściej czułość dla napięcia zasilania 5V lub czułość podstawową.

Magnetorezystory serii KMZ10 mają następujące parametry:

- 1) czułość do 140 mV/(kA/m),
- 2) wartość szumu do 0,8·10<sup>-3</sup>A/m,
- 3) błąd temperatury przy zasilaniu prądowym 0,1%/K,
- 4) błąd temperatury przy zasilaniu napięciowym 0,4%/K,
- 5) błąd pełzania zera 3  $\mu$ V/V·K.



*Rys. 2.9. Charakterystyki przetwarzania magnetorezystora w zależności od kąta y Fig. 2.9. Characteristic of magnetoresistor conversion in depending on the angle y* 



*Rys. 2.10. Charakterystyka przetwarzania magnetorezystora KMZ Fig. 2.10. Characteristics of magnetoresistor KMZ conversion* 

Konstrukcja przetworników KMZ typu Barber-pole łączy pozytywne elementy znanych wcześniej konstrukcji magnetorezystorów:

- czujnik jest w przybliżeniu liniowy dzięki wymuszeniu kierunku przepływu prądu pod kątem 45°,
- prąd przepływający przez elektrody przetwornika wytwarza własne pole podmagnesowujące,
- oś anizotropii usytuowana wzdłuż ścieżki magnetycznej zwiększa odporność na rozmagnesowanie,
- miniaturyzacja przetworników magnetorezystancyjnych umożliwia ich stosowanie w głowicach czytników dysków twardych.

Zmiana kąta ułożenia przetwornika typu KMZ w stosunku do kierunku linii sił pola magnetycznego zmienia jego czułość. Udział składowej ortogonalnej może uniemożliwić pomiar. Pomimo ograniczeń przetworniki KMZ zostały zastosowane do badań diagnostyki stanu materiału elementu. Przetworniki magnetorezystancyjne stosowano także z powodzeniem w detekcji wad na linii produkcyjnej osi zestawów kołowych. Do badań magnetycznego pola rozproszenia w stanowisku modelowym zastosowano także hallotron KSY 14 firmy INFINEON.

| Parametry przetworników KMZ |  |
|-----------------------------|--|
|-----------------------------|--|

Tabela 2.3

| Daramatr                  |            | N      | lagnetorezystor | ſ      |
|---------------------------|------------|--------|-----------------|--------|
| raialleu                  |            | KMZ10A | KMZ10B          | KMZ10C |
| Czułość podstawowa        | mV/V(kA/m) | 16     | 4               | 1,5    |
| Czułość przy zasilaniu 5V | mV/(kA/m)  | 80     | 20              | 7,5    |
| Zakres pomiarowy          | kA/m       | 0,5    | 2,0             | 7,5    |
| Rezystancja gałęzi mostka | kΩ         | 1,3    | 1,4             | 1,7    |
| H <sub>k</sub>            | kA/m       | 1,2    | 3,8             | 17,6   |
| Grubość warstwy t         | Mm         | 33     | 44              | 130    |
| Liczba ścieżek w gałęzi   |            | 14     | 13              | 30     |

#### 3. BADANIE PARAMETRÓW MAGNETYCZNYCH MATERIAŁU

Materiałem konstrukcyjnym elementów maszyn jest w przeważającej mierze stal. Stal konstrukcyjna charakteryzuje się małym współczynnikiem magnetostrykcji  $\lambda$ , a tym samym niewielką czułością magnetosprężystą S [39]. Mała czułość magnetosprężysta omawianych materiałów wykluczyła je z kręgu badań efektu Villariego ze względu na brak zastosowań magnetostrykcyjnych. Mała czułość magnetosprężysta tych materiałów nie wyklucza ich z kręgu badań magnetycznych dla diagnostyki.

Badaniom poddano wąską grupę stali niskostopowych i niskowęglowych, stosowanych do produkcji zestawów kołowych. Ograniczenia dotyczące wymiaru próbek, a przede wszystkich ich przekroju, podyktowane były specyfiką badań i urządzeń badawczych oraz dostępnym zakresem obciążeń mechanicznych. Ze stali na zestawy kołowe oraz dodatkowo z St3S przygotowano specjalne próbki prętowe o długości 200 mm i przekroju 2x2 mm.

#### 3.1. Stanowisko pomiarowe i kalibracja układu pomiarowego

Na rozwiązanie konstrukcyjne stanowiska pomiarowego miał wpływ sposób zadawania obciążeń i sposób pomiaru parametrów magnetycznych oraz kształt i wymiar próbek. Stanowisko składa się z układu mechanicznego i układu pomiarowego. Schemat układu pomiarowego zamieszono na rysunku 3.1. Podstawowymi elementami układu są: cewka długa, o wymiarach zapewniających jednorodne pole magnesujące, cewka pomiarowa i obwody pomiarowe natężenia pola i indukcji magnetycznej.





Natężenie pola magnetycznego H przypadające na działkę d osi x oscyloskopu pomiarowego dla wykonanego układu wyznaczono z zależności:

$$H/d = \frac{D_X z_1}{R_1 L} \cdot 10^2,$$

(3.1)

gdzie: Dx - współczynnik odchylania wzmacniacza X,

- z1 liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,
- $R_1$  szeregowa rezystancja w uzwojeniu pierwotnym,
- L średnia droga strumienia magnetycznego.

Aby uzyskać pętlę histerezy, napięcie doprowadzone do toru Y powinno być proporcjonalne do indukcji magnetycznej B. Napięcie proporcjonalne do B otrzymuje się po scałkowaniu napięcia  $u_2$ . Jeżeli  $R >>1/(\alpha C)$ , wtedy układ ten można traktować jako całkujący ograniczający błąd, co sprawdzono na próbkach wzorcowych. Przy znanym współczynniku odchylania oscyloskopu w kierunku osi Y indukcja magnetyczna dla działki d odchylenia osi y oscyloskopu wyznaczana jest z zależności

$$B/d = \frac{RCD_{\gamma}}{z_2 S} \cdot 10^4 , \qquad (3.2)$$

gdzie: R - rezystancja układu całkującego,

- C pojemność układu całkującego,
- Dy współczynnik odchylania wzmacniacza,
- z<sub>2</sub> liczba zwojów uzwojenia wtórnego,
- S przekrój rdzenia.

Wyznaczone przeliczniki wartości natężenia pola magnetycznego H oraz indukcji magnetycznej B na 1 działkę ekranu oscyloskopu posłużyły do skalowania przebiegów pętli histerezy magnetycznej.

Układ mechaniczny do naprężania próbek wyposażono w czujnik siły. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Stanowisko pomiarowe do wyznaczania pętli histerezy w funkcji naprężeń Fig. 3.2. Measuring post for determining hysteretic curves as function of stress W badaniach magnetomechanicznych uwzględniono fakt magnesowania elementów bardzo długich L>>d. Dla takich elementów bardzo istotny jest współczynnik odmagnesowania N. Badaną próbkę umieszczano w polu magnetycznym cewki długiej i magnesowano polem magnetycznym o natężeniu H<sub>z</sub> przy jednoczesnym samoistnym odmagnesowaniu N, J zależnym od kształtu. Rzeczywiste natężenie pola magnetycznego wewnątrz H<sub>w</sub> próbki jest mniejsze od pola zewnętrznego H<sub>z</sub>

$$H_{\rm w} = H_{\rm z} - N \cdot J \quad . \tag{3.3}$$

Pomiary wzorcujące krzywej magnesowania drutu ze stali St3S wykonano na stanowisku pomiarowym wyposażonym w urządzenie naprężające, magneśnicę z cewką pomiarową, fluksomierz, zasilacz uzwojenia magneśnicy i zasilacz rozmagnesowujący. Pomiary wykonano w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Śląskiego. Miały one na celu kalibrację stanowiska pomiarowego. Wyznaczanie statyczne krzywej magnesowania pierwotnego składało się z następujących etapów:

- pomiar strumienia magnetycznego układu pomiarowego w funkcji natężenia pola magnetycznego  $\Phi_0$  (bez materiału),
- założenie drutu do urządzenia naprężającego i jego rozmagnesowanie,
- pomiar strumienia magnetycznego  $\Phi$  w funkcji natężenia pola magnetycznego dla drutu nieobciążonego siłą,
- rozmagnesowanie drutu,
- pomiar strumienia magnetycznego do w funkcji natężenia pola magnetycznego dla drutu obciążonego siłą,
- wyznaczenie współczynnika odmagnesowania,
- wyznaczenie indukcji magnetycznej,
- wyznaczenie namagnesowania,
- wykonanie wykresów.

Pomiary krzywych magnesowania obarczone są znacznym błędem. Na błąd względny wyznaczania indukcji B ma wpływ pomiar strumienia  $\Phi$  oraz przekroju S próbki:

$$\frac{\Delta B}{B} = \mp \left(\frac{\Delta \phi}{\phi} + \frac{\Delta S}{S}\right). \tag{3.4}$$

Uwzględniając błąd pomiaru prądu *I*, błąd uśrednienia długości drogi strumienia magnetycznego *l*, sumaryczny błąd graniczny wyznaczania natężenia pola magnetycznego wynosi:

$$\frac{\Delta H}{H} = \pm \left(\frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta I_{ir}}{l_{ir}}\right). \tag{3.5}$$

Błąd pomiaru może przyjąć wartość kilku procent [53]. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.1.

Parametry magnesowania stali konstrukcyjnych i maszynowych różnią się znacznie od parametrów stali elektrotechnicznych (stal M19). Dla stali tych należy wyznaczyć, użyteczny dla diagnostyki stanu zakres zmian indukcji magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego. Zakres ten pozwala dobrać parametry układu magnesującego i pomiarowego. Krzywe magnesowania stali niskowęglowej w stosunku do stali elektrotechnicznej, przedstawiono na rysunku 3.3.

Tabela 3.1

#### Zestawienie wyników pomiarów

| Ι    | Н     | $arPhi_0$ | Φ     | $\Phi_{a}$ | $\Delta \Phi$ | $\Delta \Phi_{\sigma}$ | В     | B <sub>σ</sub> | J     | $J_{\sigma}$ |
|------|-------|-----------|-------|------------|---------------|------------------------|-------|----------------|-------|--------------|
| Α    | A/m   | mVs       | mVs   | mVs        | mVs           | mVs                    | Т     | Т              | Т     | Т            |
| 0,05 | 951   | 2,2       | 3,7   | 4,9        | 1,5           | 2,6                    | 0,065 | 0,117          | 0,064 | 0,116        |
| 0,1  | 1903  | 4,1       | 16,2  | 21,5       | 12,1          | 17,4                   | 0,536 | 0,769          | 0,533 | 0,767        |
| 0,15 | 2854  | 6,3       | 21,3  | 27,6       | 15,0          | 21,2                   | 0,663 | 0,939          | 0,659 | 0,935        |
| 0,2  | 3805  | 8,4       | 28,7  | 33,4       | 20,3          | 25,0                   | 0,898 | 1,106          | 0,893 | 1,101        |
| 0,3  | 5708  | 12,7      | 34,8  | 40,4       | 22,1          | 27,7                   | 0,977 | 1,225          | 0,970 | 1,218        |
| 0,4  | 7610  | 17,0      | 44,4  | 46,8       | 27,5          | 29,8                   | 1,214 | 1,318          | 1,205 | 1,309        |
| 0,5  | 9513  | 21,0      | 49,3  | 52,3       | 28,3          | 31,3                   | 1,252 | 1,384          | 1,240 | 1,373        |
| 0,6  | 11415 | 25,3      | 55,9  | 59,5       | 30,6          | 34,2                   | 1,354 | 1,513          | 1,339 | 1,498        |
| 0,8  | 15221 | 34,2      | 67,3  | 66,5       | 33,1          | 32,4                   | 1,464 | 1,431          | 1,445 | 1,412        |
| 1    | 19026 | 42,2      | 74,9  | 75,1       | 32,7          | 32,9                   | 1,446 | 1,455          | 1,422 | 1,431        |
| 1,2  | 22831 | 51,0      | 83,6  | 84,0       | 32,6          | 33,0                   | 1,440 | 1,457          | 1,411 | 1,429        |
| 1,4  | 26636 | 58,0      | 93,0  | 92,7       | 35,0          | 34,7                   | 1,548 | 1,535          | 1,515 | 1,501        |
| 1,6  | 30441 | 67,7      | 101,5 | 101,7      | 33,8          | 34,0                   | 1,493 | 1,504          | 1,455 | 1,466        |
| 1,8  | 34246 | 76,3      | 111,2 | 110,0      | 34,9          | 33,7                   | 1,541 | 1,488          | 1,498 | 1,445        |
| 2    | 38051 | 84,7      | 117,9 | 119,0      | 33,2          | 34,3                   | 1,466 | 1,517          | 1,419 | 1,469        |
| 2,2  | 41856 | 93,3      | 127,0 | 127,6      | 33,8          | 34,3                   | 1,493 | 1,517          | 1,440 | 1,465        |
| 2,4  | 45662 | 101,6     | 135,8 | 135,6      | 34,2          | 34,0                   | 1,513 | 1,502          | 1,455 | 1,444        |
| 2,6  | 49467 | 110,2     | 145,8 | 144,0      | 35,6          | 33,8                   | 1,572 | 1,495          | 1,510 | 1,433        |
| 2,8  | 53272 | 118,5     | 153,8 | 155,5      | 35,3          | 37,0                   | 1,561 | 1,637          | 1,494 | 1,570        |
| 3    | 57077 | 126,8     | 161,0 | 160,5      | 34,2          | 33,7                   | 1,513 | 1,491          | 1,441 | 1,419        |
| 3,2  | 60882 | 135,8     | 170,3 | 169,8      | 34,5          | 34,0                   | 1,526 | 1,502          | 1,450 | 1,425        |
| 3,4  | 64687 | 140,4     | 177,2 | 175,8      | 36,8          | 35,4                   | 1,628 | 1,566          | 1,546 | 1,485        |
|      |       |           |       |            |               |                        |       |                |       |              |



#### *Rys.* 3.3. *Przykładowe krzywe magnesowania Fig.* 3.3. *Examples of the magnetizing curve*

Badaną próbkę drutu ze stali St3S przeanalizowano w szerokim zakresie zmian natężenia pola magnetycznego. Dla pozostałych próbek przygotowanych jako prętowe, przeprowadzono badania dynamicznej krzywej magnesowania materiałów w zakresie natężeń do 6 kA/m.

#### 3.2. Badanie efektu Villariego

Zakres badań obejmuje ocenę:

- zmian indukcji magnetycznej,
- zmian przenikalności magnetycznej,
- czułości magnetosprężystej

stali stosowanych na kolejowe zestawy kołowe. Pomiary wykonano w dolnym zakresie odkształceń sprężystych materiału, charakteryzującym się liniowością zmian parametrów magnetycznych w zakresie naprężeń ściskających i rozciągających dla zadanego zakresu zmian natężenia pola magnesującego.

#### 3.2.1. Material badań

Badania prowadzono na próbkach prętowych ze stali stosowanych na zestawy kołowe. Składy chemiczne badanych gatunków stali i ich parametry mechaniczne zamieszczono w tabelach 3.2 do 3.4. Tabela 3.2

|                 |       |       | Μ    | laterial | osi zesta | awów ł      | cołowy  | ch   |      |      |            |
|-----------------|-------|-------|------|----------|-----------|-------------|---------|------|------|------|------------|
| Znak<br>gatunku |       |       |      | 1        | Skład     | chemic<br>% | zny sta | ıli  |      |      |            |
| stali           | С     | Mn    | Si   | Р        | S         | Cr          | Ni      | Cu   | Mo   | V    | Al         |
|                 |       |       |      |          |           |             | (max)   |      |      |      | metaliczny |
| P35G            | max   | max   | max  | 0,35     | 0,035     |             | -       |      | 0,05 |      |            |
| 1.0             | 0,37  | 1,10  | 0,45 |          |           | 0,30        | 0,30    | 0,30 |      | 0,05 | 0,020÷     |
| P45A            | 0,42÷ | 0,60÷ | 015÷ | 0,030    | 0,030     |             |         |      | 0,08 |      | 0,050      |
|                 | 0,50  | 0,90  | 0,40 | _        |           |             |         |      |      |      | 1          |

|                       |                 |                       |                       | Własnośc | i mechanio | czne               |                       |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------|
| Znak<br>gatunku stali | Stan<br>obróbki | R <sub>e</sub><br>MPa | R <sub>m</sub><br>MPa | A5<br>%  | Z<br>%     | K<br>J/c           | CU<br>cm <sup>2</sup> |
|                       | cieplnej        | (min)                 |                       | (min)    | (min)      | Próbka<br>wzdłużna | Próbka<br>poprzeczna  |
|                       | -               | 270                   | 500÷650               | 20       | 40         | 40                 | 16                    |
| P35G                  | N               | 320                   | 550-650               | 22       | 40         | 50                 | 20                    |
|                       | Т               | 350                   | 550÷700               | 24       | 45         | 80                 | 30                    |
|                       | N               | 360                   | 600÷750               | 17       | 30         | 40                 | 20                    |
| P45A                  | Т               | 390                   | 620÷770               | 19       | 35         | 50                 | 26                    |

Tabela 3.3

|                 |      |      | Mat   | eriał ob | ręczy ze | stawów        | kołowy | ch   |       |       |       |
|-----------------|------|------|-------|----------|----------|---------------|--------|------|-------|-------|-------|
| Znak<br>gatunku |      | -    | 100 A | - 7      | Skł      | ad chemi<br>% | iczny  |      |       |       |       |
| stali           | С    | Mn   | Si    | Р        | S        | Cr            | Ni     | Cu   | Mo    | V     | Al    |
| P54T            | 0,57 | 0,84 | 0,37  | 0,016    | 0,008    | 0,03          | 0,02   | 0,04 | 0,004 | 0,001 | 0,029 |
| P55AT           | 0,56 | 0,82 | 0,37  | 0,014    | 0,008    | 0,02          | 0,01   | 0,04 | 0,002 | 0,001 | 0,027 |
| P60T            | 0,58 | 0,86 | 0,36  | 0,019    | 0,019    | 0,02          | 0,02   | 0,04 | 0,002 | 0,001 | 0,025 |

| Znak             | Stan obróbki       |                       | Własi                 | aniczne |        |                          |
|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------|--------|--------------------------|
| gatunku<br>stali | cieplnej           | R <sub>e</sub><br>MPa | R <sub>m</sub><br>MPa | A5<br>% | Z<br>% | KCU<br>J/cm <sup>2</sup> |
| P54T             | Ulepszany cieplnie | 500                   | 852                   | 15      | 16     | 30                       |
| P55AT            | Ulepszany cieplnie | 538                   | 900                   | 14      | 16     | 20                       |
| P60T             | Ulepszany cieplnie | 625                   | 1001                  | 12      | 16     | 20                       |

Materiały na koło bose zestawów kołowych

| Znak<br>gatunku  | Skład chemiczny stali<br>% |               |                       |       |                       |         |         |        |                   |                          |                      |
|------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|-------|-----------------------|---------|---------|--------|-------------------|--------------------------|----------------------|
| stali            | С                          | Mn            | Si                    | Р     | S                     | Cr      | Ni      | Cu     | Mo                | V                        | Al                   |
| P45A             | 0,42÷<br>0,50              | 0,60÷<br>0,90 | 015÷<br>0,40          | 0,030 | 0,030                 | 0,30    | (max)   | 0,30   | 0,08              | 0,05                     | 0,020÷<br>0,050      |
| Znak             | Si                         | tan           |                       |       |                       | Własno  | ści mec | hanicz | ne                |                          |                      |
| gatunku<br>stali | obr<br>cier                | óbki<br>olnej | R <sub>c</sub><br>MPa | N N   | R <sub>m</sub><br>IPa | A5<br>% | Z<br>%  |        |                   | KCU<br>J/cm <sup>2</sup> |                      |
| -                |                            |               | (min)                 |       |                       | (min)   | (min    | n)     | Próbka<br>wzdłużr | i<br>ia j                | Próbka<br>poprzeczna |
|                  | 1                          | N             | 360                   | 600   | ÷750                  | 17      | 30      |        | 40                |                          | 20                   |
| P45A             |                            | г             | 390                   | 620   | ÷770                  | 19      | 35      |        | 50                |                          | 26                   |

#### 3.2.2. Krzywe magnesowania pierwotnego

Krzywe magnesowania pierwotnego wyznaczono z dynamicznych pętli histerezy materiału bez obciążeń mechanicznych i z obciążeniem do 250 MPa z krokiem co 40 MPa. Na rysunkach 3.4 i 3.5 podano przykłady przebiegów pętli histerezy zarejestrowane cyfrowo i przetworzone graficznie dla stali P35 w zakresach skrajnych 0 MPa i 250 MPa. Pozostałe wykresy zamieszczono w załączniku 2.



Rys. 3.4. Dynamiczne pętle histerezy stali P35 bez obciążeń Fig. 3.4. Dynamic hysteresis loops for P35 steel (no load)

Tabela 3.4





Rys. 3.5. Dynamiczne pętle histerezy stali P35 przy naprężeniu 250 MPa Fig. 3.5. Dynamic hysteresis loops for P35 steel (250 MPa strees)

W tabeli 3.5 zamieszczono wykresy zbiorcze charakteryzujące efekt Villariego badanych stali.

Pomiary prowadzono w zakresach natężenia pola magnetycznego, dla którego widoczne są zmiany w przebiegu krzywych pierwotnego magnesowania materiału bez obciążeń i z obciążeniem maksymalnym 250 MPa. Krzywe te posłużyły do wyznaczenia krzywych przenikalności magnetycznej. Zbiór krzywych przenikalności magnetycznej dla tego samego zakresu obciążeń zamieszczono w tabeli 3.6.

Z porównania krzywych przenikalności magnetycznej wynika, że nieznaczne zmiany w składnikach stopowych stali prowadzą do znacznych zmian przenikalności materiału, a także do zmian zakresu natężeń magnesujących dla przenikalności maksymalnej, jak pokazano na wykresie (rys. 3.6).

Czułość magnetosprężysta S charakteryzuje zmiany podatności magnetycznej badanego materiału pod wpływem działającego obciążenia. Czułość magnetosprężystą  $S_{max}$  wyznaczono dla maksymalnych przyrostów krzywych przenikalności magnetycznej badanych próbek. Czułość tę wyznaczono ze wzoru [39]:

$$S_r = \frac{\mu_{r\sigma} - \mu_r}{\mu_r \cdot \sigma} \cdot 100 \frac{\%}{MPa} , \qquad (3.6)$$

gdzie:  $\mu_{r\sigma}$  – maksymalna względna przenikalność magnetyczna (przy obciążeniu),

- $\mu_r$  maksymalna względna przenikalność magnetyczna (bez obciążenia),
- $\sigma$  naprężenie rozciągające MPa.

Dla wartości maksymalnej przenikalności magnetycznej badanych stali wyznaczono względne zmiany przenikalności magnetycznej dla zakresu 250 MPa oraz podano czułości magnetosprężyste. Wyniki zamieszczono w tabeli 3.7.



\_\_\_\_\_

Tabela 3.5





Tabela 3.7

Porównanie czułości magnetosprężystej materiału

| Gatunek<br>stali | Maksymalne zmiany względnej<br>przenikalności magnetycznej $\mu_r$ [%] | Czułość magnetosprężysta<br>S <sub>max</sub> [%/MPa] |
|------------------|--|--|
| St3S             | 32,3   | 0,121  |
| P35G             | 38,0   | 0,144  |
| P45A             | 23,5   | 0.073  |
| P54T             | 28,0   | 0,104  |
| P55AT            | 20,0   | 0,078  |
| P60T             | 14,5   | 0,068  |

Czułość magnetosprężysta nie jest wielkością stałą, lecz zależy od wartości natężenia pola magnesującego. W zakresach zadanych natężeń pola magnetycznego przebiegi zmian czułości magnetosprężystej materiału zebrano na wykresie (rys. 3.7)





44

Tabela 3.6



Bezwzględne zmiany przenikalności magnetycznej pod wpływem naprężeń mechanicznych są zależne od natężenia pola magnesującego, dlatego dodatkowym parametrem charakteryzującym materiał stosowany na budowę przetworników pomiarowych jest mocowa czułość magnetosprężysta [39]. Czułość ta opisana jest zależnością [39]:



Rys. 3.8. Mocowa czułość magnetosprężysta Fig. 3.8. Magnetoelastic power sensitivity

Parametr czułości mocowej materiału dla przypadku badania materiału elementu maszyn jest mniej użyteczny i rzadziej stosowany do jego oceny.

Badania stanu materiału ferromagnetycznego należy poprzedzić badaniami zakresów zmian parametrów magnetycznych. Jak wynika z zamieszczonych wykresów, czułość magnetosprężysta zanika w miarę wzrostu natężenia pola magnetycznego i jest znikoma w zakresie nasycenia badanego materiału. Uwaga ta jest zgodna z wynikami literaturowymi dla czystego żelaza (tabela 2.4). Próby oceny naprężeń w materiale ferromagnetycznym, prowadzone w zakresie magnetyzacji nasycenia są zatem bezcelowe. Niektóre z badanych stali (P55At i P60T) wykazywały minimalną czułość w zakresach natężenia pola magnesującego do 1000 A/m.

#### 3.3. Zakres pomiarowej czułości magnetycznej materiału

Znikomy w zakresie magnetyzacji nasycenia zakres pomiarowy reakcji magnetycznej materiału jest. Zaproponowana w pracy metodologia badań precyzuje ściśle pomiarowy zakres badań. Zakres ten zostanie omówiony na przykładzie stali St3S, na której wykonano szereg eksperymentów laboratoryjnych opisanych w dalszych rozdziałach pracy. Na rysunku 3.9 zamieszczono krzywe magnesowania wyznaczone dla zakresu natężenia pola magnetycznego od 0 do 5 kA/m. W zakresie tym (dla naprężeń rozciągających) występuje obszar największych przyrostów przenikalności magnetycznej materiału. Aby można było wykonać pomiar naprężeń, natężenie pola magnetycznego musi być zawarte w granicy 1 800 A/m  $\pm$  200 A/m. W zakresie tego natężenia wystąpią największe zmiany indukcji magnetycznej

materiału. Zakres ten nazwano magnetyzacją magnetycznej reakcji materiału  $J_{\rm MRM}$ , dla którego  $\Delta J$  ma swoje maksimum.



#### *Rys.* 3.9. Metoda wyznaczania zakresu $J_{MRM}$ Fig 3.9. Procedure of determining $J_{MRM}$ range

Zakres maksymalnej czułości magnetycznej materiału *S* występujący w obszarze magnetyzacji J<sub>MRM</sub> ma bezpośrednie odniesienie do zdefiniowanej dla potrzeb pracy czułości magnetyczno-pomiarowej S<sub>MP</sub>. Na przykładzie stali St3S opisano pomiar zmian natężenia pola magnetycznego przy powierzchni próbki, zamontowanej na stanowisku do wyznaczania efektu Villariego (rys.3.2). Lokalizacja magnetorezystora pomiarowego w układzie próbka materiału i cewka magnesująca przedstawiona została schematycznie na rysunku 3.10.



#### Rys. 3.10. Schemat pomiaru naprężeń Fig. 3.10. Strength measurement scheme

Zadano natężenie pola magnesującego od prądu zasilającego cewkę pomiarową o wartości nie przekraczającej 2 500 A/m. Pomiar prowadzono przetwornikiem pomiarowym magnetorezystancyjnym KMZ 10B poprzez układ wzmacniający 100x. Przebiegi prądu magnesującego  $i_{\rm m}$  okazano na rysunku 3.11.



Rys. 3.11. Przebiegi prądu magnesującego – wynik pomiaru Fig. 3.11. Magnetising current courses – measurement results

Pod wpływem obciążeń sprężystych wzrasta indukcja magnetyczna w materiale. Dla ustalonej początkowo wartości prądu magnesującego zmierzono jej spadek. Przebiegi napięcia przetwornika magnetorezystancyjnego pomiarowego zamieszczono wraz z zaznaczonym zakresem zmian wartości międzyszczytowej na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Przebiegi natężenia pola magnetycznego przy powierzchni próbki – wynik pomiaru Fig. 3.12. Magnetic field strength at sample surface – measurement results

Czułość magnetyczno-pomiarową wyznaczamy z podobnej zależności jak dla czułości magnetosprężystej (3.6). W miejsce parametru przenikalności magnetycznej materiału podstawiono napięcie pomiarowe  $U_p$  przetwornika magnetorezystancyjnego.

$$S_{MP(\max)} = \frac{U_{P(\sigma)} - U_{P(0)}}{U_{P(0)} \cdot \sigma} \cdot 100 \frac{\%}{MPa}$$
(3.8)

$$S_{MP(max)} = \frac{540 - 640}{540 \cdot 250} \cdot 100 = -0.074 \frac{\%}{MPa}$$

5

Znak minus świadczy o występowaniu wzrostu naprężeń w materiale o współczynniku magnetostrykcji  $\lambda_s > 0$ . Materiały o współczynniku magnetostrykcji  $\lambda_s < 0$  będą charakteryzowane dodatnim znakiem przyrostu mierzonego natężenia pola magnetycznego.

Magnetorezystor KMZ 10B zasilany napięciem 5 V ma katalogową czułość 20 mV/1000 A/m. W układzie pomiarowym zastosowano 100-krotne wzmocnienie, co daje czułość przetwarzania 2 000 mV, 1 000 A/m. Podstawiając pomierzone wartości do wzoru (3.8) wyznaczono czułość przetwarzania magnetorezystora w zakresie zmian natężenia pola magnetycznego od naprężeń mechanicznych. Wyniesie ona (minus) 0,28 A/m na 1 MPa. Układ pomiarowy umożliwia pomiary ze wzmocnieniem od 1 do 10 000 razy. Dysponowana rozdzielczość pomiarowa jest wystarczająca do oceny materiału ferromagnetycznego.

### 3.4. Rozbudowa katalogu materiałowego programów symulacyjnych MES pola magnetycznego

Wpisanie do katalogu programów symulacyjnych parametrów magnetycznych badanych materiałów umożliwia prowadzenie analizy zachowania się materiału pod obciążeniem mechanicznym oraz symulacje pomiaru. Dysponowano programami symulacyjnymi Flux 2D/3D oraz FEMM VERSION 3.2 2D [92]. Wyboru programu FEMM dokonano na podstawie porównania szybkości obliczeń w stosunku do wybranego zagadnienia analitycznego (Z.3). Programy symulacyjne MES w polu magnetycznym zawierają katalogi podstawowych materiałów magnetycznych. Na rysunku 3.13 pokazano okno katalogu programu FEMM dla stali M-19. Rysunek 3.14 przedstawia krzywą pierwszego magnesowania stali krzemowej do zastosowań magnetycznych.



#### Rys. 3.13. Panel katalogu materiałów Fig. 3.13. Panel of material properties

Zadaniem badań magnetomechanicznych było określenie zmian krzywej pierwszego magnesowania w funkcji obciążeń (statycznych) dla stali konstrukcyjnych. Dla większości stali niskostopowych i niskowęglowych w zakresie odkształceń sprężystych granicy proporcjonalności zmiany te są liniowe. Rozwijanie metody badań magnetycznych wad i naprężeń wymaga tworzenia niezależnego katalogu materiałów stosowanych do produkcji maszyn i w konstrukcjach stalowych z uwzględnieniem zmian krzywych pierwszego magnesowania





*Rys.* 3.14. Przykład panelu charakterystyk magnesowania Fig. 3.14. An example of the magnetizing curve



*Rys.* 3.15. *Pomierzone krzywe pierwszego magnesowania Fig.* 3.15. *Measured curves of the first magnetizing* 

Krzywe wprowadzane do programu wyznaczano dla naprężeń od 0 MPa do 240 MPa z krokiem co 20 MPa. Zakres ten umożliwił przeprowadzenie symulacji pomiaru stanu naprężeń.

Okno katalogu dla wprowadzonych materiałów pokazano na rysunku 3.16.



Rys. 3.16. Przykład okna katalogu materiałów Fig. 3.16. An example of the panel of material properties

Podobne okna katalogu materiałów tworzono dla zakresów naprężeń od 0 MPa do 250 MPa.

#### 3.5. Przykład wykorzystania parametrów magnetosprężystych materiału

Podczas badań elementów maszyn tylko w szczególnych przypadkach daje się stwierdzić jednorodny stan naprężeń. Prowadzone badania elementów z materiału ferromagnetycznego, zarówno symulacyjne jak i doświadczalne, uwzględniające niejednorodny stan naprężeń, są badaniami eksperymentalnymi, mającymi znaczenie w badaniach magnetycznych w zastosowaniu do diagnostyki technicznej [195].

W celu wyjaśnienia wpływu niejednorodności stanu naprężeń na zmiany mierzonego pola magnetycznego wykonano następującą symulację. Analizie numerycznej poddano próbkę utwierdzoną w obu końcach. Na próbkę działano siłą skupioną, jak pokazano na rysunku 3.17. Wyznaczano zakres niejednorodności naprężeń, a następnie jej wpływ na wartość mierzonego natężenia pola magnetycznego na przeciwległej powierzchni próbki.



Rys. 3.17. Mapa rozkładu naprężeń w próbce zginanej od siły skupionej Fig. 3.17. Map of stress distribution in bent sample by assembled force

Założono, dla ułatwienia badań symulacyjnych, że granice lokalnych zmian naprężeń odpowiadają granicom zmian magnetyzacji materiału. Zmiany parametrów magnetycznych materiału od obciążeń mechanicznych tworzą dodatkowe granice, dla których warunki brzegowe z krzywych magnesowania i wartości pola magnetycznego wyznacza program. Załamanie linii sił pola magnetycznego w materiale, w którym wydzielono granicę zmiany naprężeń, będzie zatem nieznaczne i zgodnie z zależnością:

$$0.90 < \frac{\mathrm{tg}_{a1}}{\mathrm{tg}_{a2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\mu_{\sigma 1}}{\mu_{\sigma 2}} < 1 \quad . \tag{3.9}$$

Wyliczone w programie COSMOS obszary zmian naprężeń wprowadzono do programu symulacyjnego FEMM, następnie przypisano im właściwe krzywe magnesowania, jak pokazano na rysunku 3.18.



Rys. 3.18. Wprowadzone do programu FEMM granice obszarów naprężeń Fig. 3.18. Imported to FEMM program bounds of stress changes

W badaniu symulacyjnym próbkę umieszczono w polu magnetycznym magnesów trwałych. Wyznaczony rozkład indukcji magnetycznej i przebieg linii sił pola magnetycznego przedstawia rysunek 3.19.



- Rys. 3.19. Obraz indukcji magnetycznej i linii sił pola magnetycznego dla rzeczywistych naprężeń
- Fig. 3.19. Magnetic flux density in sample and at its surface containing detailed stress distribution according

Zmiany natężenia pola magnetycznego rozpatrywano na odcinku *l* powierzchni belki z obciążeniem rzeczywistym, o rozkładzie naprężeń uwidocznionym na rys 3.17. Porównanie rozkładu natężenia pola magnetycznego przy powierzchni próbki obciążonej i nieobciążonej zamieszczono na rysunku 3.20.



Rys. 3.20. Rozkład natężenia pola magnetycznego i jego składowych na powierzchni próbki zginanej siłą skupioną

Fig. 3.20. Distribution of magnetic field intensity over surface of sample as function of stress

W środkowej części próbki, pomimo znacznych zmian w rozkładzie naprężeń, obserwuje się uśrednioną wartość indukcji w zakresie podanym na rysunku 3.20. Natężenie pola magnetycznego analizowane po zewnętrznej powierzchni próbki nie odzwierciedla lokalnych naprężeń maksymalnych.

Przeprowadzone symulacje rozkładu natężenia pola magnetycznego od naprężeń pochodzących od sił skupionych wykazały, że siła skupiona i powstałe od niej lokalne maksymalne naprężenia są słabo reprezentowane po zewnętrznej powierzchni próbki.

Zagadnienie pomiaru naprężeń od obciążeń złożonych jest szczególnie ważne. Badanie naprężeń na drodze pomiaru natężenia pola magnetycznego przy powierzchni materiału związane jest z namagnesowaniem wierzchniej warstwy materiału. Namagnesowanie to z kolei zależy od rozkładu naprężeń. Przy założeniu jednakowej wartości granicznej naprężeń zredukowanych dla belki skręcanej z jednoczesnym rozciaganiem namagnesowanie wierzchniej warstwy materiału będzie zależne od rozkładu naprężeń, czyli proporcji Ms/Fr. Problematykę tę zobrazowano na przykładzie trzech przypadków obciążeń, pokazanych na rysunkach: 3.21a oraz 3.21b i 3.21c.



*Rys. 3.21. Sposoby obciążenia mechanicznego wału Fig. 3.21. Ways of burden of mechanical rampart* 

Sposób obciążenia wpływa na rozkład naprężeń. Jednoosiowy stan naprężeń wywołuje naprężenia jednorodne w badanym elemencie poza jego zamocowaniem i przyłożeniem siły. Naprężenia złożone od skręcania i rozciągania zwiększają magnetyzację w kierunku powierzchni elementu (tabela 3.8).



Badania analityczne struktur warstwowych na drodze analitycznej jest praktycznie niemożliwe. Powyższe przykłady ilustrują znaczenie badań magnetycznych i możliwość wykorzystania ich w badaniach symulacyjnych.

#### 4. MAGNETYCZNE ODWZOROWANIE STANU NAPRĘŻEŃ I DRGAŃ W MATERIALE FERROMAGNETYCZNYM

Rozdział ten poświęcono bezstykowemu badaniu naprężeń i drgań w materiałach o małej czułości magnetosprężystej Smax, a tym samym małych współczynnikach magnetostrykcji (<1 µm/m). Badania prowadzono za pomocą magnetorezystancyjnych parametrycznych przetworników pomiarowych. Wykazana łatwość oceny napreżeń i drgań w elementach ferromagnetycznych w wyniku pomiaru zmian nateżenia pola magnetycznego, to wiele nowych zastosowań przemysłowych i laboratoryjnych w szerokiej skali powszechności [179]. W celu udowodnienia możliwości pomiaru naprężeń w elementach wykonanych z materiałów o małych współczynnikach magnetostrykcji przeprowadzono eksperyment nie mający odpowiednika w skali kraju, polegający na obciążaniu namagnesowanego płaskownika stalowego momentem zginającym i pomiarze zmian natężenia pola magnetycznego. Równolegle z pomiarem pola magnetycznego prowadzono pomiary odkształceń przetwornikami tensometrycznymi połączonymi w układ pełnego mostka, strzałki ugięcia, drgań przetwornikiem piezoceramicznym KD i parametrycznym ADXL firmy Analog Devices. Rejestrowano i porównywano sygnały napieciowe przetworników pomiarowych w funkcji czasu. Uzyskane doświadczenia posłużyły do opracowania nowych metod służących do badania elementów maszyn.

#### 4.1. Odkształcenia sprężyste zginania

Przygotowano stanowisko do badania płaskownika utwierdzonego obciążanego dynamicznie momentem zginającym. Częstotliwość zginania regulowano obrotami silnika. Badania prowadzono w skali laboratoryjnej. Zastosowano płaskownik ze stali St3 o długości 24cm i przekroju 25x8 mm. Ugięcia cykliczne wymuszano za pomocą specjalnie przygotowanych krzywek. Zaplanowane równoległe badania porównawcze obejmowały pomiary odkształceń powierzchniowych  $\varepsilon$  – przetwornikiem tensometrycznym, strzałki ugięcia *s* – przetwornikiem potencjometrycznym, składowej stycznej natężenia pola magnetycznego  $H_t$  – przetwornikiem magnetorezystancyjnym KMZ 10A i w pierwszym okresie badań równoległe pomiary drgań przetwornikami piezoceramicznym KD i parametrycznym ADXL. Na płaskownik jednostronnie utwierdzony działano siłą pochodzącą od układu napędowego, jak pokazano na rysunku 4.1. Za źródło pola magnetycznego magnesującego materiał płaskownika posłużył magnes trwały przetwornika drgań.

#### 4.1.1. Stanowisko pomiarowe



Rys. 4.1. Schemat wykonanego stanowiska badawczego Fig. 4.1. Schema of measuring post

Na badanym płaskowniku (rys. 4.1) rozmieszczono przetworniki pomiarowe 1, 2, 3, opisane w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Zestawienie przetworników pomiarowych

| $\mathbf{Nr}$ | Przetwornik pomiarowy                                    | Rodzaj        | Тур                     | Czułość          |
|---------------|--|---------------|-------------------------|------------------|
| 1             | Odkształceń<br>(tensometry w układzie pełnego<br>mostka) | Parametryczny | 4 x ITWL                | R = 120, k = 2,2 |
| 2             | Natężenia pola magnetycznego<br>(mostek MR)              | Parametryczny | KMZ<br>10B              | 20 V/ KA/m*      |
| 3             | Drgań  | Parametryczny | ADXL                    | 300 V/g          |
| 4             | Drgań  | Generacyjny   | KD                      | 100 mV/g         |
| 5             | Strzałki ugięcia   | Parametryczny | potencjometr<br>liniowy |                  |

Oprócz krzywki KI, pokazanej na rysunku 4.1, zastosowano krzywki o zarysach przekroju jak na rysunku 4.2. Powierzchnię natarcia krzywki KII stanowiło miniaturowe łożysko. Powierzchnia zewnętrznego pierścienia łożyska tocznego kulkowego osadzonego asymetrycznie pełniła rolę kolejnej krzywki – KIV. Krzywki różniły się wielkością mimośrodu (wysokością wzniosu).



Rys. 4.2. Kształty pozostałych krzywek KII do KIV Fig. 4.2. Form others kames KII to KIV

Kształt krzywki decydował o amplitudzie i czasie oddziaływania siły na płaskownik (wymuszenie – skok jednostkowy). Każda z krzywek miała kształt wpływający na wartość ugięcia s płaskownika oraz czas ugięcia  $t_n$  w okresie T. Rysunek 4.3 przedstawia przebiegi napięcia w funkcji czasu zarejestrowane potencjometrycznym przetwornikiem pomiarowym oraz wartości maksymalne tych przebiegów dla czterech zastosowanych typów krzywek.

| ki KI                     | N       | S. 5M | △V1 +0.492V | NCRM S SM | ki KII        |
|---------------------------|---------|-------|-------------|-----------|---------------|
| u <sub>pp</sub> (t) krzyw |         |       |             |           | upp(t) krzywl |
|                           |         | Q15   | P a Q1V     | 0.1s      |               |
| krzywki KIII              |         | S pm  | D           |           | krzywki KIV   |
| u <sub>pp</sub> (t)       | P = 01/ | 0.15  | P = 05/     | Q15       | upp(t)        |

*Rys.* 4.3. Przebiegi napięciowe  $u_{pp}(t)$  potencjometrycznego przetwornika pomiarowego Fig. 4.3. Voltage courses  $u_{pp}(t)$  by potentiometer transformer

Wprowadzenie kilku krzywek miało na celu wykazanie jakościowych oraz ilościowych związków pomiędzy zarejestrowanymi przebiegami napięciowymi przeprowadzonych pomiarów:

1) przetwornikiem tensometrycznym – napięcie  $u_{pt}(t)$ ,

2) przetwornikami magnetorezystancyjnym – napięcie  $u_{pm}(t)$ ,

3) przetwornikiem potencjometrycznym strzałki ugięcia –  $u_{pp}(t)$ .

Jednoczesny pomiar odkształcenia przetwornikami tensometrycznymi i natężenia pola magnetycznego przetwornikami magnetorezystancyjnymi umożliwił śledzenie przebiegów napięciowych oraz ocenę zbieżności amplitudowej i czasowej rejestrowanych przebiegów napięciowych. Wstępne wyniki badań pozwoliły także na dokonanie wyboru typu przetwornika drgań do dalszych badań.

Porównanie sygnałów napięciowych z jednocześnie pracujących przetworników drgań serii KD i serii ADXL z sygnałem napięciowym przetworników tensometrycznych w układzie pełnego mostka skompensowanego termicznie (rys. 4.4), zadecydowało o wyborze przetwornika parametrycznego ze wzmacniaczem wewnętrznym ADXL, jako docelowego ze względu na korzystniejsze pasmo przenoszenia w zakresie pomiaru bardzo niskich częstotliwości.

Dalsze badania prowadzono z przetwornikami ADXL ( $P_{pd}$ ), KMZ ( $P_{pm}$ ), mostkowym przetwornikiem tensometrycznym ( $P_{pt}$ ) oraz przetwornikiem potencjometrycznym ( $P_{pp}$ ). Schemat blokowy układu pomiaru i rejestracji pokazano na rysunku 4.5.

56





Rys. 4.4. Porównanie przebiegów napięciowych przetwornika tensometrycznego z przebiegami napięciowymi przetwornika: KD – a, ADXL – b (wymuszenie krzywką I) Fig. 4.4. Compare of gauge bridge voltage courses with voltage courses of transformer: KD – a, ADXL – b(extorted by cam I)



#### Rys. 4.5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego Fig. 4.5. Block diagram of measure position [161]

Podczas badań (trwających kilka tygodni) szczególną uwagę zwracano na powtarzalność czasową uzyskiwanych wyników badań. Dla krzywek, których zarysy pokazano na rysunku 4.2, ustalono harmonogram pomiarów i zastosowania przetworników pomiarowych (tabli ca 4.2).

Zarejestrowane przebiegi napięciowe w funkcji czasu zamieszczono na kolejnych rysunkach 4.6÷4.9 [161, 179]. Przebiegi napięciowe rejestrowano oscyloskopem cyfrowym OS3020 sprzężonym z ploterem HP, a następnie skanowano.

Harmonogram pomiarów

| Krzywka | Przetwornik<br>drgań | Przetwornik<br>pola magnetycznego | Przetwornik<br>odkształcenia |
|---------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| K1      |                      |                                   | and the second               |
| K1      |                      |                                   |                              |
| K2      |                      |                                   |                              |
| K2      |                      |                                   |                              |
| K3      |                      |                                   |                              |
| K3      |                      |                                   | the little la                |
| K4      |                      |                                   |                              |
| K4      |                      |                                   |                              |

We wszystkich przypadkach oceniano zgodność okresów T,  $t_n$  oraz amplitud napięć pod względem amplitud maksymalnych jak i zgodności czasowej.





Rys. 4.6. Porównanie przebiegów napięciowych przetwornika tensometrycznego z przebiegami napięciowymi przetwornika: ADXL – a, KMZ– b (wymuszenie krzywką I) Fig. 4.6. Compare of gauge bridge voltage courses with voltage courses of transformer: ADXL – a, KMZ – b (extorted by cam I)

Tabela 4.2

| 1 <u>/a</u> T 2.63.Ha | NCRM  | SI SM |
|-----------------------|-------|-------|
| WWWW                  | MAMMA |       |
|                       |       |       |
|                       | 5V 0  |       |

| 1KT 2   | 80        | 3 Ha | NC           | RM | ₹A |     | 5 | БМ    |   |
|---------|-----------|------|--------------|----|----|-----|---|-------|---|
|         | r.two     | WWW  | www          |    |    | WWW |   |       |   |
|         | ta<br>MMa | Aug  | T<br>Million |    |    |     |   | ///// | 1 |
| P x 0.5 | , ,       | DK Z | 20m\         |    | V  | 0.1 | 3 |       |   |





vs. 4.7. Porównanie przebiegów napięciowych przetwornika tensometrycznego z przebiegami napięciowymi przetwornika: ADXL – a, KMZ – b (wymuszenie krzywką II) ig. 4.7. Compare of gauge bridge voltage courses with voltage courses of transformer: ADXL – a, KMZ – b (extorted by cam II)







Rys. 4.9. Porównanie przebiegów napięciowych przetwornika tensometrycznego z przebiegami napięciowymi przetwornika: ADXL – a, KMZ – b (wymuszenie krzywką IV) Fig. 4.9. Compare of gauge bridge voltage courses with voltage courses of transformer: ADXL – a, KMZ – b

(extorted by cam IV)

Przeprowadzoną serią badań potwierdzono, że natężenie pola magnetycznego przy powierzchni zginanej próbki zawiera łączną informację o dynamicznym stanie naprężeń i generowanych drganiach [179].

#### 4.1.2. Badanie podobieństwa

Naprężenia mechaniczne od zginania mierzone tensometrem oraz strzałkę ugięcia płaskownika porównano z pomiarem natężenia pola magnetycznego, które wykonano przetwornikiem magnetorezystancyjnym. Założono, że odkształcenia zarejestrowane mostkiem tensometrycznym powinny być proporcjonalne do wyniku pomiaru strzałki ugięcia oraz stanu naprężeń w zakresie dolnej granicy naprężeń sprężystych.

Jednoczesne pomiary strzałki ugięcia s, odkształcenia materiału od naprężeń  $\varepsilon$ , natężenie stycznej pola magnetycznego  $H_t$  oraz porównanie pomierzonych sygnałów wykazały proporcjonalność zmian ugięcia, odkształceń próbki i natężenia pola magnetycznego rejestrowane przetwornikiem magnetorezystancyjnym dla małych odkształceń. Na wykresie zamieszczonym na rysunku 4.10 porównano wartości szczytowe napięć dla pomiarów wykonanych:

- przetwornikiem potencjometrycznym  $u_{pp}(t)$ ,
- przetwornikiem tensometrycznym  $u_{pt}(t)$ ,
- przetwornikiem magnetorezystancyjnym  $u_{pm}(t)$ , dla każdej z krzywek K1 do K4.



62

*Rys.* 4.10. Napięcia szczytowe zarejestrowane trzema równoległymi układami pomiarowymi Fig. 4.10. Peak voltage measured by three parallel measuring arrangements

Napięcie maksymalne (szczytowe) mostka tensometrycznego  $U_{pt}$  mierzącego ugięcie s płaskownika jest proporcjonalne do siły F i odkształcenia materiału  $\varepsilon$ , jak wykazują kolejne przekształcenia:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{3EB} = \frac{F \cdot l \cdot l^2}{3EB} = \frac{\sigma W l^2}{3EB} = \frac{\varepsilon 2l^2}{h}, \qquad (4.1)$$

(zmieniono powszechnie stosowane oznaczenie wskaźnika momentu bezwładności ze względu na oznaczenie magnetyzacji J)

- gdzie: s strzałka ugięcia,
  - F siła zginająca płaskownik,
  - E moduł sprężystości,
  - W wskaźnik wytrzymałości,
  - B wskaźnik momentu bezwładności,
  - $\varepsilon$  odkształcenia materiału,
  - h grubość płaskownika,
  - l ramię działania siły F.

Wyjściowe szczytowe napięcie pomiarowe mostka tensometrycznego  $U_{pt}$  proporcjonalne do odkształcenia  $\varepsilon$  wynosi:

$$U_{\rm pt} = \varepsilon k U_{\rm z} \,, \tag{4.2}$$

gdzie:  $\varepsilon$  – odkształcenia wywołane obciążeniami mechanicznymi,

- k współczynnik czułości odkształceniowej tensometru,
- $U_z$  napięcie zasilające mostek tensometryczny.

Napięcie wyjściowe mostkowego przetwornika magnetorezystancyjnego  $U_{pm}$  jest proporcjonalne do wartości stycznej natężenia pola magnetycznego  $H_t$  mierzonej przy powierzchni materiału:

$$U_{\rm pm} = k_{\rm pm} H_{\rm t} \,, \tag{4.3}$$

gdzie  $k_{pm}$  – rzeczywisty współczynnik przetwarzania przetwornika magnetorezystancyjnego.

Na granicy środowisk pomiędzy materiałem magnetycznym a powietrzem mamy do czynienia z ciągłością składowej stycznej. Oznacza to, że wartość ta jest porównywalna do wartości natężenia pola magnetycznego w badanym materiale  $H_w$ . Pomiędzy wartościami napięć szczytowych  $U_{\rm pt}$  i  $U_{\rm pm}$ , jak pokazano na wykresie – rys. 4.10, występują zakresy proporcjonalności wskazań i związek z wartością napięcia przetwornika potencjometrycznego  $U_{\rm pp}$  rejestrującego strzałkę ugięcia s. W przeprowadzonych badaniach wykazano związek proporcjonalno-ilościowy pomiędzy pomiarem naprężeń i pomiarem natężenia pola magnetycznego.

Kolejne analizy wyników pomiarów potwierdzają możliwość bezstykowego pomiaru drgań. O możliwości rejestracji drgań przetwornikiem magnetorezystancyjnym świadczą charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe (FFT), otrzymane z pomiaru drgań przetwornikiem ADXL oraz z pomiaru zmian natężenia pola magnetycznego. Otrzymane charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe zamieszczono na rysunku 4.11. Istotny jest fakt niewielkiego wpływu zewnętrznego zakłócającego pola elektromagnetycznego na wynik pomiaru.





Fig. 4.11. Spectrum characteristics recorded by: vibration transformer – a, magnetoresistant transformer – b

Ugięcie płaskownika krzywką generowało drgania, które pojawiały się po zaniku działania siły. Drgania te były widoczne dla krzywek K1, K2, K3. Krzywka K4, której konstrukcja oparta została na mimośrodowym zamocowaniu łożyska kulkowego, oddziaływała na płaskownik w sposób płynny i w dłuższym okresie, przez co amplitudy tych drgań były bardzo małe w stosunku do krzywek K1 i K2 jak wykazano na rysunku 4.9b.

#### 4.2. Statyczny stan naprężeń w elemencie wirującym

Wykrywanie naprężeń statycznych w elementach wirujących jest ważnym zagadnieniem diagnostyki technicznej elementów maszyn. Umożliwia wykrycie asymetrii naprężeń

wewnętrznych, np. od obciążeń termicznych lub błędu montażu [176, 180, 193]. Potwierdzenie możliwości zastosowania metod magnetycznych pomiarowych w tym zakresie było kolejnym etapem badań. Badania zmierzały do wykazania, że pole magnetyczne wokół wirującego elementu zawiera użyteczne i możliwe do pomiaru sygnały informujące nie tylko o kształcie, ale i stanie naprężeń mechanicznych elementu. Etap ten łączył badania magnetyczne z diagnostyką techniczną. Trudność polegała na zaprojektowaniu elementu do badań.

#### 4.2.1. Stanowisko pomiarowe

Do badań zaprojektowano krążek stalowy o średnicy 14 cm i grubości tarczy 11mm jak pokazano na fotografii (rys. 4.12a) [157]. Krążek ten osadzono na wale stanowiska pomiarowego. Przy powierzchni bocznej krążka umieszczono przetwornik pomiarowy magnetorezystancyjny (rys. 4.12b) [157]. Statyczny stan naprężeń wprowadzano, zwiększając docisk za pomocą śrub regulacyjnych I, II, III.





Czuinik KMZ

Rozmieszczenie otworów i nacięć w krążku umożliwiło wprowadzenie statycznego stanu naprężeń w miejscach oznaczonych na rysunku 4.12 gwiazdką. Magnetorezystancyjny przetwornik pomiarowy zamocowano stycznie (równoległe) do powierzchni tarczy w odległościach l =1 mm w celu pomiaru składowej  $H_t$ . Pomiary prowadzono przy stałej prędkości kątowej (10 obrotów na sekundę). Możliwość wykrywania wpływu naprężeń w elementach wirujących analizowano także symulacyjnie. Ścieżkę pomiarową powierzchni krążka pod magnetorezystorem pomiarowym oznaczono na rysunku 4.13 linią przerywaną. Analizowano kolejne przypadki stanów naprężeń w krążku, zadając naprężenia przez dokręcenie śrub I, II i III, kontrolując szerokość szczeliny (ugięcie materiału) w celu nieprzekroczenia zakresu naprężeń sprężystych. Od badań oczekiwano potwierdzenia wpływu zmian naprężeń na charakterystyki amplitudowo-czasowe i widmowe oraz potwierdzenia wcześniejszych wyników badań eksperymentalnych.



Rys. 4.13. Mapy rozkładu naprężeń w krążku dla jednej z symulacji Fig. 4.13. Stress distribution in trolley from forces for screwing following screws

Wyznaczone symulacyjnie widma sygnału potwierdziły możliwość wykrywania naprężeń i stosowania metod magnetycznych w badaniach diagnostyki technicznej.

#### 4.2.2. Pomiary i analiza

Przebiegi napięciowe amplitudowo-czasowe (rys. 4.14) uzyskano z pomiarów przeprowadzonych przetwornikiem magnetorezystancyjnym KMZ 10B przy stycznym usytuowaniu przetwornika do powierzchni bocznej krążka. Zarejestrowane charakterystyki widmowe przedstawione na rysunku 4.14a do 4.14c odzwierciedlają zmiany stanu naprężeń i zmiany szerokości szczelin w badanym krążku.





Pomiar pola magnetycznego w pobliżu wirującego elementu zawiera, jak już wcześniej wykazano, informacje o jego kształcie oraz naprężeniach wewnętrznych. W wielu przykładach pomiarowych obserwowano stan pamięci naprężeń (namagnesowanie i czas rozmagnesowania). Przekroczenie granicy sprężystości i przejście w stan odkształceń plastycznych likwiduje efekt Villariego. Z przeprowadzonych badań technicznych i symulacyjnych wynika, że pomiary pola magnetycznego dokonywane w pobliżu wirujących i obciążonych elementów maszyn mają istotne znaczenie diagnostyczne i mogą być stosowane na przykład w diagnostyce kół przekładni zębatych. Istnieje tym samym możliwość uzupełnienia klasycznych metod diagnostyki technicznej diagnostyką magnetyczną.

#### 4.3. Uwagi i wnioski wstępne

Ocenę założonej na wstępie możliwości badań diagnostycznych w zakresie detekcji i pomiaru naprężeń w stalach o bardzo małych czułościach magnetosprężystych i współczynnikach magnetostrykcji przeprowadzono dla stali niskowęglowych. Modele doświadczalne do eksperymentów wykonano ze stali St3 ze względu na jej dostępność.

Omawiane gatunki stali nie były dotychczas badane pod względem efektów magnetosprężystych. Grupa tych materiałów znajdowała się do tej pory poza sferą zainteresowań badań podstawowych. Najczęściej badano i bada się nadal szczególne przypadki żelaza lub niklu o bardzo wysokiej czystości lub materiałów o szczególnych składach chemicznych w celu uwypuklenia poszczególnych związków materiału z procesami mechanicznymi, zmęczeniowymi, cieplnymi i magnetycznymi itd. Są to przede wszystkim folie i szkła metaliczne.

Dla przebadanej pracy grupy stali niskowęglowych wyznaczono:

- krzywe pierwszego magnesowania,
- dynamiczne pętle histerezy,
- magnetyzację nasycenia,
- krzywe przenikalności magnetycznej,
- zakresy natężenia pola magnetycznego dla maksymalnej reakcji magnetosprężystej materiału.

Dla realizacji zagadnienia opracowano kształt próbek do badań, wykonano stanowisko pomiarowo-badawcze i wykonano pomiary. Wykazano, że sposób wyznaczania czułości magnetosprężystej [39] jest wystarczający do zakwalifikowania stali do badań magnetycznych, mimo iż wnosi uproszczenia pomijające energię anizotropii zawartej w budowie kryształu. Zależność sprowadza się do postaci:

$$\frac{\mu_{w}(\sigma_{0}) - \mu_{w}(\sigma_{250})}{\mu_{w}(\sigma_{0}) \cdot \mu_{w}(\sigma_{250})} = \frac{1}{\pi} \sigma \lambda , \qquad (4.4)$$

gdzie:  $\mu_w(\sigma_0)$  – przenikalność materiału pod naprężeniem mechanicznym,

 $\mu_{\rm w}(\sigma_{250})$  – przenikalność materiału bez obciążenia,

– naprężenia mechaniczne,

 $\sigma$ 

 $\lambda$  – współczynnik magnetostrykcji.

Wyznaczono zakresy współczynników magnetostrykcji w przedziale od 0,93·10-6 dla stali P35G aż do 0,355·10-6 dla stali P60T w zakresie charakterystycznego natężenia pola magnetycznego (magnetyzacji JMRM) i naprężeń maksymalnych do 250 MPa (< 0,5 Rsp).

Wyliczone współczynniki magnetostrykcji w zakresie naprężeń sprężystych mieszczą się w dolnej granicy zmian przytaczanych w literaturze dla żelaza technicznego, tj. od 0,58·10-6 do 4,4·10-6 [87]. Czułość magnetosprężysta Smax wyznaczona dla grupy badanych materiałów mieści się w zakresie od 0,144 do 0,68 % ( $\mu$ /MPa) dla stali ST3S to wartość 0,121 % ( $\mu$ /MPa).

Wykazano, że czułość magnetosprężysta stali niskowęglowych jest wystarczająca do magnetycznego odwzorowania naprężeń i drgań w materiałach ferromagnetycznych podczas unikalnego eksperymentu badania dynamicznych naprężeń zginających płaskownik stalowy na specjalnie przygotowanym do badań stanowisku pomiarowym.

Potwierdzono możliwość detekcji lokalnych stanów naprężeń w wyniku analizy amplitudowo-czasowej.

W zakresie pomiarów magnetycznego pola rozproszenia potwierdzono możliwość stosowania przetworników magnetorezystancyjnych wobec utrudnionego dostępu do przetworników hallotronowych nowej generacji.

Potwierdzono słuszność badań w zakresie do 50% magnetyzacji nasycenia. Wyznaczono zakresy maksymalnej czułości magnetosprężystej materiału i jej wartości szczytowe.

Niezbędne natomiast jest uzyskanie informacji o zakresach zmian parametrów magnetycznych w zależności od tolerancji zawartości składu chemicznego materiału ferromagnetycznego.

Kolejne zadanie wynika z konieczności sklasyfikowania wszystkich ważniejszych stali konstrukcyjnych pod względem zależności magnetomechanicznych z zastosowaniem nowoczesnych technik badania wytrzymałości materiałów. Badania takie w zakresie ograniczonym do stali stosowanych w kolejnictwie są realizowane w Katedrze Transportu Szynowego przy współpracy IPPT PAN [159]. Wymagają one zaangażowania ogromnych środków finansowych i zasobów ludzkich z wielu dziedzin naukowych. Badania takie mogą przynieść nieporównywalne korzyści i możliwości zastosowań. Prowadzone badania nie mają w kraju odpowiedników.

Waga zagadnienia wynika z faktu starzenia się parku maszynowego oraz środków transportu kolejowego i samochodowego. Do napraw kierowane są podzespoły o przebiegach liczonych w dziesięciolecia. W samym transporcie szynowym zwraca się uwagę na coraz częstsze występowanie awarii wskutek zmęczenia materiału stali konstrukcyjnej (w znacznej mierze niskowęglowej). Coraz bardziej rysuje się konieczność badania elementów i ich diagnozowania przyszłościowego w przypadku nieznanej historii obciążeń. Szuka się nieniszczących metod badania materiału. Odniesienie się do wielu badań podstawowych materiałoznawstwa jak i zmęczenia materiałów, np. w zakresie energetycznych hipotez zmęczeniowych, w praktycznej realizacji jest niemożliwe. Pozostaje jedynie odniesienie do wykrywania zmian zaistniałych w materiałe, a tu niezbędne są nowe badania i eksperymenty.

#### **5. SONDA POMIAROWA**

Cele stawiane magnetycznej diagnostyce stanu w stosunku do defektoskopii magnetycznej są odmienne. W defektoskopii wykrywamy magnetyczne pole rozproszenia od defektu nieciągłości, co jest równoznaczne z jego lokalizacją. W diagnostyce magnetycznej stanu porównujemy pole zewnętrzne przy powierzchni elementu badanego i wzorcowego. Pomiędzy detekcją magnetycznego pola rozproszenia od defektu a pomiarem zmian namagnesowania od obciążeń mechanicznych występują różnice związane z pomiarem. W defektoskopii możemy stosować wiele typów przetworników pomiarowych czynnych i biernych. W diagnostyce wykorzystujemy jedynie te przetworniki, które swoją konstrukcją umożliwiają maksymalne zbliżenie do powierzchni badanej, ze względu na konieczność pomiaru niewielkich zmian składowej stycznej zewnętrznego pola magnetycznego. Przetworniki hallotronowe w dostępnych konstrukcjach, a także przetworniki indukcyjne, nie mogą być zastosowane. Dostępne przetworniki magnetorezystancyjne serii KMZ 10 umożliwiają pomiar składowej stycznej, są jednak wrażliwe na wpływ składowej odmagnesowującej pola magnetycznego. Możliwość zastosowania przetworników magnetorezystancyjnych potwierdzono w wielu eksperymentach.

#### 5.1. Budowa i zasada pracy sondy

#### 5.1.1. Konstrukcja sondy

Sonda pomiarowa zawiera cztery elementy nieliniowe. Elementy stałe w konstrukcji sondy to jarzmo sondy i dwa magnesy trwałe. Badany materiał jest (czwartym nieliniowym) elementem obwodu pomiarowego. Analityczny opis modelu przy trudności wyznaczenia samego współczynnika odmagnesowania czy rozkładu strumienia magnetycznego ze względu na kształt elementu testowanego jest bardzo trudny. Podobną trudność sprawia analityczne wyznaczenie natężenia pola magnetycznego w bezpośredniej bliskości namagnesowanego elementu. Wykorzystanie opisu analitycznego modeli dipolowych do badania zewnętrznego pola magnetycznego ze względu na jego słuszność dla większych odległości jest także złożone. Próby takie są czynione [95]. Pozostają metody numeryczne, które umożliwiają stosunkowo szybką analizę szerokiej gamy rozwiązań. Do oceny zastosowań metrologicznych, takich jak pomiar naprężeń lub detekcja zmęczenia materiału, wybrano metodę MES pola magnetycznego (Finite Element Metod Magnetic FEMM 2D) i FLUX 8.10 2D/3D. Porównano zgodność tych programów w zakresie oceny 2D [zał. Z3]. Na rysunku 5.1 pokazano przykład układu magnesującego materiał wraz z przetwornikiem pomiarowym MR namagnesowania badanego materiału.



Rys. 5.1. Widok sondy pomiarowej Fig. 5.1. View of measurement probe
Do budowy modelu przyjęto magnesy wymienione w tabeli 5.1. Do modelu wprowadzono parametry magnesu o wymiarach 3x2 mm i gęstości energii 238,8 kJ/m<sup>3</sup>. Materiał próbki to stal P54T wraz z krzywymi magnetyzacji. W nabiegunnik wprowadzono parametry blachy transformatorowej.

|    |       | Paramet | try magnesóv      | v trwałych | -           |                            |  |
|----|-------|---------|-------------------|------------|-------------|----------------------------|--|
| W  | ymiar | Symbol  | Katalogo          | wa gęstość | Dystans dla | Indukcja na<br>powierzchni |  |
| Ø  | H     | Symbol  | ene               | ergn       | 0.1 1       |                            |  |
| Mm | mm    |         | kJ/m <sup>3</sup> | MGsOe      | mm          | Т                          |  |
| 3  | 1     | M1219-1 | 238,8             | 30         | 4,1         | 0.15                       |  |
| 3  | 2     | M1219-2 | 238,8             | 30         | 2,2         | 0.25                       |  |
| 4  | 3     | M1219-3 | 238,8             | 30         | 1,8         | 0.32                       |  |
| 6  | 2     | M1219-4 | 278,6             | 35         | 1,2         | 0.25                       |  |
| 10 | 5     | M1219-5 | 238,8             | 30         | 0,6         | 0.35                       |  |

Wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego w materiale oraz w strefie lokalizacji magnetorezystora rozpoczęto od zadeklarowania siatki MES. Dla zewnętrznego obszaru symulacji przyjęto warunki brzegowe Dirichleta. Warunki brzegowe powietrza z badanym materiałem wyznaczają wprowadzone do programu krzywe magnetyzacji w funkcji natężenia pola magnetycznego, co powoduje, że składowe styczne natężenia pola przy przejściu przez warstwę graniczną są sobie równe (rys. 2.7).



Rys. 5.2. Siatka MES Fig. 5.2. Netting FEM

Zadeklarowana gęstość dyskretyzacji siatki MES zapewnia odpowiednią dokładność map rozkładu pola magnetycznego.

#### 5.1.2. Namagnesowanie materiału w polu magnetycznym sondy

Prezentacje magnesowania materiału przeprowadzono na modelu. Magnesowano wycinek blachy o wymiarze 60 X 40 mm i grubości 10 mm magnesami sondy jak na rysunku 5.3.

Wprowadzenie dodatkowych płaszczyzn w obszar symulacji umożliwiło wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego przy powierzchni materiału i w strefie lokalizacji magnetorezystora, jak pokazano to na rysunku 5.4.



## Rys. 5.3. Indukcja magnetyczna w materiale Fig. 5.3. Magnetic flux density in material

Tabela 5.1



*Rys.* 5.4. *Płaszczyzny pomiarowe* -a, mapy indukcji magnetycznej -b*Fig.* 5.4. *Measuring planes* -a, chart of magnetic flux density -b

Mapy indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego ograniczono do strefy środka sondy. Pozioma i pionowa płaszczyzna analizy rozkładu pola magnetycznego ma wymiary 10x10 mm, jak pokazano to na rysunku 5.5.



- Rys. 5.5. Mapy indukcji magnetycznej w strefie pomiaru a, natężenie pola magnetycznego w strefie pomiaru b
- Fig. 5.5. Magnetic flux density chart in measuring zone -a, and magnetic field strength in measuring zone -b

#### 5.1.3. Pole magnetyczne w strefie przetwornika pomiarowego

Pole magnetyczne wokół przetwornika pomiarowego jest polem niejednorodnym, Wartość składowej ortogonalnej sięga kilku procent składowej stycznej. Przebieg wektorów natężenia pola magnetycznego pokazano na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Wektory natężenia pola magnetycznego Fig. 5.6. Vectors of magnetic field strength

Badanie przebiegu wektorów natężenia pola magnetycznego przeprowadzono na przykładzie symulacji pomiaru naprężeń (FEMM 2D). Na rysunku 5.7 pokazano rozkład indukcji magnetycznej i przebiegi wektorów natężenia pola magnetycznego w strefie pomiaru (lokalizacji KMZ).



Rozkład indukcji magnetycznej i wektorów



natężenia pola magnetycznego nad materiałem w stanie bez napreżenia  $\sigma = 0$  MPa

Rozkład indukcji magnetycznej i wektorów natężenia pola magnetycznego nad materiałem w stanie naprężenia  $\sigma = 250$  MPa

Rys. 5.7. Rozkład wektorów natężenia pola magnetycznego Fig. 5.7. Distribution of vector magnetic field strength

Na rysunkach 5.8 zamieszczono mapy indukcji w materiale o niskiej czułości magnetosprężystej.



Rozkład indukcji magnetycznej w materiale dla  $\sigma = 0$  MPa i 250 MPa



Rozkład natężenia pola magnetycznego w materiale dla  $\sigma = 0$  MPa i 250 MPa

Rys. 5.8. Rozkład indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego w materiale od naprężeń mechanicznych

Fig. 5.8. Distribution of vector magnetic flux density and magnetic field strength as mechanical stress function

Zmiany składowych stycznych pola magnetycznego to odpowiedź materiału na wzrost naprężeń, jak pokazano na rysunku 5.9.





- Rys. 5.9. Zmiany składowych natężenia pola magnetycznego w funkcji lokalizacji przetworni ka pomiarowego
- Fig. 5.9. Change components of magnetic field strength as a function of position of measure ment transformer

Z zakresu zmian natężenia pola magnetycznego od naprężeń wyznaczono czułość pomiarową układu. Wynosi ona dla konkretnego przypadku, poddanego symulacji, 0,114% ( $H_t$ )/250 MPa. Porównanie zmian czułości magnetosprężystej z czułością przetwarzania sondy oraz sondy wraz z układem wzmacniacza przedstawia tabela 5.2.

Tabela 5.2

| Czułość                | Parametry przetwarzania sondy pomiarowej |                       |  |  |  |  |
|------------------------|--|-----------------------|--|--|--|--|
| magnetosprężysta       | Zmiana natężenia pola                    | Napięcie przetwornika |  |  |  |  |
|                        | magnetycznego od naprężeń                | (wzmocnienie 1x)      |  |  |  |  |
| S <sub>max</sub>       | $\Delta H_{\rm t}/\sigma$                | $U_{\rm pm}$          |  |  |  |  |
| 0,121                  | 2  | 0,04                  |  |  |  |  |
| %(μ <sub>w</sub> )/MPa | (A/m)/MPa                                | (mv)/MPa              |  |  |  |  |

Porównanie parametrów pomiarowych

## 5.2. Błąd pomiaru

Na wynik pomiaru mają wpływ: temperatura, parametry magnetyczne i anizotropia materiału oraz parametry układu pomiarowego.

Parametry magnetyczne materiału zależą od:

- procesu obróbki plastycznej,
- procesu obróbki cieplnej,
- szybkości chłodzenia,
- czynnika chłodzącego,
- relaksacji naprężeń,
- czasu starzenia.

Parametry obwodu magnesującego zależą od:

- stałości czasowej parametrów magnesów trwałych,
- zmienności temperaturowej parametrów obwodu magnetycznego,
- odległości pomiaru,
- kształtu i wymiaru elementu,
- współczynnika odmagnesowania.

Parametry układu pomiarowego zależą od:

- stabilności napięcia zasilania wzmacniacza pomiarowego i przetwornika pomiarowego,
- nieliniowości przetwarzania przetwornika pomiarowego magnetorezystancyjnego,
- temperatury pracy przetwornika pomiarowego,
- parametrów wzmacniacza pomiarowego.

Błąd układu pomiarowego można kontrolować poprzez dobór parametrów elementów składowych. Dla danego elementu współczynnik odmagnesowania jest niezmienny i zawarty jest w każdym pomiarze. Największe błędy powodowane są składową natężenia pola odmagnesowującego magnetorezystor i zmianą odległości pomiaru.

#### 5.2.1. Błąd przetwarzania przetwornika

Zmienność składowych  $H_x/H_y$  w strefie pomiaru przedstawiono na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Składowe  $H_x$  i  $H_y$  natężenia pola magnetycznego w strefie pomiaru Fig. 5.10. The  $H_x$  and  $H_y$  components in the measurement area of magnetic field strength

Regulacja odległości sondy pomiarowej i wielkości szczelin umożliwia optymalizację pomiaru. Dla szczeliny pomiarowej 1 mm i odległości przetwornika KMZ od powierzchni materiału udział składowych  $H_x/H_y$  można ograniczyć poniżej 0,02%. Ten nieznaczny udział składowych może być przyczyną błędu przetwarzania sięgającą kilkunastu procent. Założenia metody wskazują na konieczność zachowania stałej bazy pomiarowej, a przede wszystkim stałej odległości pomiaru. Każdy przypadek pomiarowy wymaga oddzielnego skalowania, gdyż ma charakter względny.

76





Wraz z odległością sondy (rys. 5.11) maleje natężenie pola w szczelinie, jednak poprawia się czułość przetwornika.

#### 5.2.2. Błąd powodowany zmianą odległości pomiaru

Błąd detekcji wad podczas magnetycznych nieniszczących badań defektoskopowych zależy głównie od odległości sondy pomiarowej od materiału. Jeżeli sonda pomiarowa jest wyposażona w przetwornik magnetorezystancyjny a nie w hallotron, to dodatkowy błąd powodowany jest negatywnym oddziaływaniem składowej normalnej magnetycznego pola rozproszenia na przetwornik. Dla stosunku składowych  $H_x/H_y = 0,1$  błąd przetwarzania sięga 50% [129]. Dodatkowa przyczyna wpływająca na błąd pomiaru i czułość detekcji wynika z niezachowania podczas pomiaru stałej odległości sondy pomiarowej od badanej powierzchni. Wartość tego błędu może sięgać 70%.

Mierzone natężenie pola magnetycznego magnesowanego elementu uzależnione jest od odległości przetwornika pomiarowego od powierzchni. Najczęstszą przyczyną zmian odległości jest bicie promieniowe elementu. Ze względu na złożoność analityczną zagadnienia wpływ bicia promieniowego elementu (rys 5.12) na pomiar natężenia pola magnetycznego wyznaczono symulacyjnie.



Rys. 5.12. Wpływ bicia promieniowego na odległość l<sub>s</sub> przetwornika pomiarowego od powierzchni

Fig. 5.12. The influence of radial beating for  $l_s$  distance of measurement transducer from the surface Odległość  $l_s$  przetwornika pomiarowego zmienia się po obwodzie obręczy w zakresie  $l_{s1} \le l_{s2} \le l_{s2} = l_{s1}+\delta$ . Przeanalizowany zostanie wpływ bicia promieniowego w zakresie od – 0,45 mm do + 0,55 mm na błąd pomiaru od przekroczenia założonej odległości pomiaru równej 0,5 mm (rys. 5.13).



- Rys. 5.13. Zmienność składowej  $H_x$  po obwodzie obręczy dla  $l_s = 0,05 \text{ mm} (H_{max})$  do 1,00 mm  $(H_{min})$
- Fig. 5.13. Variability of  $H_x$  component on the hoop circumference for  $l_s = 0.05 \text{ mm} (H_{max})$  to 1.00 mm  $(H_{min})$



W przeliczeniu procentowym wpływ bicia na wartość błędu przedstawia się następująco (rys. 5.14):

Rys. 5.14. Wpływ  $\Delta l_s$  na błąd pomiaru Fig. 5.14. The influence of  $\Delta l_s$  measurement mistake

Zmiana odległości przetwornika w zakresie  $0.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  jest przyczyną błędu w zakresie + 6% do -7 %. W celu ograniczenia wpływu błędu pomiaru należy zapewnić stałą odległość pomiaru. Dopuszczalne jest bicie promieniowe w zakresie setnych milimetra.

77

#### 5.2.3. Powtarzalność pomiaru

W badaniach sondy pomiarowej zwrócono szczególną uwagę na powtarzalność czasową i wpływ temperatury na proces pomiaru. Badania powtarzalności czasowej przeprowadzono na wzorcu, rysunek 5.15, stosowanym w przygotowywaniu do badań defektoskopowych. Wzorcem tym jest krążek stalowy z trzema grupami nacięć na powierzchni bocznej.





Pomiar strumienia rozproszenia wykonany sondą pomiarową w odstępie dwóch godzin przedstawiono na rysunku 5.16.



Rys. 5.16. Pomiar wzorca z odstępem 2 godzin Fig. 5.16. Measurement of pattern with space of two hours

Kolejne stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 5.17 wykonano do badania stabilności temperaturowej sondy i powtarzalności pomiaru.

Do badań zastosowano oscyloskop cyfrowy, mający funkcję akumulacji zapisu mierzonego sygnału (nakładania kolejnych pomiarów). Powtarzalność pomiaru elementu z wadą badano w zakresie zmian temperatury od 21°C do 51°C (rys. 5.18).

Dla każdej temperatury przeprowadzono po 5 serii pomiarowych. Zmiany natężenia pola magnetycznego nad powierzchnią próbki powodowane były w przeważającej mierze, niestabilnością mechanizmu przesuwu sondy.



Rys. 5.17. Próbka poddawana badaniom: zdjęcie próbki (a), powiększenie miejsca uszkodzenia (b), sposób pomiaru (c), fotografia stanowiska pomiarowego (d)
Fig. 5.17. Analysed sample: photography of sample (a), place of damage in zoom (b), base of measurement (c), photography of measurement post (d)



*Rys.* 5.18. Badanie powtarzalności pomiaru:  $51^{0}C(a)$  i  $21^{0}C(b)$ *Fig.* 5.18. Investigation of measurement repetition: for  $51^{0}C(a)$  and  $21^{0}C(b)$ 

#### 81

### 6. APLIKACJE LABORATORYJNE METODY POMIAROWEJ

Podstawowa różnica między badaniami magnetycznymi w diagnostyce technicznej a klasyczną diagnostyką wibroakustyczną wynika z dodatkowych możliwości poszerzających zakres badań elementów maszyn o kontrolę materiału. Możliwe staje się monitorowanie pracy maszyny przez badanie zmian zachodzących w materiale poszczególnych elementów składowych pod wpływem obciążeń mechanicznych [182, 190]. Porównanie widma pola magnetycznego pomierzonego podczas pracy nowego elementu maszyny z widmem pomierzonym po upływie określonego czasu pozwala na pełniejszą ocenę jego stanu technicznego.

Rozdział poświecony jest badaniom naprężeń w materiale, zmęczenia materiału oraz defektoskopii magnetycznej.

## 6.1. Badanie naprężeń sondą pomiarową

Z cech konstrukcyjnych sondy pomiarowej i metodyki pomiarów magnetycznych wynika, że badane są zmiany magnetyzacji materiału w wierzchniej warstwie. Wykrywanie i pomiar naprężeń za pomocą sondy pomiarowej uzależniony jest w znacznej mierze od jednorodności rozkładu naprężeń w badanym elemencie. Inny rozkład naprężeń będzie dla próbki rozciąganej, a inny dla próbki ze złożonym stanem naprężeń od rozciągania i skręcania i inna wartość magnetyzacji, co wykazano symulacyjnie (p. 3.5). Zakładając tę samą wartość naprężeń zastępczych w różnych układach obciążeń mechanicznych otrzymuje się różne wartości mierzonego natężenia pola magnetycznego. Badanie złożonego stanu naprężeń w każdym przypadku będzie związane z koniecznością skalowania układu pomiarowego. Możliwości pomiaru naprężeń od sił ściskających i rozciągających w próbkach ze stali St3S przebadano na maszynie wytrzymałościowej.

#### 6.1.1. Pomiar naprężeń jednorodnych w próbce rozciąganej

Pomiary naprężeń od sił rozciągających lub ściskających poprzedzono symulacją przedstawioną na rysunku 6.1. Dla próbki rozciąganej nierównomierność rozkładu naprężeń występuje jedynie w miejscach utwierdzenia i przyłożenia siły. W miejscu zakładanego pomiaru sondą pomiarową stan naprężeń jest jednorodny. Wygenerowaną siatkę MES dla modelowanego pomiaru pokazano na rysunku 6.2.



Rys. 6.1. Obraz rozkladu naprężeń w próbce rozciąganej Fig. 6.1. Stress distribution in sample while stretching



Rys. 6.2. Wygenerowana siatka MES w powierzchni badanej Fig. 6.2. Generated mesh within the investigated area

Dla przyjętych stanów naprężeń 0 MPa i 120 MPa różnice w obrazie przebiegu linii sił natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej dotyczą przede wszystkim warstwy wierzchniej. Uzyskane obrazy będące wynikiem przeprowadzonej symulacji FEMM przedstawiono na rysunku 6.3.





Metoda magnetyczna zapewnia bezstykowy pomiar. Pomiar taki prowadzono w próbkach stalowych przygotowanych do badań wytrzymałościowych. Badano próbki ze stali ST3 o średnicy 10 mm, długości 150 mm i przekroju 78.5 mm<sup>2</sup>. Próbki mocowane w maszynie MTS (rys. 6.4) poddawano obciążeniom w zakresie od  $0\div 8$  kN, zmieniając częstotliwość cyklu obciążeń od  $0,1\div 50$  Hz. Wyniki badań potwierdzają możliwość bezstykowego pomiaru naprężeń i drgań. Wyniki pomiarów zamieszczono na rysunkach 6.5 i 6.6. Maszyna MTS sterowana elektronicznie zapewnia regulację wartości siły podczas badań.



Rys. 6.4. Stanowisko pomiarowo rejestrujące – a, próbka z sondą pomiarową – b Fig. 6.4. Measure-recording post – a, and sample with measure probe – b

Przeprowadzona seria pomiarów wykazała liniowość zmian magnetyzacji od naprężeń dla dolnego zakresu granicy sprężystości  $R_s$ . Asymetrię pomiędzy ściskaniem a rozciąganiem zaobserwowano przy sile 5 kN. Możliwość bezstykowego pomiaru częstotliwości zmian naprężeń a więc i drgań pochodzenia mechanicznego badano w zakresie obciążeń zmiennych od 0,1 Hz ÷ 50 Hz (rys. 6.6). Obniżenie siłą 1 kN przy częstotliwości 50 Hz wynikało jedynie z ograniczeń technicznych maszyny wytrzymałościowej.



83



Większość ferromagnetyków cechuje proporcjonalność zmian parametrów magnetycznych do naprężeń w dolnych zakresach naprężeń sprężystych przy asymetrii pomiędzy ściskaniem a rozciąganiem.

Charakterystyki przetwarzania sondy pomiarowej i pomiaru obciążeń mechanicznych otrzymane z badań próbki o przekroju okrągłym wykonane na stanowisku MTS zamieszczono na rysunku 6.7. Częstotliwościową charakterystykę pomiaru obciążeń mechanicznych sondą pomiarową przedstawiono na rysunku 6.8.











Rys. 6.8. Charakterystyka częstotliwościowa sondy Fig. 6.8. Frequency characteristics of measure probe

Zastosowanie sondy do celów pomiarowych wymaga znajomości parametrów magnetomechanicznych materiału. Każdy następny przypadek pomiarowy wymaga skalowania sondy.

#### 6.1.2. Symulacja i pomiar natężenia pola magnetycznego przy powierzchni koła zębatego

Badania kół zębatych to kolejny etap eksperymentu. Koła zębate są jednym z podstawowych elementów składowych maszyn. Badanie kół zębatych metodą magnetyczną to rozwój diagnostyki technicznej w badaniu przekładni zębatej. Badaniom poddano koło zębate pokazane na rysunku 6.9. W kole tym jeden z zębów został podcięty u podstawy elektroiskrowo [139].



Rys. 6.9. Zasada pomiaru i fotografia badanego koła zębatego Fig. 6.9. Placement of the probe and analysed sprocket wheel

86

W konsekwencji podcięcia zęba zmienia się pole magnetyczne przy powierzchni bocznej, co wykrywane jest przez sondę pomiarową. Zmiany rozkładu indukcji magnetycznej na skutek podcięcia symulowane z uproszczeniem w wymiarze 2d pokazuje rysunek 6.10.



Rys. 6.10. Obraz indukcji magnetycznej w wycinku badanego koła zębatego, ząb dobry (a) oraz ząb podcięty (b)

Fig. 6.10 Magnetic flux density in enlarged part of sprocket wheel, not injured tooth (a) and damaged tooth (b)

Przebiegi amplitudowo-czasowe, przedstawione na rysunku 6.11, są wynikiem symulacji obrotu koła zębatego o 24 zębach (10 obrotów na min.) i pomiaru sondą zewnętrznego pola magnetycznego. Ponieważ badano charakter jakościowy zmian natężenia pola magnetycznego, dlatego osie przebiegów czasowych przeliczono na wartość  $U_{\rm pm}$ .



Rys. 6.11. Wycinek przebiegu amplitudowo-czasowego dla koła z zębem uszkodzonym Fig. 6.11. Amplitude-time courses for a wheel with injured cog in time zoom

Podcięcie zęba daje wyraźnie identyfikowalną zmianę natężenia pola magnetycznego. Wyniki pomiaru koła zębatego sondą pomiarową przedstawiono na rysunku 6.12 [98]. Potwierdzono tym samym zasadność prowadzenia symulacji komputerowych oraz zadowalającą zgodność sygnału mierzonego z symulowanym.

W podobny sposób można identyfikować zmiany naprężeń u podstawy zęba. Metoda pomiaru magnetycznego umożliwia wykrycie stanu przedawaryjnego przekładni i jej wyłączenie.



Rys. 6.12. Zarejestrowane sondą zmiany natężenia pola magnetycznego Fig. 6.12. Record of magnetic field intensity recorded by measuring searcher

## 6.1.3. Badanie nierównomierności naprężeń w połączeniu wciskowym

Kolejna aplikacja laboratoryjna metody polegała na ocenie poprawności połączenia wciskowego za pomocą metody magnetycznej [137]. Możliwość bezstykowej kontroli naprężeń ma duże znaczenie w procesie łączenia i montażu elementów maszyn.

Badania przeprowadzono na połączeniu pokazanym na rysunku 6.13. Kształt pierścienia zewnętrznego narzucony został stosowanym systemem mocowania stanowiska pomiarowego.

Wcisk  $\delta$ , dla zadanych promieni pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego, oceniono analitycznie i numerycznie. Założono naprężenia w zakresie do ½ granicy sprężystości dla stali St3. Obliczeniami numerycznymi oceniono wpływ kształtu podstawy pierścienia zewnętrznego na odkształcenia jego powierzchni bocznej. Tensometrami mierzono odkształcenia w wybranych miejscach pierścienia.

Wyniki odkształceń konfrontowano z pomiarami natężenia pola magnetycznego. W celu dodatkowego wykazania możliwości pomiarowych metody w miejscu tensometru T1 wprowadzono pomiędzy powierzchnie pierścieni pasek folii stalowej o grubości 0,03 mm i szerokości 6 mm. Sposób prasowania pierścienia wewnętrznego ręczną prasą śrubową nie zapewniał asymetrii wcisku.





Przed eksperymentem przeprowadzono analityczną ocenę naprężeń od przyjętego zakresu przemieszczeń  $\delta$  w celu utrzymania założonej wartości naprężeń. Pierścień zewnętrzny wykonany jest ze stali St3, a pierścień wewnętrzny ze stali wysokostopowej nierdzewnej 1H18N9. Założenia konstrukcyjne:  $\delta = 0.05 \text{ mm}$ ,  $r_1 = 71 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 66 \text{ mm}$ ,  $r_3 = 47 \text{ mm}$ .

Dla równych  $E_1 = E_2 = E$  ciśnienie w połączeniu wciskowym wyniesie:

$$p = \frac{E\delta}{r_2} \left( \frac{\left(r_2^2 - r_1^2\right) \cdot \left(r_3^2 - r_2^2\right)}{2r_2^2 \left(r_3^2 - r_2^2\right)} \right).$$
(6.1)

Naprężenia  $\sigma_r$ i  $\sigma_t$  wyniosą kolejno:

$$\sigma_{r(\max)} = p , \qquad (6.2)$$

$$p\left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2}\right) \le \sigma_t \le p\left(\frac{2r_2^2}{r_3^2 - r_2^2}\right).$$
(6.3)

Dla przemieszczeń w pierścieniu zewnętrznym równych  $\delta = 0,05$  mm przewidywany przedział zmian naprężeń  $\sigma_t$  powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej pierścienia (St3) od połączenia wciskowego kształtował się w zakresie naprężeń sprężystych w przedziale: 126,35 MPa  $\leq \sigma_t \leq 135,33$  MPa,

 $\sigma_{r(\max)} = p = 9,93 MPa.$ 

Symulacje MES, przedstawione na rysunkach 6.14, 6.15 i 6.16, potwierdzają wyliczenia analityczne i wykazują, że górna część pierścienia wolna jest od wpływu kształtu pierścienia zewnętrznego.



Rys. 6.14. Rozkład naprężeń wzdłuż osi y Fig. 6.14. Distribution of stresses along y-axis



### Rys. 6.15. Rozkład naprężeń wzdłuż osi x Fig. 6.15. Distribution of stresses along x-axis



Rys. 6.16. Rozkład naprężeń wzdłuż osi z Fig. 6.16. Distribution of stresses along z-axis

Symulacje pomiaru natężenia pola magnetycznego sondą pomiarową prowadzono w programie FEMM. Kształt powierzchni bocznej pierścienia spowodował konieczność analizy

90

symulacyjnej rozkładu pola magnetycznego. Przykład rozkładu linii sił pola magnetycznego i indukcji magnetycznej w wycinku pierścienia zewnętrznego pokazano na rysunku 6.17.





Zmiany natężenia pola magnetycznego zarejestrowano oscyloskopem cyfrowym przed i po wcisku. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.18. Na długości obwodu zarejestrowano 505 pomiarów.



Rys. 6.18. Zarejestrowany przebieg natężenia pola magnetycznego Fig. 6.18. Recorded measured data of magnetic field

Na rysunku 6.18 oznaczono lokalizacje tensometrów i ich kierunek w stosunku do osi pierścienia oraz wartości wskazań mostka tensometrycznego. Nierównomierność rozkładu naprężeń od błędu wcisku oddaje w pełni wykres kołowy przedstawiony na rysunku 6.19.





Pomiary magnetyczne porównane z pomiarami tensometrycznymi wykazały niezwykłą precyzję odwzorowania stanu naprężeń w polu magnetycznym. Odkształcenia od naprężeń tnących  $\sigma_t$  mierzono tensometrami T1 i T3. Tensometrami T2 i T4 zarejestrowano odkształcenia od ściskania. Pomiary prowadzono w układzie ¼ mostka tensometrycznego. Pozostałe trzy tensometry mostka pomiarowego pracowały jako kompensacyjne. Wahania temperatury podczas badań nie przekraczały 0,4°C. Gałąź ¼ mostka tensometrycznego wzorcowano dla każdej serii pomiarowej rezystorem o wartości 520 kΩ. Wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego na wysokości osi tensometrów T1 i T3 zamieszczono w tabeli 6.1. Rezultaty przeprowadzonych pomiarów tensometrycznych, na które składały się dwie serie pomiarowe po trzy pomiary przed i po wcisku, zamieszczono w tabeli 6.2. Wyniki porównania pomie-rzonych zależności magnetomechanicznych podano w tabeli 6.3.

Płaszczyzna pomiaru sondy pomiarowej przecina osie tensometrów T1 i T3. Tensometry te zarejestrowały odkształcenia uśrednione od naprężeń tnących. Tensometry T2 i T4 zarejestrowały odkształcenia uśrednione od naprężeń ściskających. Obszary zarejestrowanych naprężeń za pomocą tensometrów przemieszczone są w stosunku do płaszczyzny pomiaru magnetycznego o kilka milimetrów. Podstawowym wnioskiem przeprowadzonego eksperymentu było powiązanie zbieżności błędu połączenia wciskowego ze zmianami pola magnetycznego elementu, jak pokazano na rysunku 6.20.

Tabela 6.1

Pomiar magnetyczny

| Wyniki pomiaru | Tensometry |     |     |     |  |  |  |  |
|----------------|------------|-----|-----|-----|--|--|--|--|
| [A/m]          | T1         | T2  | T3  | T4  |  |  |  |  |
| Przed wciskiem | 240        | 390 | 260 | 180 |  |  |  |  |
| Po wcisku      | 520        | 320 | 330 | 420 |  |  |  |  |
| АН             | 260        | 70  | 70  | 240 |  |  |  |  |

| Pomiar tensometryczny   |     |        |       |        |       |  |  |  |  |
|---|-----|--------|-------|--------|-------|--|--|--|--|
| Tensometr pomiarowy   |     | T1     | T2    | T3     | T4    |  |  |  |  |
| pięcie wyjściowe mostka<br>$as = 6 \text{ V}, R_t = 120 \Omega, k = 1,95$ | mV  | 1,45   | -0,34 | 0,20   | -3,53 |  |  |  |  |
| znaczone odkształcenie  | %   | 0,483  | 0,113 | 0,066  | 1,177 |  |  |  |  |
| nierzone naprężenia<br>ąd wcisku)   | MPa | 106,4  | 24,8  | 14,5   | 259,6 |  |  |  |  |
| znaczone analitycznie naprężenia<br>n prawidłowy)                         | MPa | 130,84 | 9,93  | 130,84 | 9,93  |  |  |  |  |
|   |     |        |       |        |       |  |  |  |  |

Porównanie wyników pomiarów

Tabela 6.3

| Punkt lokalizacji osi tenso                          | metru | T1    | T2   | Т3   | T4    |
|--|-------|-------|------|------|-------|
| Pomierzona zmiana natężenia<br>Pola magnetycznego ΔH | A/m   | 260   | 70   | 70   | 240   |
| Pomierzone naprężenia $\Delta\sigma$                 | MPa   | 106,4 | 24,8 | 14,5 | 259.6 |



Na

U

Wy

Po

(bła

Wy

(sta



Rys. 6.20. Fotografia pierścienia i schemat błędu połączenia Fig. 6.20. Photo of steel rings and schema of interference error

Potwierdzono eksperymentalnie możliwość wykrywania zmian naprężeń dla stali konstrukcyjnych o niewielkich czułościach magnetomechanicznych i współczynnikach magnetostrykcji. Czułość pomiarową metody potwierdza fakt wykrycia wpływu paska folii (0,03 mm) wprowadzonego podczas wcisku pomiędzy powierzchnie pierścieni w miejscu kontrolowanym tensometrem T1.

W dalszych badaniach przewidziano zmiany w konstrukcji sondy, zwiększenie liczby tensometrów i zmianę ich lokalizacji.

#### 6.2. Badanie zmęczenia materiału

W rozdziale przedstawiono możliwości diagnostyki magnetycznej na przykładzie badania wpływu stanu zmęczenia materiału na jego parametry magnetyczne. Atrakcyjność metod magnetycznych i oczekiwania z nimi związane powodują, że prace nad wyjaśnieniem wielu zjawisk związanych z pomiarem i interpretacją wyników pomiarów dla szerokiego zakresu badań technicznych będą prowadzone na coraz szerszą skalę. Prace prowadzone w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej skierowane są na diagnostykę naprężeń, rozwoju wad oraz diagnostykę zmęczenia materiału ferromagnetycznych elementów maszyn meto-dami magnetycznymi w zakresie oceny wpływu pełzania i zmęczenia od obciążeń cyklicznych [182, 190]. Prowadzone są równolegle badania zmęczenia materiału metodami magnetycznymi i metodami mechaniczno-pomiarowymi opracowanymi przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN [25, 26].

#### 6.2.1. Magnetyczne metody pomiaru zmęczenia materialu ferromagnetycznego

Pomiary wpływu naprężeń, starzenia mechanicznego lub pełzania analizować można badając zmiany pętli histerezy magnetycznej lub oceniając zmiany poszczególnych składników opisujących tę pętlę, a w szczególności:

- a natężenie koercji,
- b pozostałość magnetyczną,
- c straty histerezowe magnetyczne materiału,
- d wartość namagnesowania lub indukcji dla założonego natężenia magnesującego pola magnetycznego,
- e natężenie zewnętrznego pola magnetycznego dla J<sub>MRM</sub>.

Jeden z wielu sposobów wykrywania zmian magnetyzacji materiału od czynników mechanicznych opracowany w Katedrze Transportu Szynowego polega na pomiarze zewnętrznego natężenia pola magnetycznego  $H_z$  [182] badanego elementu, poddanego równoczesnemu magnesowaniu natężeniem  $H_m$  MRMM (Metoda Reakcji Magnetycznej Materiału). Pod wpływem zewnętrznego czynnika mechanicznego w materiale następuje odwracalna lub nieodwracalna zmiana jego przenikalności o  $\Delta \mu_r$ . Zmiana przenikalności wpływa na namagnesowanie materiału elementu badanego i zmianę jego zewnętrznego pola magnetycznego (rys. 6.21).



*Rys.* 6.21. Schemat wedlug zasady pomiaru metodą MRM Fig. 6.21. The scheme by measurement principal with MRM method Na wynik pomiaru mają wpływ: wartość zewnętrznego pola magnesującego, przenikalność magnetyczna materiału, współczynnik odmagnesowania, parametry układu wzmacniacza pomiarowego wraz z przetwornikiem. Wielość czynników składowych utrudnia interpretację wyników pomiarów. Zapewniając niezmienność punktu bazowego pomiaru oraz tę samą sondę pomiarową badania prowadzić można nie tylko w skali laboratoryjnej, ale i przemysłowej.

### 6.2.2. Badania magnetyczne zmęczenia materiału powierzchni współpracujących mechanicznie

Badania przeprowadzono metodą rolka-rolka (rys. 6.22 a) na stanowisku badawczym AMSLER-a. Pozycję rolki napędzającej stanowił pierścień ze stali szynowej 900A. Pierścień przeciwrolki wykonany był ze stali T54 stosowanej na obręcze zestawów kołowych. Do eksperymentu przygotowano 6 par pierścieni. Dla przyspieszenia procesu zmęczenia materiału zastosowano obciążenie mechaniczne 815 MPa i poślizg 10%. Fotografię pierścienia przygotowanego do badań (rys 6.22b) i zamontowanego w maszynie pokazano na rysunku 6.22 c.

W przerwach obciążeń, co 1000 cykli dokonywano pomiaru składowej stycznej i normalnej natężenia pola magnetycznego w układzie pomiarowym, jak pokazano na rysunku 6.23.

Pierścienie ze stali T54 (materiał obręczy zestawu kołowego) przygotowane do badań poddano pomiarowi przenikalności magnetycznej materiału metodą statyczną. Po zadaniu cyklu obciążeń pomierzono ponownie wypadkową przenikalności względną materiału krążka. Zestawienie średnich wartości przenikalności magnetycznej próbek przed i po obciążeniu pokazano na rysunku 6.24.



*Rys.* 6.22. *Pierścień przed i po zamocowaniu Fig.* 6.22. *The ring before and after attachment* 

Wykryto wpływ obciążeń mechanicznych warstwy wierzchniej na wynikową uśrednioną zmianę przenikalności magnetyczną próbek pierścieniowych sięgającą 9%. Zmiana przenikalności magnetycznej jest związana z odkształceniem plastycznym warstwy wierzchniej, jak pokazano na rys. 6.25, a także niewidocznym na fotografii odkształceniem domen magnetycznych w warstwie wierzchniej i w rdzeniu próbki od naprężeń.



*Rys.* 6.23. Pomiar składowej  $H_1$  natężenia pola magnetycznego Fig. 6.23. Measurement  $H_1$  component of magnetic field strength



- Rys. 6.24. Wpływ obciążeń mechanicznych na zmianę przenikalności magnetycznej względnej próbek pierścieniowych
- Fig. 6.24. The influence of mechanical loads on relative magnetic permeability of ring samples



Rys. 6.25. Fotografia wycinka przekroju warstwy wierzchniej krążka ze stali 900A Fig. 6.25. The photography of a section sector of a surface layer of roller made from steel 900A Wykonano przeliczenia, mające na celu wyodrębnienie z wartości przenikalności magnetycznej uśrednionej przekrojem rzeczywistej lub zbliżonej przenikalności warstwy wierzchniej. Porównano wartości pomierzonych strumieni magnetycznych dla  $\mu_r$  max przy  $\theta = \ln = \text{const:}$ 

$$\Phi_{1} = \frac{\theta_{1}}{R_{ml}} = \frac{Hl}{\frac{l}{s \cdot \mu_{r}}} \mu_{0}, \qquad \Phi_{2} = \frac{\theta_{2}}{R_{m2}} = \frac{Hl}{\frac{l}{s \cdot \mu_{rs}}} \mu_{0}.$$
(6.4)

Dla stałej wartości amperozwojów otrzymujemy proporcję:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{s\mu_{r\dot{s}}}{s\mu_r} \ . \tag{6.5}$$

Wprowadzając uproszczenie polegające na tym, że w pierścieniu stalowym po badaniach wyróżnić można dwie strefy, w których występuje materiał pierwotny (przed obciążeniem) o przenikalności  $\mu_r$  i materiał warstwy (po obciążeniu)  $x\mu_r$  o łącznej powierzchni równej s, możemy wyliczyć przenikalności warstwy wierzchniej dla założonej grubości.

Na podstawie danych pomiarowych i wyliczeń otrzymano wykres (rys. 6.26) zależności przenikalności względnej warstwy wierzchniej w funkcji założonej grubości.





Przy założeniu grubości warstwy wierzchniej równej 0,5 mm (rys. 6.27) przenikalność teoretyczna  $\mu$  warstwy wynosi 190. Przenikalność wyprowadzona z danych pomiarowych jest równa 230. Przenikalność rdzenia założono jak dla krążka przed obciążeniem. W analizie pominięto naprężenia wewnętrzne w materiale krążka i dodatkową zmianę przenikalności materiału (efekt Villariego).



Rys. 6.27. Model rozkładu warstw materiału w krążku Fig. 6.27. The model of the distribution of material layers in roller Oczekiwany znaczny spadek przenikalności warstwy wierzchniej ma swoje potwierdzenie w dalszych pomiarach składowych stycznych i normalnych natężenia pola magnetycznego po określonych cyklach obciążeń (rys. 6.29). Stosunek  $\Delta \mu / \Delta cykli$  może być miarą oceny stopnia zmęczenia materiału

#### 6.2.3. Pomiar zmian magnesowania warstwy wierzchniej

W odstępach co 1000 cykli prowadzono pomiar natężenia pola magnetycznego obciążonej powierzchni krążka. Pomiary magnesowania wykonano sondami pomiarowymi, których idea konstrukcji i pomiaru pokazana została na rysunku 6.28 a–b. Rysunek 6.28 przedstawia symulacje rozkładu linii ekwipotencjalnych i indukcji magnetycznej w okolicy przetworników pomiarowych sond mierzących składowe  $H_t$  (rys. 6.28b) i  $H_n$  (rys. 6.28a).

Wyniki uzyskane z pomiarów składowych natężenia pola magnetycznego wraz z odpowiadającymi im przebiegami oraz fotografiami powierzchni materiału w kolejnych fazach obciążeń pokazano na rysunku 6.29.



Rys. 6.28. Zasady pomiaru natężenia pola magnetycznego: składowej normalnej – a, składowej stycznej – b

Fig. 6.28. The measurement principals of magnetic field intensity: normal component -a, tangent component -b

Magnetyczne pole rozproszenia zawiera szereg diagnostycznych informacji o stanie wewnętrznym materiału i jego powierzchni. Fakt ten nie jest bez znaczenia dla oceny stanu elementu wykonanego z materiału ferromagnetycznego.

Wraz z procesem zmęczenia mechanicznego wartość  $\mu_r/H_c$  maleje (wzór 2.15). Parametr  $\mu_r/H_c$  wykazuje większą czułość na procesy degradacji materiału od samego  $\mu_r$  i w pełni charakteryzuje materiał w całym zakresie przebiegu obciążenia zmęczeniowego materiału.

Zaproponowaną w pracy metodę magnetycznej oceny stopnia zmęczenia materiału zastosowano do opisu procesu zmęczenia warstwy wierzchniej krążków badanych na stanowisku AMSLER. W krążkach nowych i obciążanych wytoczono (wybrano) wewnętrzną część materiału, pozostawiając pierścień o grubości 1 mm jak pokazano na rysunku 6.30.



- Rys. 6.29. Korelacje pomiędzy składową normalną a stanem powierzchni krążka opisanym składową styczną natężenia pola magnetycznego
- Fig. 6.29. The correlation between normal component and the condition of the roller surface described by tangent component of magnetic field intensity



Rys. 6.30. Próbki do badań Fig. 6.30. Sample for researches

Przebieg zmian współczynnika  $D_M$  świadczy o procesie zmęczenia materiału, jak pokazano na rysunku 6.31. Proces ten można wyrazić także w skali procentowej.



*Rys.* 6.31. Współczynnik  $D_M$  jako wyznacznik zmęczenia materiału Fig. 6.31. Coefficient  $D_M$  alls determinant of material fatigue

Dla pierścieni wykonanych ze stali P54T (na obręcze kolejowych zestawów kołowych) już od 6 000 cykli warstwa wierzchnia materiału, z której wykonano krążki, ulega ścieraniu i złuszczaniu. Współczynnik  $D_{\rm M}$  osiąga wartość 0,19. Dalszy przebieg wiąże się z ciągłą oscylacją parametrów magnetycznych warstwy wierzchniej  $D_{\rm M} = \pm 0,05$ . Jest to przebieg prawidłowy, prowadzący w eksploatacji do stopniowego zmniejszania grubości obręczy aż do uzyskania wymiaru granicznego. Wadliwa eksploatacja prowadzi do lokalnych wzrostów odkształceń plastycznych, a te z kolei prowadzą do zmian fazowych w materiale (7.1) zmniejszających żywotność eksploatowanego podzespołu. Zmiany magnetyczne świadczą o przyspieszeniu procesu zmęczenia materiału i zmniejszeniu żywotności eksploatowanego podzespołu.

#### 6.3. Detekcja wad

W defektoskopii magnetycznej prądem stałym [95] jak i metodami wiroprądowymi [121] prowadzone są symulacje analityczne magnetycznego pola rozproszenia. Metodami analitycznymi opisywane są jedynie proste przypadki defektów. Bardziej złożone przypadki defektów możliwe są do badania jedynie metodami numerycznymi.

#### 6.3.1. Pomiar magnetycznego pola rozproszenia

Pomiary wykonano na stanowisku, którego fotografię pokazano na rysunku 6.32. W skład stanowiska wchodzą układ magnesujący, tj. jarzmo z nawiniętym uzwojeniem oraz wymienne próbki z nacięciami poprzecznymi.

98

99

100



Rys. 6.32. Stanowisko badawcze z zamontowaną próbką Fig. 6.32. Research stand with installed test piece

Wymiary zewnętrzne układu magnesującego wynoszą odpowiednio 175 mm/80 mm/ 40 mm. Uzwojenie cewki stanowi 470 zwojów nawiniętych w czterech warstwach na długości 150 mm. Pomiary natężenia pola magnetycznego wykonano sondą języczkową urządzenia pomiarowego MP-U (Magnetic Fieldmeter) produkcji List-Magnetic GmbH. Zakresy pomiarowe i błąd wskazań zamieszczono w tabeli 6.4. Pomiary te posłużyły do oceny stosowania metod symulacyjnych numerycznych (zał. Z4) w defektoskopii magnetycznej.

Powierzchnie przygotowanych próbek po założeniu w obwód magnesujący skanowano, przemieszczając końcówkę sondy pomiarowej przyrządu zaopatrzonego w hallotron (KSY14) na odcinku 10 mm po obu stronach nacięcia wzdłuż jej osi. Przetwornik KSY zastosowano ze względu na wartości natężenia pola magnetycznego przekraczające zakresy pomiarowe przetworników KMZ. Uśrednione wyniki pomiaru dla próbek z rowkiem 4,0 mm i 0,35 mm zamieszczono na rysunku 6.33.



Rys. 6.33. Pomierzony rozkład natężenia pola magnetycznego Fig. 6.33. Measured distribution of magnetic field strength

-7 -6 -5 -3 -2 -1 0 1

Przeprowadzono dodatkową ocenę rozkładu natężenia pola magnetycznego na powierzchni bocznej próbki w miejscu nacięcia. Posłużono się metodą fluorescencyjno-proszkowa. Fotografie pobudzonego do świecenia w świetle ultrafioletowym proszku magnetycznego zgromadzonego w miejscach o wysokim natężeniu pola magnetycznego zamieszczono na rysunku 6.34.



Rys. 6.34. Fluorescencyjna fotografia powierzchni bocznej próbek Fig. 6.34. Fluorescent photograph of lateral surface of test piece

Badanie magnetyczne proszkiem fluorescensyjnym w świetle ultrafioletowym pozwala ocenić rozkład natężenia pola magnetycznego pomiędzy ścianami wady, jak i w materiale pod nią, a tym samym wstępnie zweryfikować pomiar.

Zastosowane techniki nacinania rowków mogą wpłynąć na parametry magnetyczne powierzchni rowka. Rowek szeroki (4 mm) nacinano frezem palcowym, który wprowadza zgniot powierzchni materiału. Rowek wąski (0,35 mm) nacinano metodą elektroiskrową. Sposób ten nie wprowadza mechanicznych odkształceń powierzchni, jednak wpływu techniki elektroiskrowego nacinania na parametry magnetyczne materiału nie badano.

Symulację MES prowadzono niezależnie w programach Flux2D/3D i Femm2d. Symulację oparto na fizycznym modelu układu (załącznik 4). Dla prawidłowej analizy symulacyjnej rozkładu pola nad wadą uwzględniono rzeczywistą nieliniową charakterystykę magnesowania. Wyznaczoną krzywą pierwotnego magnesowania zamieszczono na rysunku 6.35. Pomierzoną z trzech pomiarów i uśrednioną krzywą pierwotnego magnesowania wprowadzono do katalogów programów symulacyjnych. Pomiary magnetyczne materiału St3 przeprowadzono ze względu na spotykane rozrzuty w składzie chemicznym stali konstrukcyjnych weglowych niskiej jakości.

Wyznaczony skład chemiczny stali (procentowa zawartość dodatków stopowych) zamieszczono w tabeli 6.5 w zestawieniu z danymi normatywnymi.

Węgiel jest jednym z głównych czynników wpływających na parametry magnetyczne stali. W rozpatrywanym przypadku wykryto jego podwyższoną wartość.

Układ objęty modelowaniem składa się z elementów o odmiennych właściwościach fizycznych, dla których założono następujące warunki brzegowe:

- dla granicy modelu - warunki Dirichleta,

- dla granicy stal/powietrze warunki brzegowe,
- określona rzeczywistą przenikalnością magnetyczną względną μ.



Rys. 6.37. Porównanie wyników pomiaru i symulacji Fig. 6.37. Comparison of measurement and simulation

Przesunięcia przebiegów teoretycznych w stosunku do uzyskanych z pomiaru wynikają z uśredniającego wpływu wymiaru struktury pomiarowej zastosowanego hallotronu KSY 14.

#### 6.3.2. Wnioski wstępne

Pomiar pola magnetycznego związany z badaniami dla defektoskopii lub diagnostyki bedzie zawsze wiazał się ze znacznym błędem. W zakresie defektoskopii magnetycznej, gdzie decydujacym czynnikiem jest detekcja wady, bład rzędu 60 % uznawany jest za mały, mimo iż defektoskopię zaliczono do dziedziny metrologii. Zastosowanie metod magnetycznych do pomiaru napreżeń możliwe jest jedynie dla konkretnych rozwiązań (46) i znanych materiałów (toroduktory kołowe, transduktory). Podobnie w omawianym w pracy zakresie diagnostyki magnetycznej problem pomiaru musi być rozpatrywany w stosunku do konkretnego zadania. Każdorazowo będzie wymagał odniesienia się do wzorca i skalowania. Podstawową trudnością w zrozumieniu potrzeb diagnostyki w stosunku do pomiaru jest to, że diagnostyka odnosi się do sygnału wzorcowego. Wzorcem tym jest przebieg amplitudowo-czasowy, a najczęściej amplitudowo-częstotliwościowy (obwiednia sygnału lub analiza falkowa) urządzenia sprawnego. Wykrycie w sygnale pomierzonym składnika nieoczekiwanego jest powodem dalszych szczegółowych analiz. W przypadku badań magnetycznych bazą odniesienia jest namagnesowanie poczatkowe związane z przenikalnością materiału w stosunku do namagnesowania związanego z zaistniałym w przedziale czasu stanem mechanicznym. Z upływem czasu zmienia się stan powierzchni, a tym samym baza pomiarowa. Konstrukcja urządzenia pomiarowego musi uwzględniać także rozkład pola magnetycznego w strefie pomiaru. Przeprowadzona w rozdziale 5 analiza rozkładu pola magnetycznego w strefie powierzchni badanej miała na celu:

- ocenę rozproszenia pola magnetycznego,
- badanie wpływu pola magnetycznego na parametry przetwarzania zastosowanego magnetorezystora,
- dyskusję możliwości pomiaru magnetorezystorem wobec trudności dostępu alternatywnych co do wymiaru, przetworników pomiarowych,
- ocenę powtarzalności pomiaru,
- badanie wpływu zmian temperatury otoczenia,
- dyskusję wybranych przyczyn generujących błąd pomiaru,



Dodatki stopowe stali St3

| 1.0 |  |  |  |
|-----|--|--|--|
| 11  |  |  |  |
| 1.5 |  |  |  |

Tabela 6.5

| Ocena      | С             | Mn            | Si            | P     | S     | Cr   | Ni     | Cu    |
|------------|---------------|---------------|---------------|-------|-------|------|--------|-------|
|            | %             | %             | %             | %     | %]    | %    | %      | %     |
|            |               |               |               | max   | max   | max  | [ max] | max   |
| wg PN      | 0,14<br>÷0,22 | 0,40<br>÷0,65 | 0,12<br>÷0,30 | 0,05  | 0,055 | 0,3  | 0,3    | 0,3   |
| wyznaczone | 0,24          | 0,53          | 0,20          | 0,017 | 0,009 | 0,03 | 0,1    | 0,028 |



Rys. 6.35. Krzywa pierwotnego magnesowania badanego materiału Fig. 6.35. Curve of primary magnetization of studied material

Wymienione warunki brzegowe są dostępne w programie symulacyjnym FEMM (magnetostatycznym). Rozkład indukcji magnetycznej w obszarze nieciągłości dla obu przypadków szerokości rowka (0,35 mm i 4,0 mm) pokazano na rysunku 6.36.



Rys. 6.36. Rozkład indukcji magnetycznej w materiale Fig. 6.36. Distribution of magnetic field density in material

Porównanie wyników symulacji z wynikami pomiaru zamieszczono na rysunku 6.37.

- przeprowadzenie szeregu badań potwierdzających możliwość zastosowań magnetorezystorów (przy czym w szczególnych przypadkach pomiarowych stosowano hallotron typu KSY 14).
- Laboratoryjne zastosowania metody w badaniu stanu elementu oceniono na przykładach:
- pomiaru naprężeń w próbce obciążonej na maszynie wytrzymałościowej,
- pomiaru natężenia pola magnetycznego przy powierzchni bocznej uszkodzonego koła zębatego.
- detekcji rozkładu naprężeń w połączeniu wciskowym,
- pomiaru procesu zmęczenia materiału.
- W zakresie badań symulacyjnych:
- oceniono ograniczenia pomiaru naprężeń,
- oceniono możliwości pomiaru naprężeń złożonych,
- przedyskutowano zasadność przenoszenia stref zmian obciążeń mechanicznych do programów symulacyjnych pola magnetycznego.

## 7. APLIKACJE PRZEMYSŁOWE METODY POMIAROWEJ

Zaproponowane urządzenie badawcze do diagnostyki elementów maszyn i urządzeń wykonanych z materiałów ferromagnetycznych ma szerokie możliwości zastosowania w przemyśle. Prace wdrożeniowe wymagają jednak znacznych nakładów finansowych. W celu przetestowania przemysłowego urządzenia i metody skorzystano z oferty Kolejowych Zakładów Naprawczych S.A. Pyskowice. Udostępnione przez zakład urządzenia i remontowane zestawy kołowe posłużyły za poligon doświadczalny.

## 7.1. Badanie zestawów kołowych

Badanie zestawów kołowych pojazdów szynowych jest ważnym elementem bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Sondę pomiarową zastosowano w badaniach zmęczenia materiału i detekcji wad w obręczach oraz czopach osi zestawów kołowych. Badano zestawy kołowe przeznaczone do regeneracji (po określonym czasie przebiegu) i zestawy po regeneracji. Przygotowane stanowisko pomiarowe z oprzyrządowaniem i sondą pomiarową zamocowaną przy badanej powierzchni obręczy zestawu po przeprowadzonej regeneracji zamieszczono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Fotografia stanowiska pomiarowego Fig. 7.1. Photography of measuring post

Obręcz zestawu skanowano sondą pomiarową w czterech przekrojach po całym obwodzie. Jeden z zestawów kołowych, który poddano badaniu, był remontowany na początku roku 2001. Na kole bosym widniała data ostatniego przeglądu w 1995 r. Zestaw ten pochodził z wagonu czteroosiowego. Podczas pomiaru zmian natężenia pola magnetycznego po powierzchni obręczy wykryto strefy o parametrach magnetycznych znacznie różniących się od wartości średniej. Obszar zmian pola magnetycznego przedstawiono na rysunku 7.2. W celu sprawdzenia przyczyn zmian sygnału przeprowadzono badania ultradźwiękowe (rys. 7.3).









Rys. 7.3. Badania ultradźwiękowe wycinka obręczy zestawu kołowego Fig. 7.3. Ultrasonic investigations of part of railway wheel set band

Na powierzchni obwodu koła (rys. 7.2) na kierunku 120° wykryto strefę zmian materiału. Zmiany te, jak się okazało, były spowodowane wadliwą eksploatacją związaną z długotrwałymi obciążeniami w zakresie górnej granicy odkształceń sprężystych (od tzw. płaskiego miejsca). Wykryto strefy martenzytu powstałe wskutek obciążeń mechanicznych z fazy austenityczno-martenzytycznej (rys. 2.2). Badaniami defektoskopowymi ultradźwiękowymi nie wykryto tych stref. Jest to typowy stan zmęczenia materiału stali austenityczno-martenzytycznej, będący przyczyną powstawania pęknięć. W sprężystej obręczy stalowej powstają strefy materiału kruchego i twardego. Fakt ten skłania służbę eksploatacji kolei do zmian obowiązujących przepisów, które jak wykazano, są niewystarczające.

Zastosowana w badaniach zestawów kołowych sonda pomiarowa może uzupełnić defektoskopię ultradźwiękową. Sonda umożliwia wykrywanie:

- zmiany ciągłości materiału,
- zmiany struktury,
- naprężeń wewnętrznych.

#### 7.2. Badania czopów i osi zestawów kołowych

Oprócz możliwości badań osi, które do tej pory są realizowane metodą magnetycznoproszkową i dla których wprowadzane są metody magnetyczno-pomiarowe (jak pokazano na rysunku 7.4), poważny problem stanowi proces naprawy czopów osi zestawów kołowych.



*Rys.* 7.4. Stanowisko pomiarowo-badawcze *Fig.* 7.4. Research and measuring stand

Trudność ta wynika z procesu metalizacji i grubości warstwy nałożonej na materiał rodzimy. Badania te rozpoczęto na zlecenie Zakładów Naprawy Lokomotyw PKP CARGO SA. Proces naprawy ilustrują kolejne fotografie pokazane na rysunkach 7.5 do 7.8.





Rys. 7.5. Uszkodzony czop osi walu Fig. 7.5. Damaged axis well



Rys. 7.6. Przygotowanie powierzchni czopa Fig. 7.6. Preparation of pivot surface



Rys. 7.7. Metalizowanie i obróbka powierzchni Fig. 7.7. Metal plating and finish turning

Rozwiązanie zagadnienia wiązało się z przygotowaniem wzorca (rys. 7.8) zgodnego z materiałem i technologią metalizacji.

Rys. 7.8. Wzorzec do badań laboratoryjnych Fig. 7.8. Investigation standard Kolejnym zagadnieniem jest detekcja wad. Ze względu na konieczność namagnesowania w stan nasycenia zastosowano przetwornik hallotronowy KSY i koncentratory w obwodzie

sondy magnetycznej, zwiększające niejednorodność pola w strefie pomiaru. Wynik detekcji wad pokazano na rysunku 7.9 [130]. Zmiany układu magnesującego pokazano w wynikach symulacji zamieszczonych na rysunkach 7.10 i 7.11. Wprowadzenie koncentratora strumienia magnetycznego zwiększa blisko dwukrotnie namagnesowanie bez zmiany wymiaru magnesów.



Rys. 7.9. Detekcja wad Fig. 7.9. Defekt detection



Rys. 7.10. Indukcja magnetyczna w materiale i przy powierzchni z koncentratorem Fig. 7.10. Magnetic flux density in material and surface zone with thickener







Praktyczne zastosowanie metody magnetyczno-pomiarowej wymaga prowadzenia w najbliższym okresie dalszych doświadczeń i badań przewidzianych w planach Katedry Transportu Szynowego Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej.

## 8. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione opracowanie systematyzuje szereg zagadnień zastosowania współczesnej defektoskopii magnetycznej i badań materiałów w polu magnetycznym do oceny wpływu historii obciążeń mechanicznych na eksploatowany element maszyny, wykonany z materiału ferromagnetycznego. Szczegółowe wnioski cząstkowe omawiające problem zamieszczono w rozdziałach 4 i 6. Z punktu widzenia eksploatacji użytkownik zainteresowany jest informacją o aktualnym stanie elementu maszyny oraz prognozą eksploatacyjną. Informację taką, jak wykazano, można uzyskać na podstawie zaproponowanego jednolitego systemu pomiaru i oceny zmian rozkładu magnetycznego pola rozproszenia na powierzchni elementu dla różnych reakcji materiału na obciążenia mechaniczne, począwszy od krótkotrwałych w zakresie obciążeń sprężystych, po długotrwałe, uzależnione dodatkowo od wartości i charakteru obciążeń.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że zaproponowana przez autora metoda diagnostyki magnetycznej stanu elementów maszyn jest możliwa do realizacji i wdrożenia przemysłowego. Termin "magnetyczna diagnostyka stanu" w odniesieniu do badania elementów maszyn został zaproponowany jako nazwa nowo rozwijającej się dziedziny diagnostyki technicznej wobec braku odnośnych i odpowiednich terminów naukowych w encyklopedii diagnostyki technicznej [153]. Uzyskane rezultaty nadają magnetycznym metodom badań materiałów rolę nowoczesnego narzędzia badawczego pod warunkiem zachowania ściśle określonego postępowania badawczego. Postępowanie to, nazwane w pracy metodyką, w sposób nierozerwalny związane jest z materiałem, jego składem chemicznym, strukturą, procesem produkcji i zastosowaną technologią obróbki mechanicznej jak i cieplnej materiału.

W podanej metodyce badań stan techniczny elementu należy rozpatrywać pod względem parametrów magnetycznych materiału i zakresu tych zmian niezależnie, w trzech zasadniczych fazach jego eksploatacji w elemencie maszyny, a związanych z zakresem obciążeń sprężystych i w zakresie zmęczenia materiału

Wykazano konieczność określenia wartości magnetyzacji, dla której występują największe przyrosty przenikalności magnetycznej materiału  $\mu_r$ , zdefiniowane jako magnetyzacja przy wartości największej magnetycznej reakcji materiału (metoda MRM) dla  $J_{MRM}$ . Charakterystyczny zakres pomiarowy, o największej czułości materiału ferromagnetycznego, umożliwia prowadzenie badań w stalach konstrukcyjnych. W badaniach zmęczenia materiału zmiany przenikalności magnetycznej materiału, a także natężenia koercji, opisują stan materiału. Istnieją zakresy natężenia pola magnetycznego, dla których występują maksymalne zmiany przenikalności magnetycznej materiału. Korelacja parametrów magnetycznych materiału  $\chi \cdot H_c = (\mu-1) \cdot H_c$  z procesem zmęczenia (ilością procentową procesu zmęczenia lub liczbą cykli zmęczeniowych l<sub>z</sub>) umożliwia stworzenie magnetycznego opisu stopnia degradacji materiału  $D_M$ , gdzie:

$$D_M = \frac{\mu_w}{H_c} = f(\varepsilon, L_{(\sigma)}).$$

Założenia metody pozostaną niezmienne, jednak metoda pomiaru będzie podlegała koniecznym zmianom ze względu na kontrolę procesu magnesowania i sposoby pomiaru. Stąd dalsze plany badawcze.

## 9. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Przewiduje się dalszy rozwój możliwości pomiarowo-badawczych metody, jak i zaproponowanej sondy pomiarowej. Rozwój ten obejmie:

- pomiar naprężeń,
- ocenę zmęczenia materiału.
  - W zakresie pomiaru naprężeń to:
    - komputerowa baza danych magnetycznych o parametrach magnetosprężystych podstawowych stali konstrukcyjnych,
    - detekcja znaku naprężeń mechanicznych i termicznych,
    - detekcja kierunku naprężeń mechanicznych i termicznych,
    - detekcja drgań i przemieszczeń wolnozmiennych w materiale ferromagnetycznym oraz ich pomiar.
  - W zakresie zmęczenia materiału to:
    - komputerowa baza danych magnetycznych o zmęczeniu mechanicznym podstawowych stali konstrukcyjnych,
    - ocena zakresu zmian podstawowych magnetycznych parametrów materiałów,
    - zakwalifikowanie materiału do badań magnetycznych,
    - automatyczna ocena stanu elementu po wprowadzeniu informacji o parametrach dla stałego miejsca pomiaru w materiale elementu.

Wymienione plany, szczególnie w zakresie badania materiałów przy tworzeniu bazy danych, wymagają dalszej współpracy wielu kręgów naukowo-badawczych, jednak efekty tej pracy mogą być dalekosiężne dla zagadnień diagnostyki elementów maszyn i konstrukcji. Omawiany temat badawczy planowany jest do realizacji w ramach grantu europejskiego organizowanego przez Europejskie Centrum Doskonałości TRANSMEC, działające przy Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej.

## ZAŁĄCZNIK 1

## EFEKTY MAGNETYCZNE I ZJAWISKA FIZYCZNE WYKORZYSTYWANE W BUDOWIE PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH

Dziesięć najważniejszych efektów magnetycznych zapoczątkowanych odkryciem Joule'a o zastosowaniach technicznych i pomiarowych zamieszczono w tablicy Z.1.

Tabela Z.1

#### Ważniejsze efekty magnetyczne

| Lp. | Nazwisko<br>odkrywcy<br>lub nazwa<br>efektu   | Objaśnienie efektu  | Zastosowanie techniczne   |  |  |  |
|-----|---|---|---|--|--|--|
| 1   | Joule'a o zmiana kształtu materiału ferromagnetycznego i<br>ferrimagnetycznego wraz ze zmianą magnetyzacji<br>(magnetostrykcja) |   | przetworniki<br>magnetostrykcyjne   |  |  |  |
| 2   | ΔE zmiana modulu Younga pod wpływem<br>przyłożonego pola magnetycznego  |   | opóźnienia fali akustycznej dla<br>składowych liniowych pola<br>magnetycznego |  |  |  |
| 3   | Matteucci skręcanie pręta ferromagnetycznego<br>w podłużnym polu magnetycznym   |   | przetworniki<br>magnetoelastyczne   |  |  |  |
| 4   | Thomson   | zmiana oporności elektrycznej pod wpływem<br>pola magnetycznego   | przetworniki<br>magnetorezystancyjne  |  |  |  |
| 5   | Wiedemann   | skręcanie pręta przewodzącego prąd<br>w wyniku działania pola magnetycznego   | przetworniki<br>sily i naprężeń skręcania                                     |  |  |  |
| 6   | Villari o   | zmiana magnetyzacji od naprężeń   | przetworniki<br>magnetoelastyczne   |  |  |  |
| 7   | Hall  | powstanie poprzecznego napięcia w materia-<br>lach przewodzących i półprzewodzących po<br>przyłożeniu pola magnetycznego prostopadle<br>do kierunku prądu | przetworniki<br>magnetogalwaniczne  |  |  |  |
| 8   | Skin  | przesunięcie prądu od wnętrza do warstwy<br>zewnętrznej (prądy wirowe)  | przetworniki polożenia  |  |  |  |
| 9   | Sixtus  | magnetyzacja pulsowa wywolana skokami<br>Barkhausena  | przetworniki zbliżenia  |  |  |  |
| 10  | Josephson   | efekt tunelowy pomiędzy dwoma<br>nadprzewodzącymi materiałami z cienką<br>warstwą izolującą   | czujniki Wiegenda<br>i magnetometry SQUID                                     |  |  |  |

Kursywą – oznaczono pary podstawowych efektów odwracalnych.

Na bazie wymienionych efektów magnetycznych powstały przetworniki pomiarowe służące do budowy bezpośrednich systemów przetwarzania sygnału lub urządzenia, za pomocą których możemy dokonywać pośrednich pomiarów. Podział ten przedstawiono graficznie na rysunku Z.1. Okręgami zaciemnionymi oznaczono efekty, na bazie których powstały przetworniki pomiarowe pola magnetycznego. Pozostałe to grupa efektów służąca do budowy przetworników pomiarowych siły, momentu siły, twardości oraz pomiaru przemieszczeń kątowych i liniowych. 116



Rys. Z.1. Efekty magnetyczne wykorzystane w budowie przetworników pomiarowych pola magnetycznego – pola zaciemnione

Fig. Z.1. Magnetic affects used in designing magnetic field measuring transformers – darkened fields

Do zastosowań pomiarowych pola magnetycznego na pierwszym miejscu (historycznie) zaliczyć należy efekt Thomsona. Efekt Thomsona wprowadza z kolei w grupę przetworników opartych na związkach galwanomagnetycznych w materiałach. Do najważniejszych zaliczyć można efekt magnetorezystancji Thomsona oraz efekt Halla.

Podstawą tych efektów jest działanie siły Lorentza na nośniki poruszające się w polu magnetycznym. Zjawiska te obejmują efekty elektryczne i cieplne, występujące w przewodniku lub półprzewodniku przewodzącym prąd i umieszczonym w polu magnetycznym.

Jeżeli przez próbkę umieszczoną w polu magnetycznym  $H_z$  jak na rysunku Z.2 płynie prąd  $J_x$ , występują wówczas następujące zjawiska:

- Halla powstanie pola elektrycznego w kierunku osi y,  $E_y = RJ_XH_Z$ , gdzie R to współczynnik Halla,
- Ettingshausena (poprzeczne zjawisko galwanotermomagnetyczne) powstawanie gradientu temperatury w kierunku osi y  $\partial T / \partial y = PJ_xH_z$  gdzie P współczynnik Ettinghausena,
- Gaussa magnetooporowe zmiana rezystywności (gaussotron),
- Nernsta (podłużne zjawisko galwanotermomagnetyczne) powstawanie gradientu temperatury wzdłuż osi x.



*Rys. Z.2. Przewodnik w polu elektrycznym i magnetycznym Fig. Z.2. Conductor in electrical and magnetic field* 

Zjawiska te występują zarówno w metalach, jak i w półprzewodnikach, jednak z różnym nasileniem. Efekt Thomsona odkryty dla żelaza i niklu jest elementem odkrytego później zjawiska galwanomagnetycznego dla półprzewodników. Poprzeczne napięcie Halla, jakie powstaje w metalach krystalicznych, jest bardzo małe ze względu na dużą gęstość nośników prądu elektrycznego. Większy efekt występuje w materiałach krystalicznych magnetycznych.

Efekt Halla jest spowodowany oddziaływaniem spin-orbita spolaryzowanych elektronów przewodnictwa. Spontaniczna rezystywność Halla opisana jest wzorem [2]:

$$\rho_{\rm HA} = C \cdot \rho \cdot M_{\rm z} = R_{\rm s} J_{\rm z} \,, \tag{1}$$

gdzie: C-stała niezależna od temperatury,

 $\rho$  – rezystywność elektryczna materiału,

- $J_z$  składowa normalna magnetyzacji,
- R<sub>s</sub> stała spontanicznego efektu Halla.

Spontaniczna rezystywność Halla osiąga wartość maksymalną w stanie maksymalnego nasycenia próbki, kiedy magnetyzacja ma kierunek prostopadły do kierunku prądu płynącego przez rozpatrywaną warstwę. Rezystywność Halla jest zależna od temperatury i opisana jest zależnością fenomenologiczną [2]:

$$\rho_{\mathrm{HA}}(T) = R_0 \cdot \mu_0 \cdot H + R_{\mathrm{s}} \cdot J_{\mathrm{z}}(T) ,$$

(2)

gdzie:  $R_0$  – stała zwyczajnego efektu Halla,  $R_s$  – stała spontanicznego efektu Halla.

Stała  $R_0$  jest odpowiedzialna za efekty magnetorezystancyjne w metalach.

W pracy stosowano do pomiarów pola magnetycznego przetworniki magnetorezystancyjne i hallotrony.

#### Literatura

- 1. Boll R. Sensors. comprehensive survey Introduction, VACUUMSCHELCE, GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, pp. 3–8.
- Maksymowicz L.J., Stobiecki T., Wenda J.: Metody wytwarzania i własności magnetyczne warstw amorficznych. Materiały I krajowego seminarium na temat magnetycznych materiałów amorficznych, 27 września, Warszawa 1983, pp.133–146.
- 3. Overshott K. J.: Sensors. A comprehensive survey Physical Principles, Brighton Polytechnic UK, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG, 1990, pp. 35–42.

## ZAŁĄCZNIK 2

KRZYWE MAGNESOWANIA I ZWIĄZKI MAGNETOMECHANICZNE WYBRANYCH GATUNKÓW STALI

## 1. Stal P45A

|       | PRÓBI | KA 1 | PROB  | <b>(A 2</b> | PROBI | KA 3 | SREDNIA |     |  |
|-------|-------|------|-------|-------------|-------|------|---------|-----|--|
| Н     | В     | μ    | В     | μr          | В     | μr   | В       | μr  |  |
| A/m   | Т     | -    | Т     | -           | Т     | -    | Т       | -   |  |
| 124   | 0,010 | 66   | 0,009 | 59          | 0,011 | 76   | 0,010   | 67  |  |
| 619   | 0,091 | 123  | 0,086 | 116         | 0,107 | 145  | 0,095   | 128 |  |
| 1237  | 0,360 | 255  | 0,368 | 261         | 0,403 | 289  | 0,377   | 268 |  |
| 1856  | 0,623 | 299  | 0,654 | 315         | 0,688 | 334  | 0,655   | 316 |  |
| 2474  | 0,830 | 299  | 0,849 | 306         | 0,891 | 323  | 0,857   | 309 |  |
| 3093  | 0,973 | 279  | 0,999 | 286         | 1,034 | 297  | 1,002   | 287 |  |
| 3712  | 1,097 | 260  | 1,126 | 267         | 1,145 | 272  | 1,122   | 266 |  |
| 4949  | 1,259 | 220  | 1,269 | 222         | 1,314 | 230  | 1,281   | 224 |  |
| 6186  | 1,350 | 187  | 1,372 | 190         | 1,410 | 195  | 1,377   | 191 |  |
| 7423  | 1,435 | 164  | 1,460 | 167         | 1,482 | 169  | 1,459   | 167 |  |
| 8660  | 1,495 | 145  | 1,521 | 148         | 1,537 | 150  | 1,518   | 148 |  |
| 9897  | 1,546 | 131  | 1,550 | 131         | 1,582 | 134  | 1,559   | 132 |  |
| 11135 | 1,562 | 117  | 1,611 | 121         | 1,611 | 121  | 1,595   | 119 |  |
| 12372 | 1,598 | 107  | 1,640 | 110         | 1,634 | 110  | 1,624   | 109 |  |
| 15465 | 1,658 | 88   | 1,663 | 89          | 1,695 | 90   | 1,672   | 89  |  |
| 18558 | 1,694 | 75   | 1,724 | 76          | 1,729 | 76   | 1,715   | 76  |  |
| 21651 | 1,714 | 65   | 1,752 | 66          | 1,784 | 67   | 1,750   | 66  |  |
| 24744 | 1,750 | 58   | 1,824 | 60          | 1,807 | 59   | 1,794   | 59  |  |
| 27837 | 1,736 | 51   | 1,836 | 54          | 1,825 | 53   | 1,799   | 53  |  |
| 30929 | 1,752 | 46   | 1,864 | 49          | 1,826 | 48   | 1,814   | 48  |  |

|       | Skład chemiczny stali [%] |      |       |       |      |      |       |      |      |        |  |
|-------|---------------------------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|--------|--|
| С     | C Mn Si P S Cr Ni Cu Mo V |      |       |       |      |      |       |      |      | AI     |  |
|       |                           |      |       | (max) |      |      |       |      |      |        |  |
| 0,42÷ | 0,60÷                     | 015÷ |       |       |      |      | 1-21- |      |      | 0,020÷ |  |
| 0,50  | 0,90                      | 0,40 | 0,030 | 0,030 | 0,30 | 0,30 | 0,30  | 0,08 | 0,05 | 0,050  |  |





2. Stal P35C

|       | PROB  | (A 1 | PROB  | (A 2 | PROB  | (A 3 | SRED  | AIA |
|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-----|
| Н     | В     | μr   | В     | μr   | В     | μr   | В     | μr  |
| A/m   | Т     | -    | Т     | -    | Т     | -    | Т     | -   |
| 124   | 0,014 | 96   | 0,016 | 104  | 0,017 | 118  | 0,016 | 106 |
| 619   | 0,166 | 235  | 0,186 | 263  | 0,200 | 288  | 0,184 | 262 |
| 928   | 0,330 | 321  | 0,361 | 352  | 0,386 | 383  | 0,359 | 352 |
| 1237  | 0,478 | 353  | 0,511 | 378  | 0,559 | 421  | 0,516 | 384 |
| 1856  | 0,708 | 348  | 0,793 | 393  | 0,850 | 428  | 0,784 | 389 |
| 2474  | 0,899 | 329  | 0,977 | 359  | 1,053 | 393  | 0,976 | 360 |
| 3093  | 1,025 | 296  | 1,134 | 330  | 1,178 | 346  | 1,112 | 324 |
| 3712  | 1,120 | 267  | 1,239 | 297  | 1,262 | 304  | 1,207 | 289 |
| 4949  | 1,259 | 221  | 1,382 | 244  | 1,397 | 247  | 1,346 | 237 |
| 6186  | 1,337 | 185  | 1,458 | 202  | 1,464 | 204  | 1,420 | 197 |
| 7423  | 1,395 | 160  | 1,533 | 176  | 1,514 | 174  | 1,481 | 170 |
| 8660  | 1,448 | 141  | 1,580 | 154  | 1,548 | 151  | 1,526 | 149 |
| 9897  | 1,471 | 124  | 1,611 | 136  | 1,588 | 135  | 1,556 | 132 |
| 11135 | 1,493 | 112  | 1,658 | 124  | 1,633 | 122  | 1,594 | 119 |
| 12372 | 1,530 | 103  | 1,665 | 112  | 1,640 | 110  | 1,612 | 108 |
| 15465 | 1,583 | 84   | 1,724 | 92   | 1,695 | 90   | 1,667 | 89  |
| 18558 | 1,595 | 70   | 1,742 | 77   | 1,724 | 76   | 1,687 | 75  |
| 21651 | 1,611 | 61   | 1,766 | 67   | 1,736 | 65   | 1,704 | 64  |
| 24744 | 1,659 | 55   | 1,796 | 59   | 1,824 | 60   | 1,760 | 58  |
| 27837 | 1,665 | 49   | 1,815 | 53   | 1,836 | 54   | 1,772 | 52  |
| 30929 | 1,697 | 44   | 1,839 | 48   | 1,853 | 49   | 1,797 | 47  |

|      | Skład chemiczny stali [%] |      |      |      |      |            |      |      |      |        |
|------|---------------------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|--------|
| С    | C Mn Si P S Cr Ni Cu Mo V |      |      |      |      |            |      |      |      | AI     |
|      |                           |      |      |      |      | metaliczny |      |      |      |        |
| max  | max                       | max  |      |      |      |            |      | 1    |      | 0,020÷ |
| 0,37 | 1,10                      | 0,45 | 0,35 | 0,35 | 0,30 | 0,30       | 0,30 | 0,05 | 0,05 | 0,050  |





30 35

0,0

3. Stal P54T

|       | PRÓBI | <b>KA 1</b>    | PROB  | <b>KA 2</b>    | PROB  | <b>KA 3</b> | ŚRED  | NIA            |
|-------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-------------|-------|----------------|
| Н     | В     | μ <sub>r</sub> | В     | μ <sub>r</sub> | В     | μr          | В     | μ <sub>r</sub> |
| A/m   | Т     | -              | Т     | _              | Т     | _           | Т     | -              |
| 124   | 0,007 | 47             | 0,007 | 44             | 0,007 | 48          | 0,007 | 46             |
| 619   | 0,056 | 74             | 0,057 | 75             | 0,059 | 78          | 0,057 | 76             |
| 1237  | 0,288 | 196            | 0,265 | 179            | 0,294 | 200         | 0,282 | 191            |
| 1856  | 0,555 | 256            | 0,583 | 268            | 0,601 | 278         | 0,580 | 267            |
| 2474  | 0,802 | 279            | 0,832 | 289            | 0,841 | 292         | 0,825 | 287            |
| 3093  | 0,962 | 267            | 0,999 | 277            | 1,012 | 281         | 0,991 | 275            |
| 3712  | 1,076 | 247            | 1,119 | 257            | 1,139 | 262         | 1,111 | 255            |
| 4949  | 1,241 | 212            | 1,285 | 219            | 1,297 | 221         | 1,274 | 217            |
| 6186  | 1,332 | 180            | 1,410 | 191            | 1,399 | 189         | 1,380 | 187            |
| 7423  | 1,390 | 156            | 1,444 | 162            | 1,438 | 161         | 1,424 | 160            |
| 8660  | 1,443 | 138            | 1,489 | 142            | 1,494 | 143         | 1,475 | 141            |
| 9897  | 1,486 | 124            | 1,544 | 129            | 1,517 | 126         | 1,516 | 126            |
| 11135 | 1,498 | 110            | 1,546 | 114            | 1,551 | 114         | 1,532 | 113            |
| 12372 | 1,499 | 99             | 1,591 | 105            | 1,596 | 106         | 1,562 | 103            |
| 15465 | 1,557 | 82             | 1,636 | 86             | 1,636 | 86          | 1,609 | 85             |
| 18558 | 1,589 | 70             | 1,675 | 73             | 1,669 | 73          | 1,645 | 72             |
| 21651 | 1,606 | 60             | 1,682 | 63             | 1,692 | 63          | 1,660 | 62             |
| 24744 | 1,643 | 54             | 1,699 | 56             | 1,732 | 57          | 1,691 | 55             |
| 27837 | 1,644 | 48             | 1,728 | 50             | 1,738 | 50          | 1,704 | 49             |
| 30929 | 1,666 | 43             | 1,740 | 45             | 1,745 | 45          | 1,717 | 45             |

| Skład chemiczny [%] |      |      |       |       |      |      |      |       |       |       |
|---------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| С                   | Mn   | Si   | Р     | S     | Cr   | Ni   | Cu   | Мо    | V     | AI    |
| 0,57                | 0,84 | 0,37 | 0,016 | 0,008 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,004 | 0,001 | 0,029 |







4. Stal 55AT

| PROBKA 1 |       | PROB | KA 2  | PROB | KA 3  | ŚRED           | NIA   |     |
|----------|-------|------|-------|------|-------|----------------|-------|-----|
| Н        | В     | μr   | В     | μr   | В     | μ <sub>r</sub> | В     | μr  |
| A/m      | Т     | -    | Т     | -    | Т     |                | Т     | -   |
| 124      | 0,008 | 52   | 0,008 | 49   | 0,011 | 53             | 0,009 | 51  |
| 619      | 0,060 | 79   | 0,068 | 90   | 0,107 | 90             | 0,078 | 86  |
| 1237     | 0,273 | 185  | 0,307 | 210  | 0,403 | 208            | 0,328 | 201 |
| 1856     | 0,620 | 289  | 0,624 | 290  | 0,688 | 296            | 0,644 | 292 |
| 2474     | 0,844 | 296  | 0,869 | 305  | 0,891 | 313            | 0,868 | 305 |
| 3093     | 1,014 | 284  | 1,039 | 290  | 1,034 | 295            | 1,029 | 290 |
| 3712     | 1,146 | 266  | 1,175 | 272  | 1,145 | 275            | 1,155 | 271 |
| 4949     | 1,293 | 222  | 1,330 | 228  | 1,314 | 230            | 1,312 | 227 |
| 6186     | 1,363 | 185  | 1,431 | 195  | 1,410 | 196            | 1,401 | 192 |
| 7423     | 1,437 | 162  | 1,492 | 168  | 1,482 | 169            | 1,470 | 166 |
| 8660     | 1,479 | 142  | 1,548 | 149  | 1,537 | 149            | 1,522 | 146 |
| 9897     | 1,507 | 126  | 1,582 | 132  | 1,582 | 133            | 1,557 | 130 |
| 11135    | 1,544 | 114  | 1,611 | 119  | 1,611 | 121            | 1,589 | 118 |
| 12372    | 1,561 | 104  | 1,640 | 109  | 1,634 | 109            | 1,612 | 107 |
| 15465    | 1,609 | 85   | 1,701 | 90   | 1,695 | 89             | 1,668 | 88  |
| 18558    | 1,646 | 72   | 1,718 | 75   | 1,729 | 76             | 1,698 | 75  |
| 21651    | 1,683 | 63   | 1,763 | 66   | 1,784 | 65             | 1,743 | 65  |
| 24744    | 1,695 | 55   | 1,753 | 57   | 1,807 | 57             | 1,752 | 57  |
| 27837    | 1,727 | 50   | 1,793 | 52   | 1,825 | 52             | 1,781 | 51  |
| 30929    | 1,775 | 46   | 1,810 | 47   | 1,826 | 48             | 1,804 | 47  |











5. Stal P60T

|       | PROBKA 1 |                | PROBI | <b>KA 2</b> | PROB  | <b>KA 3</b> | ŚREDNIA |                |
|-------|----------|----------------|-------|-------------|-------|-------------|---------|----------------|
| Н     | В        | μ <sub>r</sub> | В     | μr          | В     | μr          | В       | μ <sub>r</sub> |
| A/m   | Т        | -              | Т     | -           | Т     | -           | Т       | -              |
| 124   | 0,007    | 48             | 0,007 | 48          | 0,007 | 46          | 0,007   | 47             |
| 619   | 0,058    | 77             | 0,061 | 80          | 0,059 | 78          | 0,060   | 78             |
| 1237  | 0,256    | 172            | 0,278 | 187         | 0,268 | 181         | 0,267   | 180            |
| 1856  | 0,543    | 248            | 0,588 | 270         | 0,560 | 256         | 0,564   | 258            |
| 2474  | 0,785    | 271            | 0,817 | 282         | 0,779 | 268         | 0,794   | 274            |
| 3093  | 0,934    | 257            | 0,932 | 256         | 0,943 | 259         | 0,936   | 257            |
| 3712  | 1,046    | 238            | 1,115 | 255         | 1,049 | 239         | 1,070   | 244            |
| 4949  | 1,200    | 203            | 1,251 | 212         | 1,151 | 195         | 1,201   | 203            |
| 6186  | 1,322    | 178            | 1,372 | 185         | 1,301 | 175         | 1,332   | 179            |
| 7423  | 1,359    | 152            | 1,449 | 162         | 1,380 | 154         | 1,396   | 156            |
| 8660  | 1,423    | 135            | 1,521 | 145         | 1,443 | 137         | 1,462   | 139            |
| 9897  | 1,465    | 122            | 1,571 | 131         | 1,471 | 122         | 1,502   | 125            |
| 11135 | 1,503    | 111            | 1,616 | 119         | 1,513 | 111         | 1,544   | 114            |
| 12372 | 1,535    | 101            | 1,607 | 106         | 1,556 | 103         | 1,566   | 103            |
| 15465 | 1,578    | 83             | 1,701 | 90          | 1,598 | 84          | 1,626   | 86             |
| 18558 | 1,625    | 71             | 1,724 | 75          | 1,625 | 71          | 1,658   | 72             |
| 21651 | 1,663    | 62             | 1,752 | 65          | 1,658 | 62          | 1,691   | 63             |
| 24744 | 1,705    | 56             | 1,813 | 59          | 1,685 | 55          | 1,734   | 57             |
| 27837 | 1,706    | 49             | 1,836 | 53          | 1,717 | 50          | 1,753   | 51             |
| 30929 | 1,764    | 46             | 1,886 | 49          | 1,775 | 46          | 1,808   | 47             |
|       |          |                |       |             |       |             | 1.1.1   |                |

|      | Skład chemiczny [%]          |      |       |       |      |      |      |       |       |       |  |
|------|------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|--|
| С    | C Mn Si P S Cr Ni Cu Mo V Al |      |       |       |      |      |      |       |       |       |  |
| 0,58 | 0,86                         | 0,36 | 0,019 | 0,019 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,002 | 0,001 | 0,025 |  |





6. Stal St3S

|       | PRÓBI | KA 1 | PRÓBI | KA 2           | Sred  | nia |
|-------|-------|------|-------|----------------|-------|-----|
| Н     | В     | μr   | В     | μ <sub>r</sub> | В     | μr  |
| A/m   | Т     | -    | Т     | -              | Т     | -   |
| 124   | 0,013 | 87   | 0,013 | 85             | 0,013 | 86  |
| 619   | 0,162 | 221  | 0,154 | 210            | 0,158 | 216 |
| 1237  | 0,451 | 317  | 0,413 | 288            | 0,432 | 302 |
| 2474  | 0,822 | 286  | 0,770 | 268            | 0,796 | 277 |
| 3712  | 1,080 | 248  | 1,034 | 237            | 1,057 | 243 |
| 4949  | 1,311 | 224  | 1,243 | 213            | 1,277 | 219 |
| 6186  | 1,464 | 199  | 1,389 | 189            | 1,426 | 194 |
| 7423  | 1,568 | 177  | 1,493 | 168            | 1,531 | 172 |
| 8660  | 1,651 | 159  | 1,562 | 150            | 1,606 | 154 |
| 9897  | 1,690 | 142  | 1,594 | 133            | 1,642 | 137 |
| 11135 | 1,725 | 128  | 1,632 | 121            | 1,678 | 124 |
| 12372 | 1,742 | 116  | 1,659 | 110            | 1,701 | 113 |
| 18558 | 1,853 | 81   | 1,765 | 77             | 1,809 | 79  |
| 24744 | 1,932 | 63   | 1,839 | 60             | 1,885 | 62  |
| 30929 | 1,940 | 51   | 1,883 | 49             | 1.911 | 50  |

|      | С    | Mn  | Si        | Р     | S     | Al<br>metaliczny |
|------|------|-----|-----------|-------|-------|------------------|
| St3S | max  | max | 0,10÷0,35 | 0,050 | 0,050 | min              |
|      | 0,22 | 1,1 |           |       |       | 0,020            |











plot(n\*i/(2\*I)\*((0.5\*I+x)/(((0.5\*I+x)^2+r^2)^0.5)+(0.5\*I-x)/(((0.5\*I-x)^2+r^2)^0.5)),x=-0.07..0.07);

$$H := [1428.571428] \left[ \frac{.070 + x}{((.070 + x)^2 + .000025)^5} + \frac{.070 - x}{((.070 - x)^2 + .000025)^5} \right]$$

n := 400 i := 1 l := 14 r = 005H:=[n .5))];

n:=400; i:=1; l:=0.14; r:=0.005;

*H* := [1428.571428]

 $H := \left[\frac{1}{2} \frac{n i}{l}\right] \left[\frac{.5 l + x}{\left((.5 l + x)^2 + r^2\right)^5} + \frac{.5 l - x}{\left((.5 l - x)^2 + r^2\right)^5}\right]$ 

restart;  $H:=[n^{i}/(2^{1})]^{*}[((0.5^{1}+x)/(((0.5^{1}+x)^{2}+r^{2})^{0.5})+(0.5^{1}+x)/(((0.5^{1}-x)^{2}+r^{2})^{0.5}))];$ 



Wyliczenia analityczne przeprowadzono na solenoidzie o przekroju pokazanym poniżej.

## PORÓWNANIE PROGRAMÓW FLUX 2D/3D I FEMM VERSION 3.2 2D

# ZAŁĄCZNIK 3



| Color Shade Results<br>Quantity Flux density Tesh<br>Scale / Color<br>0 / 201,41092E-6<br>201,41092E-6 / 402,82137E-6<br>402,82137E-6 / 402,32137E-6<br>604,23277E-6 / 803,64068E-6<br>803,64368E-6 / 1,00705E-3<br>1,00705E-3 / 1,20847E-3<br>1,20847E-3 / 1,20847E-3<br>1,40988E-3 / 1,61129E-3<br>1,61129E-3 / 1,8127E-3<br>1,8127E-3 / 2,21532E-3<br>2,01411E-3 / 2,21532E-3 |
|--|
| 2,21552E-3 / 2,41693E-3<br>2,41693E-3 / 2,61834E-3<br>2,61834E-3 / 2,81975E-3<br>2,81975E-3 / 3,02116E-3   |

Symulacja rozkładu indukcji i natężenia pola magnetycznego w programie Flux 2D Przyjęto warunki brzegowe Dirichleta dla granicy obszaru

Symulacja rozkładu indukcji i natężenia pola magnetycznego w programie FEMM v3.4 Przyjęto warunki brzegowe Dirichleta dla granicy obszaru



Porównanie wyników symulacji w programach Flux i FEMM



Analiza wpływu warunków brzegowych dla granicy obszaru na wynik symulacji rozkładu natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi x cewki

Symulacja Ib Warunek brzegowy Neumanna



## Porównanie wyników obliczeń dla przyjętych warunków brzegowych granicy obszaru





## ZŁĄCZNIK 4

## OCENA ANALITYCZNA I SYMULACJYJNA ROZKŁADU INDUKCJI W OBWODZIE DO BADANIA PRÓBEK Z NIECIĄGŁOŚCIAMI PRZEKROJU



Elementy i oznaczenia obwodu magnetycznego

| Oznaczenie obwodu |    | Długość [m]   | Przekrój $[10^{-4} \text{ m}^2]$ | Materiał |
|-------------------|----|---------------|----------------------------------|----------|
|                   | m1 | $l_1 = 0,168$ | <i>s</i> <sub>1</sub> =6,4       | St3      |
|                   | m2 | $l_2 = 0,308$ | <i>s</i> <sub>2</sub> =3,2       | St3      |
|                   | m3 | $l_3 = 0,004$ | <i>s</i> <sub>3</sub> =1,6       | St3      |

$$U_{\rm m} = U_{\rm m1} + U_{\rm m2} + U_{\rm m3} = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3$$
  
$$\phi = B_1 s_1 + B_2 s_2 + B_1 s_2$$

Wyznaczone napięcia magnetyczne składników obwodu



Dla zadanego napięcia magnetycznego (od wartości prądu i ilości zwojów) wyznaczono strumień magnetyczny \u03c6 oraz średnie wartości indukcji magnetycznej w obwodzie.

$$B_{1} = \frac{\phi}{s_{1}} = \frac{1,27 \cdot 10^{-4}}{6,4 \cdot 10^{-4}} = 0,198438 \text{ T}$$
$$B_{2} = \frac{\phi}{s_{2}} = \frac{1,27 \cdot 10^{-4}}{3,2 \cdot 10^{-4}} = 0,39688 \text{ T}$$
$$B_{3} = \frac{\phi}{s_{3}} = \frac{1,27 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-4}} = 0,79350 \text{ T}$$



Niewiele przypadków umożliwia równoczesne analityczne rozwiązanie zagadnienia. Podany prosty przykład świadczy o przewadze metod MES nad metodami analitycznymi, biorąc pod uwagę np. strumień rozproszenia badanego elementu.

## LITERATURA

- 1. Augustyniak B.: Wykorzystanie efektów magnetosprężystych dla diagnozowania procesu degradacji stali. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 10-13 grudnia 2003, s. 39–59.
- Augustyniak B.: Magnetyczne nieniszczące metody badań stanu mikrostruktury stali eksploatowanych w przemyśle energetycznym. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 3. Bartelmus W.: Diagnostyka maszyn górniczych. Górnictwo odkrywkowe. "Śląsk", Katowice 1988.
- 4. Bertotti G., Ferchmin A.R., Fiorillo E., Fukamichi K., Kobe S., Roth S.: High purity iron and low carbon steels. Universität Bibliotek, Hanover 1994.
- Bieńkowski A.: Metoda badania magnetosprężystego zjawiska Villariego w ferrytach. W: VI Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych. Komisja metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000, s 59–67.
- 6. Bieńkowski A.: Magnetoelastic Villari effect in Mn-Zn ferrites. "Journal of Magnetism & Magnetic Materials" 2000, vol. 215–216, p.231-233.
- Bieńkowski A.: Czujniki magnetostrykcyjne i piezomagnetyczne do pomiaru naprężeń. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 611-616.
- 8. Bieńkowski A.: Przetworniki magnetostrykcyjne i piezomagnetyczne w metrologii. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 709–716.
- Bobbio S., Delfino F., Girdinio P., Molfino P.: Equivalent sources methods for the numerical evaluation of magnetic force with extension to nonlinear materials. "Magnetic" 2000, July, p. 663–666.
- Boczkowska A., Konopka K., Kukla D., Manaj W., Schmidt J., Kurzydłowski K.J.: Nowe metody oceny stopnia degradacji materiałów konstrukcyjnych. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 11. Boll R.: Sensors. A comprehensive survey-Introduction. Ed. by VCH Verlagsgesellschaft GmbH, FRG 1990, p. 3-8.
- 12. Boll R.: Weichmagnetische Werkstoffe. 4 Erweiterte Auflage, Vakuumschmelze GmbH, Germany, 1990.
- 13. Bozorth R.: Ferromagnetism. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1993.
- 14. Bozorth R. M.: Ferromagnetism. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1956.
- 15. Chady T.: Wieloczęstotliwościowe algorytmy identyfikacji w układach defektoskopii wiroprądowej. Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2003. [monografia habilitacyjna]
- Chady T., Enokizono M., Sikora R., Todaka T., Tsuchida Y.: Natura crack recogniton Rusing inverse neural modeland multi-frequencyeddy current method. "IEEE Transactions on Magnetics", 2001, vol. 37, no 4, p. 2797–2880.
- 17. Chen Y.H., Jiles D.C.: The magnetomechanical effect under torsional stress in a cobalt ferrite composite. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, no 4, p. 3069–3072.

- Cho J. H., Oh W. K., Ahn C.H. Boolhand. P., Nam T.C.: Stress analysis of silicon membranes. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, no 6, p. 2749–2751.
- 19. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. WNT, Warszawa 1998.
- 20. Ciok Z.: Metody obliczania pól elektromagnetycznych i przepływowych. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981.
- 21. Ciurzyńska W.: Relaksacje magnetyczne w uporządkowanych i nieuporządkowanych strukturalnie stopach metali przejściowych. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- 22. Dapino M.J., Smith R.C., Flatau A.B.: Structural magnetic strain model for magnetostrictive transducers. "Instrumentation and Measurement" 2000, May, p. 545 556.
- 23. Daughton J.M.: Magnetic field sensors using GMR multilayers. "IEEE Transactions on Magnetics" 1994, vol. 30, p. 4608-4610.
- 24. Deputat J.: Fizyczne podstawy magnetycznej pamięci metalu. W: Badania nieniszczące materiałów. Wykłady ósmego seminarium szkoleniowego. Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Pracownia ultradźwiękowych badań materiałów, Biuro GAMMA, Zakopane 12–15 marca 2002, s. 93–110.
- 25. Dietrich L.: Procesy rozwoju uszkodzeń struktury materiałów przy obciążeniach eksploatacyjnych. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 10-13 grudnia 2003.
- 26. Dietrich L.: Rozwój uszkodzeń struktury i ocena stopnia degradacji materiałów konstrukcyjnych. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów, Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 27. Dobrzański L. A.: Metalowe materiały inżynierskie. WNT, Warszawa 2004.
- Dubow A. A., Radziszewski A.: Prognozowanie resursu oprzyrządowania z wykorzystaniem metody pamięci magnetycznej metalu. 31 Krajowa konferencja badań nieniszczących, Szczyrk – Warszawa 2002.
- 29. Dubow A. A.: Diagnostyka wytrzymałości oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem pamięci metalu. W: Badania nieniszczące materiałów. Teksty wykładów siódmego seminarium. Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Pracownia ultradźwiękowych badań materiałów, Biuro GAMMA, Warszawa, marzec 2001.
- 30. Endo H., Hayano S., Saito Y., Fujikura M., Nagao T.: Magnetization curveploting from magnetic domain images. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, no 4, p. 2727–2730.
- 31. Etienne du Tremolet de Lacheisserie.: Theory and applications of magnetoelasticity, CRC PRESS-Boca Raton, Ann Arbor, Boston, London, 1992.
- 32. Förster F.: New findings in die field of nondestructive magnetic leakage inspection. NDT&E International, 1986, s. 3-14.
- 33. Förster F.: Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streufluseverfahrens. "Materialprüfung" 1981, vol. 23, s. 371–378.
- 34. Gorzkowski W., Lachowicz H.K., Szymczak K. (Ed.): Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International conference on Physics of magnetic materials, September 9–14, Poland, 1986.
- Gorzkowski W., Gutowski M., Lachowicz H.K., Szymczak K. (Ed.): Proceedings of the 5<sup>rd</sup> nternational conference on Physics of magnetic materials, October 9-12, Poland, 1990.

- 36. Grieger J.: Magnetoresistive sensoren- moderne Fühler zur Außenwelt. "Elektronik Industrie" 1999, nr 5, p. 28-31.
- 37. Grimberg R., Savin A., Radau E., Mihalache O.: Nondestructive evaluation of the severity of discontinuites in flat codductive materials by an eddy-current transducer with orthogonal coils. "IEEE Transactions on Magnetics" 2000, vol. 36, no. 1, p. 299–307.
- Grimberg R., Leitoiu S., Bradu B.E., Savin A., Andreescu A.: Magnetic Sensor used for the determination of fatigue state in ferromagnetic steel. "Sensor and Acutators" 2000, no 81, p. 371–373.
- 39. Gumaniuk M.N.: Czujniki magnetosprężyste w automatyce. WNT, Warszawa 1967.
- 40. Hauser M., Kraus L., Ripka P.: Giant magnetoimpedance sensors. "IEEE Instrumentation & Measurement Magazine" 2001, vol. 4, issue 1, p. 28-32.
- 41. Heptner H., Strope H.: Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprufung. VEB Deutcher Verlag fur Grundstoffindustrie, Leipzig 1969.
- 42. Hernas A: Żarowytrzymałość stali i stopów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- 43. Herzer G.: Nanocrystalline soft magnetic materials. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 1996, vol. 157-158, p. 133-136.
- 44. Herzer G., Varga L.L.: Exchange softening in nanocrystalline alloys. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 2000, vol. 215-216, p. 506-512.
- 45. Hetmańczyk M.: Podstawy nauki o materiałach. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
- Hinz G., Voigt H.: Sensors. A comprehensive survey Magnetoelastic sensors, VACUUMSCHMELZE GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, p. 99–102, 131.
- Hunt R.P.: A magnetoresistive readout transducer. "IEEE Transaction on Magnetics" 1971, vol. 7, p. 150–154.
- 48. Innoue A., Makino A., Muzushima T.: Ferromagnetic bulk glassy alloys. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 2000, vol. 215-216, p. 246-252.
- Ishi K., Cantor B.: The effect of adding Ti and Zr on the crystallization behaviour of amorphous Fe-Cr-B alloys. W: Trends in Non Crystalline Solids, Eds. A. Conde, C. F. Conde. World Scientific Publishing Co, Singapore 1992, p. 161.
- Jakubiuk K., Zimny P., Wołoszyn M., Młyński A.: Demagnetyzacja składowej podłużnej otwartego układu ferromagnetycznego. Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVI IC SPETO, Gliwice-Niedzica 2003, t. 1, s. 13– 16.
- Jakubiuk K., Zimny P., Wołoszyn M., Młyński A.: Demagnetyzacja składowej podłużnej otwartego układu ferromagnetycznego. Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVI IC SPETO'2004, Gliwice-Niedzica 2004, t. 1, s. 95–98.
- Jakubiuk K., Młyński A., Wołoszyn M., Zimny P.: Demagnetyzacja składowej podłużnej otwartego układu ferromagnetycznego. Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVI IC SPETO'2004, Gliwice-Niedzica 2004, t. 1. s. 99–102.
- 53. Jaworski M. J., Kurnicki A.: Niedokładność pomiarów magnetycznych materiałów a niepewność pomiarów. VI Krajowe sympozjum pomiarów magnetycznych, Komisja Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000.
- 54. Jiles D.: Introduction to magnetism and magnetic materials. Published by Chapman and Hall, New York 1996.
- 55. Juan S.W., Bertram H.N.: Magnetoresistive heads for ultra high-density recording, "IEEE Transaction on Magnetics" 1993, vol. 29, s. 3811–3815.

- 56. Kaczkowski Z.: Wielkości i definicje charakteryzujące magnetostrykcję objętościową i liniową. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 79–95.
- 57. Kaczkowski Z.: Teoria domenowa magnetostrykcji. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 158–165.
- 58. Kaczkowski Z.: Piezomagnetyzm. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 166–173.
- 59. Kaczkowski Z.: Równania piezomagnetyczne. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 180-192.
- 60. Kaczkowski Z.: Magnetosprężystość. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 211–219.
- 61. Kaleta J.: Doświadczalne podstawy formułowania zmęczeniowych hipotez energetycznych. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
- 62. Kawecki Z., Stachurski J.: Defektoskopia magnetyczna lin stalowych. "Śląsk", Katowice 1969.
- 63. Kim Tae-Jong, Hwang Sang-Moon, Park No-Gill.: Analisis of vibration for permanent magnet motors concidering mechanical and magnetic coupling effects. "IEEE Transaction on Magnetics" 2000, vol. 36, no. 4, p. 1346–1350.
- 64. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1978.
- 65. Kowalewski Z.L.: Doświadczalne metody oceny uszkodzenia materiałów pod wpływem pełzania. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 66. Kneller E.: Ferromagnetismus. Springer Verlag, Berlin 1962.
- 67. Koh H.J., Lee S.K., Park S.H., Choi S.J., Kwon S.J., Kim N.J.: Effect of hot rolling conditions on the microstructure and mechanical properties of Fe-C-Mn-Si multiphase steels. "Scripta Materiala" 1998, vol 38, issue 5, p. 763-768.
- 68. Kronmüller H.: Magnetic techniques for the study of dislacations in ferromagnetic mateirals. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 1972, no 3, p. 315-350.
- 69. Kronmüller H.: Theory of the coercive field in amorphous ferromagnetic alloys. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 1981, vol. 24, no 2, p. 159-167.
- Kronmüller H.: Recent developments inf high-tech magnetic materials. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 1995, vol. 140-144, part 1, no 24, p. 25-28.
- 71. Kuśmierek Z., Zakrzewski K.: Wykorzystanie statycznych pętli histeryzy do określania strat anomalnych i jednostkowej mocy pozornej w blachach anizotropowych metodą analityczną. VI Krajowe sympozjum pomiarów magnetycznych, Komisja Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000.
- 72. Kulik T.: Nanocrystallization of metallic glasses "Journal of Non-Crystalline Solids" 2001, vol 287, issue 1-3, p. 145-161.
- 73. Kurzydłowski K.J.: Metody monitorowania degradacji struktury materiałów. Materiały konferencyjne: W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane, 10–13 grudnia 2003.
- 74. Kwaśniewski J.: Określenie wielkości mikropęknięć elementów ferromagnetycznych na podstawie analizy statystycznej szumów Barkhausena. VI Krajowe sympozjum pomiarów magnetycznych, Komisja metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000.
- 75. Lachowicz H.K.: Magnetyki amorficzne Metody wytwarzania, właściwości, zastosowania techniczne. Instytut Fizyki PAN, Warszawa 1983.
- 76. Lachowicz H.K.: Nowe materiały i zjawiska magnetyczne. "Elektronika" 1995, vol. 36, s. 12-17.
- 77. Lachowicz H.: Gigantyczna magnetoimpedancja i jej zastosowania. "Elektronika" 2002, vol. 43, nr 9, s 3.
- 78. Lewińska-Romińska A.: Badania magnetyczne. T. I, Biuro Gamma, Warszawa 1998.
- 79. Lewińska-Romińska A.: Badania magnetyczne. T. II, Biuro Gamma, Warszawa 1998.
- 80. Lewińska-Romińska A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001.
- Lin J.: Damage Mechanisms. Models and Calibration Technik. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 10–13 grudnia 2003.
- 82. Lin J., Kowalewski Z.L., Cao J.: Modelling of creep rubture of copper and aluminium alloy under combined loading conditions. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane, 15–17 grudnia 2004.
- 83. Mackiewicz S., Szelążek J.: Badania ultradźwiękowe w ocenie stopnia degradacji materiału. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane, 15–17 grudnia 2004.
- Maier R.: Helicopter interior reduction be active vibration isolation withsmart gear box struts. The 1999 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration Fort Lauderdale, FL, USA, p. 188–198.
- Maksymowicz L.J., Stobiecki T, Wenda J.: Metody wytwarzania i własności magnetyczne warstw amorficznych. Materiały I Krajowego seminarium na temat magnetycznych materiałów amorficznych. Warszawa, 27 września 1983, s. 133-146.
- Marcal R.F.M., Negreiros M., Susin A.A., Kovaleski J.L.: Detecting faults in rotating machines. "IEEE Instrumentation & Measurement Magazine" 2000, Vol. 3, issue 4, p. 24-26.
- 87. Markuszewicz M., Mierzejewski A.: Materiały magnetyczne. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, Katowice 1954.
- 88. Materiały 30. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących. Zeszyty problemowe "Badania nieniszczące" 2001, nr 6.
- Maze-Merceur G., Naud P.: Microwave characterization of magnetic materials under uniaxial and biaxial mechanical compressive stres. "Instrumentation and Measurement" 2000, p. 742-748.
- Mc Henry M.E., Willard M.A., Laughlin D.E.: Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets. "Progress in Materials Science" 1999, vol 44, issue 4, p. 291-433.
- 91. Mc Henry M.E., Laughlin D.E. Nano-scale materials development for future magnetic applications. "Acta Materiala" 2000, vol 48, issue 1, p. 223-238.
- 92. Meeker D.: Finite Element Method Magnetics. User's manual. [dokument elektroniczny] [October 1999]. Tryb dostępu: http://femm.berlios.de.
- 93. Melikhov Y., Jiles D.C., Tomas I., Chester C.H., Perevertov O., Kadlecowa J.: Investigation of sensivity of preisach analisis for nondestructive testing. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, no 6, p. 3907–3912.
- 94. Michalski A., Tumański S., Żyła B.: Laboratorium miernictwa wielkości nieelektrycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- Minkov D., Shoji T.: Method of 3-D surface breaking flaws by leakage flux. "NDT&E International" 1998, vol. 35, no 5, p. 317–325.
- 96. Miyashita K.: Non-contact magnetic torque sensor. "IEEE Transactions on Magnetics" 1990, vol. 26, p. 1560–1562.

- 97. Moroń J.W., Rasek J.: Peremeability disaccomodation in α Fe-C-N in the temperature range from -40°C to 180 C°. "Acta Physica Polonica" 1969, vol. XXXV, p. 421-429.
- 98. Müller C.F.: Elektrosmog. C.F.Müller Verlag GmbH, Heidelberg, 1995.
- 99. Nagata Y.: Barberpole type MR head stabilized by hard magnetic films. "IEEE Transactions on Magnetics" 1995, vol. 31, p. 2648-2650.
- 100. Nałęcz M., Jaworski J.: Pomiary magnetyczne. PWN, Warszawa Łódź 1965.
- 101. Ng D.H.L., Cheng K., Cho S.K., Ren Y.Z., MaY. X., Chan I.L.S.: Nondestructive Evaluation of carbon contents and microstructures in plain carbon steel bars by Barkhausen emission. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, no 6, p. 2734– 2739.
- 102. Okabe H., Wakaumi H.: Grooved bar-code pattern recognition system with magnetoresistive sensor. "IEEE Transactions on Magnetics" 1990, vol. 26, p. 1575–1577.
- 103. Overshott K.J. Physical Principles. W: Sensors. A comprehensive survey. Ed. By W. Gopel, J. Hesse, J.N. Zemel. VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG, Wienheim 1990, p. 35-152.
- 104. Pawluk K.: Lipschitz-Hankel integrals analysis of the working state of permament magnet. Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVI IC SPETO Gliwice-Niedzica 2003, t. 1, s. 13–16.
- 105. Persad C.: A review of U.S. patents in electromagnetic Launch technology. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, no. 1, p. 493–497.
- 106. Philips. Katalog: magnetorezystory serii KMZ [dokument elektroniczny] [2001], Tryb dostępu: http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf
- 107. Pietrzyk J., Maksymowicz A., Michta G.: Study of phase transitions in sled by means of magnetometry. "Metallurgy and Foundry Engineering" 1997, vol. 23, no 3, p. 343-349.
- 108. Pietrzyk J., Osuch W., Michta G.: Rozpad izotermiczny austenitu otrzymanego przy temperaturach pomiędzy A3 -AI w stali 0.2%C, 1.5%Mn, 1.5%Si. "Inżynieria Materiałowa" 1998, nr 19, s.18.
- 109. Piech T.: Badania magnetyczne Wykorzystanie efektu Barkhausena. Biuro Gamma, Warszawa 1998.
- 110. Piech T.: Die Messung von Kräften, Dehnungen und Spannungen mitels Barkhausen-Rauschens. Prace naukowe Politechniki Lubelskiej nr 160, Mechanika z. 40, Politechnika Lubelska, Lublin 1987.
- 111. Pomorski K.A.: Zastosowanie efektu Barkhausena do wyznaczania współczynnika anizotropii blach stalowych. VI Krajowe sympozjum pomiarów magnetycznych. Komisja Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000.
- 112. Rasek J.: Kinetyka zjawisk wydzielania i rozpuszczania w roztworach stałych αFe-N/C/. Prace naukowe Uniwersytetu Śląskiego, nr 556, Katowice. 1983. [monografia habilitacyjna]
- 113. Rasek J.: Wybrane zjawiska dyfuzyjne w metalach krystalicznych i amorficznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2000.
- 114. Rasek J.: Materiały amorficzne i ich właściwości. W: W kręgu krystalografii i nauki o materiałach. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2002, p. 207–245.
- 115. Rasek J., Stokłosa Z.: Badania właściwości materiałów metodami magnetycznymi. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 116. Rawa H.: Elektryczność i magnetyzm w technice. PWN, Warszawa 1994.
- 117. Rebbechi B., Howard C., Hansen C.: Active Control of Gearbox Vibration. The 1999 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration Fort Lauderdale, FL, USA, p. 295-303.

- 118. Remes H.: Fatigue strength of laser and hybrid weldments in shipbuilding industry. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 10-13 grudnia 2003.
- 119. Sabir M.: Constitutive relations for magnetomechanical hysteresis in ferromagnetic materials. "Internatinal Journal Engeng Sci" 1995, vol. 33, no. 9, p. 1233–1249.
- 120. Sahingoz R., Erol M., Gibbs M.R.J.: Observation of changing of magnetic properties and microstructure of metallic glass Fe78Si9B13 with annealing. "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 2004, vol. 271, issue 1-2, p. 74-78.
- 121. Saka M., Sato I., Abe H.: NDE of 3-D surface crack using magnetic field induced by dc current flow. "NDT&E International" 1998, vol. 35, no 5, p. 325–329.
- 122. Senczyk D.: Wybrane metody badania materiałów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1988.
- 123. Sikora R.: Elektromagnetyczne metody testowania materii. Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK, Warszawa 2003.
- 124. Sitarz M., Żurek Z.H.: Przetworniki magnetorezystancyjne w defektoskopii magnetycznej. IX Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej". Politechnika Śląska, Katowice 2001, s. 209–212.
- 125. Sitarz M., Żurek Z.H.: Zastosowanie przetworników magnetorezystancyjnych w defektoskopii magnetycznej. 30. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2001, s. 127–134.
- 126. Sitarz M., Żurek Z.H.: Defektoskopia zestawu kołowego. 5<sup>th</sup> Conference of Computer Systems Aded Science, Industry and Transport, Zakopane Poland, 2001, s. 203–208.
- 127. Sitarz M., Żurek Z.H.: Badanie zestawów kołowych. "Badania Materiałów" 2002, nr 3 (15), s. 3-5.
- 128. Sitarz M., Żurek Z.H.: Diagnostyka magnetyczna uszkodzeń powierzchni koła i szyny. Prace Naukowe s. Transport z. 1 (17), Politechnika Radomska, Radom 2003. VI Konferencja "Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu TRANSCOMP", Zakopane 4–6.12. 2003.
- 129. Sitarz M., Żurek Z.H.: Wpływ zmian odległości sondy od powierzchni materiału na błąd pomiaru i ocenę stanu technicznego elementu w metodzie magnetyczno-pomiarowej. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 130. Sitarz M., Żurek Z.H., Janeczek T.: Laboratoryjna ocena czułości detekcyjnej magnetycznej sondy pomiarowej do badań elementów zestawu kołowego. Prace Naukowe s. Elektryka z. 2(8), Politechnika Radomska, Radom 2004.
- 131. Skubis T., Gonszcz D.: Bezindukcyjny przetwornik indukcji pola magnetycznego. VI Krajowe sympozjum pomiarów magnetycznych, Komisja Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000, s. 324–333.
- 132. Socha G.: Nowa metoda wczesnego wykrywania i monitorowania kumulacji zniszczenia zmęczeniowego stali konstrukcyjnych. Instytut Państwowych Problemów Techniki, Państwowa Akademia Nauk, Warszawa 2004. [monografia habilitacyjna]
- 133. Stokłosa Z., Rasek J., Kwapuliński P., Haneczok G., Badura G., Lelątko J. Nanocrystallisation of amorphous alloys based on iron. "Material Science and Engineering C" 2003, vol. 23, issue 1-2, p. 49-63.
- 134. Stryk A.: Defektoskopia magnetyczno-proszkowa. Instytut Metalurgii Żelaza im St. Staszica. Materiały szkoleniowe, Gliwice – Chorzów 1982.
- 135. Suhling J.C., Jaeger R.C.: Silicon piezoresistive stress sensors and their application in electronic packaging. "Sensors Journal IEEE" 2001, vol. 1, issue 1, p. 14–30.

- 136. Szumielewicz B., Słomski B. Styburski W.: Pomiary elektroniczne w technice. WNT, Warszawa 1982.
- 137. Szyngiera P.: Trójwymiarowa analiza sygnałów wiroprądowych. 31 Krajowa konferencja badań nieniszczących, Szczyrk Warszawa 2002.
- 138. Ślawska-Waniewska A. Interface magnetism in Fe-based nanocrystalline alloys. "Journal de Physique IV" 1998, vol. 8, no. Pr2, p. 11-18
- 139. Świderski Z., Bogocz R.: Uszkodzenia eksploatacyjne powierzchni tocznych kół kolejowych W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i łaserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 140. Tran Hoang Hai.: Źródła zjawisk magnetostrykcji. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, p. 96–104.
- 141. Tumański S.: Thin Film Magnetoresistive Sensors. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2001
- 142. Tumański S.: A new type thin film magnetoresistive magnetometer an analysis of circuit principles. "IEEE Transactions on Magnetics" 1984, vol. 20, s. 1720–1722.
- 143. Tumański S.: Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- 144. Tumański S.: Pomiary anizotropii właściwości magnetycznych blach transformatorowych. VI Krajowe sympozjum pomiarów magnetycznych. Komisja Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000.
- 145. Vandebosche L., Dupre L., De Wulf M., Malkebeek J.: Magnetic forces, magnetostriction and form effect In ferromagnetic materials. "Soft Magnetic Materials 16" Düsseldorf 2004, p.133–137.
- 146. Walecki T.: Efekt E w materiałach magnetycznych. W: Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1978, s. 211-219.
- 147. Wei-Chang Hong: Linear magnetic dipole of finite length and magnetic particle testing. "Materials Evaluation" 2001, vol. 59, no 8, p. 961–965.
- 148. Wilk A., Żurek Z.H., Łazarz B., Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych przekładni metodami magnetycznymi. XXVIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn. Węgierska Górka 2001, s. 381-387.
- 149. Wirsum S.: Das Sensor Kochbuch, IWT-Verlag GmbH, Bonn, printed in Austria 1994.
- 150. Wyżykowski J. W., Pleszkow J., Sieniawski E.: Odkształcenie i pękanie metali. WNT, Warszawa 1999.
- 151. Yang D.X., Konkolenski K.P., Hua S.Z., Swartzendruber L.J., Hicho G.E., Chopra H.D.: Evaluation of mechanical properties of magnetic materials using a non-destructive method. "IEEE Transactions on Magnetics" 2001, vol. 37, issue 4, p. 2758-2760
- 152. Zhu B., Johnson M.J., Lo C.C.H., Jiles D.C.: Multi-functional magnetic Barkhausen emission measurement system. "Magnetics" 2001, Jan., p. 095–1099.
- 153. Żółtowski B.: Leksykon diagnostyki technicznej. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.
- 154. Żurek Z.H.: Bezstykowy przetwornik pomiarowy stanu naprężeń. Zgłoszenie patentowe P 336 279, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
- 155. Żurek Z.H.: Przetworniki magnetorezystancyjne pola magnetycznego w badaniach stanów naprężeń mechanicznych próbki stalowej. VIII Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej", Politechnika Śląska, Katowice 2000, s. 303–308.
- 156. Żurek Z.H.: Pomiary sił i naprężeń w stalach węglowych w oparciu o magnetomechaniczny efekt Villariego. IX Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały

w metalurgii i inżynierii materiałowej", Politechnika Śląska, Katowice 2001, s. 197-202.

- 157. Żurek Z.H.: Badania naprężeń w wirujących elementach maszyn poprzez pomiar pola magnetycznego. XVII Ogólnopolska Konferencja "Przekładnie zębate", Węgierska Górka 2000, s. 205–211.
- 158. Żurek Z.H.: Bezstykowy pomiar naprężeń. "Badania Materiałów" 2003, nr 3(15), s. 17-21.
- 159. Żurek Z.H.: Badanie magnetyczne stopnia uszkodzenia materiału od zmęczenia. Praca badawcza (PBZ-KBN-03CD-2000 K-027-T07-2001 Systemy ciśnieniowe w ekstremalnych warunkach pracy) IPPT PAN, Warszawa 2003.
- 160. Żurek Z.H.: Użyteczność wybranych metod i narzędzi pomiarowych w diagnostyce technicznej. XXVII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2000, s. 263–274.
- 161. Żurek Z.H.: Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne jako narzędzia pomiarowe w diagnostyce technicznej. XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2000, Zeszyt 49/21, s. 38–41.
- 162. Żurek Z.H.: Efekty magnetyczne użyteczne w diagnostyce technicznej. XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2001, s. 153–158.
- 163. Żurek Z.H.: Wykorzystanie efektu Villariego w diagnostyce technicznej. XL Sympozjum PTMTS "Modelowanie w mechanice", Wisła 2001, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, z. 17, s. 251–256.
- 164. Żurek Z.H.: Mechanika eksperymentalna, związki magnetomechaniczne w ferromagnetykach. Konferencja "Polska mechanika u progu XXI wieku". Politechnika Warszawska, Kazimierz Dolny 2001, str. 537–544.
- 165. Żurek Z.H.: Symulacja rozkładu pola magnetycznego dla celów diagnostyki technicznej i materiałowej. III Krajowa konferencja "Metody i systemy komputerowe", Kraków 2001, s. 493-498.
- 166. Żurek Z.H., Wilk A., Madej H.: Sposób wykrywania wyłamań zęba koła zębatego przekładni. Zgłoszenie patentowe P 331 223. Politechnika Śląska, Gliwice, 1999.
- 167. Żurek Z.H.: Sonda pomiarowa defektoskopu magnetycznego. Zgłoszenie patentowe, P 344 955. Politechnika Śląska, Gliwice, 1999.
- 168. Żurek Z.H, Dziubiński J., Adamiec P.: Sposób pomiaru zmian ciągłości struktury magnetycznego. Zgłoszenie patentowe P 331 222, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
- 169. Żurek Z.H.: Modelowanie i wykrywanie wad materiałowych. "Badania Materiałów" 2002, nr 3(15), s. 15-19.
- 170. Żurek Z.H.: Zastosowanie metod magnetycznych w badaniach elementów pojazdów szynowych. ZN Politechniki Śląskiej s. Transport, z. 42, s. 169–177.
- 171. Żurek Z.H.: Magnetyczne metody w diagnostyce technicznej elementów maszyn. ZN Politechniki Śląskiej s. Transport, z. 43, s. 169–179.
- 172. Żurek Z.H.: Przetworniki pomiaru sił i naprężeń w oparciu o efekt Vilariego. ZN Politechniki Śląskiej s. Transport, z.43, s. 153–168.
- 173. Żurek Z.H.: Pomiary pola magnetycznego w diagnostyce technicznej i materiałowej elementów maszyn. XXVI Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC-SPETO'2002, Gliwice-Ustroń 22–25. 05.2002, str. 75–80.
- 174. Żurek Z.H.: Pomiary naprężeń wewnętrznych w materiałach ferromagnetycznych. 10. Jubileuszowe Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej", Politechnika Śląska, Katowice, 10 maja 2002, s. 203–208.
- 175. Żurek Z.H.: Ocena stanu naprężeń w elementach stalowych przez pomiar natężenia pola magnetycznego. 31. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 22– 24.10.2002, "Zeszyty Problemowe" 2002, nr 7, s. 83–90.

- 176. Żurek Z.H.: Magnetic evaluation method of stresses distribution in interferential connection. "Advances in Manufacturing Science and Technology" 2003, vol.29, no 2, s. 71–78.
- 177. Żurek Z.H.: Metoda magnetyczna oceny równomierności rozkładu naprężeń w połączeniu wciskowym. ZN Politechniki Śląskiej s. Transport, z 46, s. 73-79.
- 178. Żurek Z.H.: Utilization of magneto mechanical effects for detecting material stress and defects in technical diagnostics. "Advances in Manufacturing Science and Technology" 2002, vol. 26, no 3, p. 103–114.
- 179. Żurek Z.H.: Comparison of selected methods of stress measurements in ferromagnetic materials. "Engineering Transactions" 2004, vol. 52, issue 3, p. 195-204
- 180. Żurek Z.H.: Bezprzewodowy pomiar rozkładu naprężeń metodą magnetyczną, Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVI IC SPETO'2003, Gliwice-Niedzica 2003, tom 1. s. 139–142.
- 181. Żurek Z.H.: Badanie stanu ferromagnetyków w polu magnetycznym dla diagnostyki technicznej. VI Konferencja Systemy TRANSCOMP, Zakopane 4– 6.12.2003. Prace Naukowe s. Elektryka 1(6), Politechnika Radomska, Radom 2003.
- 182. Żurek Z.H.: Diagnostyka magnetyczna. Perspektywy zastosowania pomiarów magnetycznych w badaniu zmęczenia materiału wykład. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 10-13 grudnia 2003.
- 183. Żurek Z.H.: Badanie magnetycznego pola rozproszenia dla celów diagnostyki maszyn. XL Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME'2004, Hajnówka, 15–18 czerwca 2004, tom 1, s. 242–249.
- 184. Żurek Z.H.: Magnetyczne pole rozproszenia jako nośnik informacji diagnostycznych o elemencie z materiału ferromagnetycznego. Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVII IC-SPETO 2004, Gliwice-Niedzica, 26–29 maja 2004, t. 1, s. 95-100.
- 185. Żurek Z.H.: Magnetyczne pole rozproszenia nad wadą w namagnesowanym materiale ferromagnetycznym – symulacja i pomiar. Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów XXVII IC-SPETO 2004, Gliwice-Niedzica 26–29 maja 2004, t. 1, s. 37-42.
- 186. Żurek Z.H.: Magnetic flux leakage as a medium of diagnostic information of ferromagnetic material element. "Naukovyj visnik nacionalnogo gurnicogo universiteta" 2004. nr 7.
- 187. Żurek Z.H.: Magnetyczne pole rozproszenia od defektu nieciągłości materiału pomiar i symulacja. "Badania Materiałów" 2004, nr 5(17), s. 19-24.
- 188. Żurek Z.H.: Magnetyczne pole rozproszenia jako nośnik informacji diagnostycznych o elemencie z materiału ferromagnetycznego. "Badania Materiałów" 2004, nr 5(17), s. 25-29.
- 189. Zbigniew Z.H.: Bezstykowy pomiar naprężeń w stalach konstrukcyjnych o niskiej czułości magnetosprężystej. "Przegląd Elektrotechniczny" 2004, nr 12, s. 1193-1197.
- 190. Żurek Z.H.: Ocena możliwości bezstykowej diagnostyki stanu materiału elementu zestawu kołowego metodą magnetyczną. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.
- 191. Żurek Z.H.: Bezstykowy pomiar naprężeń w stalach o niskiej czułości magnetosprężystej. W: Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane 15–17 grudnia 2004.

- 192. Żurek Z.H.: Zastosowanie diagnostyki magnetycznej w ocenie stanu kolejowych zestawów kołowych - perspektywy. Prace Naukowe s. Elektryka 2(8), Politechnika Radomska, Radom 2004.
- 193. Żurek Z.H.: Magnetic Contactless Detection of Stress Distribution and Asembly Defects in Constructional Steel Element. "NDT&E International" (w druku).
- 194. Zgłoszenie patentowe P 372 738: Sposób symulacji stanu materiału elementu stali konstrukcyjnej metodą magnetyczną, Gliwice 2005.
- 195. Zgłoszenie patentowe P 372 739: Sposób oceny zmęczenia materiału za pomocą pomiaru parametrów magnetycznych, Gliwice 2005.

# BADANIA STANU FERROMAGNETYCZNYCH ELEMENTÓW MASZYN W POLU MAGNETYCZNYM

## Streszczenie

Problemy współczesnej eksploatacji to przede wszystkim działania podtrzymujące żywotność konstrukcji lub urządzeń użytkowanych niejednokrotnie przez dziesięciolecia. Sposób ich użytkowania, charakter oraz liczba cykli zmęczeniowych nie są znane. Dlatego w niedalekiej perspektywie należy liczyć się ze znaczną liczbą awarii pochodzenia zmęczeniowego. Dzieje się tak już w energetyce i w transporcie. Pilną potrzebą stają się procedury nieniszczącego badania zmęczenia materiału już eksploatowanego z nieznaną historią obciążeń. Bezpośrednie przeniesienie badań podstawowych formułowanych w zakresie hipotez energetycznych i zmęczeniowych na obiekt rzeczywisty ze stali konstrukcyjnej jest w zasadzie niemożliwe, mimo iż poznawcza wartość tych badań jest niepodważalna. Jedyną drogą jest poszukiwanie efektów wtórnych procesu zmęczenia materiału, takich między innymi jak, zmiany parametrów magnetycznych i porównywanie ich z materiałem wyjściowym, za który służyć może fragment konstrukcji, w którym z punktu widzenia mechaniki zmiany zmęczeniowe zajść nie mogły.

Cel ten stał się wiodący w prezentowanej pracy. Praca opisuje podstawowe parametry i zakresy zmian magnetycznych w stalach konstrukcyjnych. Autor Szuka teoretycznych powiązań zmian struktury materiału, zmian parametrów magnetycznych od obciążeń zmęczeniowych. Proponuje metodę oceny parametrów magnetycznych. Wyznacza ich zmiany w zakresie obciążeń sprężystych i zmęczeniowych w stosunku do poziomu podstawowego. Łączy metody badań symulacyjnych w mechanice i magnetyzmie dla celów diagnostyki magnetycznej. Opisuje szereg badań prowadzonych w skali laboratoryjnej, a później i przemysłowej, dotyczących możliwości wykorzystania zmian magnetycznych w materiale ferromagnetycznym w zakresie obciążeń sprężystych i zmęczeniowych. W zakresie realizacji praktycznych proponuje łączenie zmian parametrów magnetycznych z liczbą cykli obciążeń i podaje możliwe do zastosowania zależności. Przedstawia rozwiązanie do zastosowania przemysłowego w transporcie szynowym, a polegające na wczesnym wykrywaniu zmęczenia materiału, przed powstaniem nieciągłości wykrywalnych metodami ultradźwiękowymi.

## CONDITION OF FERROMAGNETIC MACHINE ELEMENTS IN MAGNETIC FIELD – A SURVEY

#### Abstract

Problems of modern exploitation is first of all the activities supporting the survivability of constructions and devices used many times for decades. The way of their exploitation, the character and the number of fatigue cycles is unknown. That is why in near perspective it should reckon with considerable amount of break-downs of fatigue origin. It is already happened in power engineering and in transport. The procedures of non-destructive study of material fatigue, that is already exploited and has unknown history of loads, become an urgent necessity. Direct transfer of basic studies formulated in the range of energetic and fatigue hypothesis on real object made from construction steel, is in principle impossible, although cognitive value of these researches is undeniable. The only way is to find the secondary effect of material fatigue process, like among others the changes in magnetic parameters and their comparison with starting material, that could be a fragment of construction, in which the fatigue changes couldn't happened from the mechanic point of view.

This purpose became the leading one in presented paper. This elaboration describes the basic parameters and the ranges of magnetic changes in construction steels. It searches the theoretical connections of material structure changes, magnetic parameters changes from fatigue loads. It proposes the method of magnetic parameters evaluation. It determines their changes in the range of elastic and fatigues loads in relation to the basic level. It joints the methods of simulation researches in mechanics and in magnetism for the magnetic diagnosis purposes. It describes the series of researches conducted in laboratory scale and later in industry scale concerning the utilization possibilities of magnetic changes in ferromagnetic material in the range of elastic and fatigue loads. In the range of practical realization it is proposed to joint the magnetic parameters changes with number of load cycles and give the dependences possible to application. It present the solutions to industrial application in railway transport, and consists in early detection of material fatigue, before appearing the discontinuity, that could be detected by ultrasonic methods.

# President in the second of the second residence in the second sec

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

## WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. (0-32) 237-13-81 http://wydawnictwo.polsl.pl

Sprzedaż i Marketing tel. (0-32) 237-18-48 wydawnictwo mark@polsl.pl

 Nakł.
 100+50
 Ark.
 wyd.
 17
 Ark.
 druk.
 9,375
 Papier
 offset.
 70x100,80g

 Oddano do druku 3.06.2005 r.
 Podpisano do druku 3.06.2005 r.
 Druk ukończ.
 w czerwcu 2005

Wydrukowano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, ul. Kujawska 1 zam. 261/05

## Książki Wydawnictwa można nabyć w księgarniach

#### GLIWICE

- Punkt Sprzedaży ul. Akademicka 2 (237-17-87)
- "FORMAT" Akademicka 5 (architektura i budownictwo)
- "LAMBDA" ul. Akademicka 2 (237-21-40)
- Punkt Sprzedaży ul. Akademicka 16 (automatyka, elektronika, informatyka)
- ♦ "ŻAK" ul. Kaszubska

## RYBNIK

- "ORBITA" ul. Rynek 12
- "NEMEZIS" ul. Hallera 26

## CZĘSTOCHOWA

"AKADEMICKA" – Al. Armii Krajowej 46 (fax. 32-254-70)

## ŁÓDŹ

- "POLITECHNIKA 100" ul. Żeromskiego 116 PŁ.
- Hurtownia "BIBLIOFIL" ul. Jędrowizna 9a (042) 679-26-77

## KATOWICE

- Punkt Sprzedaży ul. Krasińskiego 8
- Hurtownia ,,DIK" ul. Dulęby 7 (032) 204-82-30
- Hurtownia "JERZY" ul. Słoneczna 24 (258-99-58)

#### TYCHY

• "I Ja Tours" - ul. Piłsudskiego 10 (217-00-91 w.130)

## ZABRZE

Punkt Sprzedaży – ul. Roosevelta 26

## KRAKÓW

- Techniczna ul. Podwale 4 (012) 422-48-09
- Punkt Sprzedaży WND AGH, Al. Mickiewicza 30

#### GDAŃSK

EKO-BIS – ul. Dyrekcyjna 6 (058) 305-28-53

#### WARSZAWA

- Studencka Pl. Politechniki 1 (022) 628-77-58
- Techniczna ul. Kaliskiego 15 (022) 666-98-02
- Techniczna ul. Świętokrzyska 14
- MDM ul. Piękna 31

## BIAŁYSTOK

Dom Książki (Księgarnia 84) – ul. Wiejska 45 c

#### POZNAŃ

- Księgarnia "POLITECHNIK" ul. Piotrowo 3 (061) 665-23-24
- Księgarnia Techniczna ul. Półwiejska 28 (061) 659-00-38

#### NOWY SĄCZ

Księgarnia "ATOM" – ul. Hoffmanowej 3 (018) 446-08-72



BIBLIOTEKA GŁÓWNA Politechniki Śląskiej C Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 50

and the second

-