

Jerzy Kaleta

Materiały magnetyczne SMART

**Budowa, wytwarzanie,
badanie właściwości, zastosowanie**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013**

Recenzenci

Andrzej DOBRUCKI

Wacław KASPRZAK

Opracowanie redakcyjne i korekta

Hanna JUREK

Projekt okładki

Grzegorz URBAN

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>; e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-820-4

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 1090/2013.

Książkę dedykuję mojej żonie Lenie

Spis treści

Rozdział 1. Wprowadzenie	11
Rozdział 2. Kompozyty z udziałem cieczy magnetoreologicznych	19
2.1. Kompozyty magnetoreologiczne na bazie MRF	20
2.1.1. Wprowadzenie	20
2.1.2. Cele badań własnych	22
2.2. Ciecz magnetoreologiczna na potrzeby kompozytów MRC	22
2.2.1. Wprowadzenie	22
2.2.2. Pożądane właściwości MRF, wpływ dodatków i innych czynników	23
2.2.3. Dobór składu cieczy magnetoreologicznej	25
2.2.4. Zjawisko sedymentacji i aglomeracji w cieczy magnetoreologicznej	28
2.2.5. Badanie sedymentacji MRF	28
2.3. Kompozyt magnetoreologiczny (MRC)	33
2.3.1. Matryca porowata	33
2.3.2. Wytwarzanie próbek	33
2.4. Badania właściwości magnetomechanicznych MRC z matrycami porowatymi	35
2.4.1. Cel badań	35
2.4.2. Stanowisko badawcze	37
2.4.3. Opis eksperymentu	37
2.4.4. Wpływ zawartości cieczy na kształt pętli histerezy	37
2.4.5. Wpływ charakteru sygnału wymuszającego	39
2.4.6. Wpływ pola magnetycznego oraz zawartości MRF	41
2.4.7. Określenie wpływu częstotliwości odkształcania MRC	42
2.4.8. Wpływ wielkości odkształcenia postaciowego (γ)	44
2.5. Badania kompozytów magnetoreologicznych w warunkach obciążeń udarowych	46
2.5.1. Wyniki badania kompozytów	48
2.6. Podsumowanie	50
2.6.1. Wnioski i uwagi końcowe	50
2.6.2. Sugestie dalszych prac	51
Bibliografia	52

Rozdział 3. Terfenol-D jako materiał o gigantycznej magnetostrykcji . . .	55
3.1. Wprowadzenie	56
3.1.1. Właściwości stopów (Dy-Tb)-Fe ₂ . Analiza literatury przedmiotu	57
3.1.2. Zjawisko magnetostrykcji w Terfenolu-D	59
3.2. Badania własne	61
3.2.1. Badanie magnetostrykcji w warunkach wymuszenia statycznego . . .	62
3.2.2. Badanie magnetostrykcji w warunkach wymuszenia cyklicznego . . .	67
3.2.3. Tłumienie w Terfenolu-D z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych	69
3.3. Przykłady zastosowań Terfenolu-D w konstrukcjach mechanicznych	73
3.3.1. Magnetostrykcyjny generator drgań akustycznych (głośnik magne- tostrykcyjny)	73
3.3.2. Aktywny tłumik drgań	75
3.4. Zasadność i kierunki dalszych badań	77
Bibliografia	78
Rozdział 4. Kompozyty z udziałem Terfenolu-D	83
4.1. Wprowadzenie. Kompozyty z użyciem Terfenolu-D	84
4.2. Przegląd literatury przedmiotu i cele badań własnych	85
4.3. Metodologia wytwarzania kompozytów z zastosowaniem proszków z Terfenolu-D	88
4.3.1. Wstępne opracowanie procedury wytwarzania kompozytów	88
4.3.2. Kompozyty do badań właściwości magnetomechanicznych	91
4.4. Właściwości magnetomechaniczne	93
4.4.1. Moduł sprężystości wzdłużnej	93
4.4.2. Stanowisko badawcze	94
4.4.3. Pomiar magnetostrykcji	97
4.4.4. Magnetostrykcja objętościowa	100
4.5. Opracowanie technologii wytwarzania próbek kompozytowych o różnej polaryzacji	103
4.5.1. Teoretyczne podstawy wprowadzenia anizotropii do materiału oraz zwiększenia zawartości objętościowej proszku z materiału GMM . . .	103
4.5.2. Procedura wytwarzania próbek kompozytowych o różnej polaryzacji i zwiększonej zawartości objętościowej proszku	105
4.5.3. Badania polaryzowanych próbek kompozytowych o zwiększonej za- wartości objętościowej proszku Terfenolu-D	108
4.5.4. Kompozyty magnetostrykcyjne zawierające inne dodatki, poza proszkiem Terfenolu-D	111
4.5.5. Badania próbek kompozytowych zawierających Terfenol-D i żelazo karbonylkowe	114
4.5.6. Podsumowanie w zakresie wytwarzania kompozytów z udziałem proszków GMM	116
4.6. Odwrotna magnetostrykcja (efekt Villariego)	116

4.7.	Aplikacja kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych na przykładzie aktuatora	120
4.7.1.	Model parametryczny aktuatora	121
4.7.2.	Model numeryczny (MES) rozkładu pola magnetycznego aktuatora	123
4.7.3.	Prototyp aktuatora	133
4.7.4.	Stanowisko pomiarowe	134
4.7.5.	Charakterystyka układu magnetycznego	136
4.7.6.	Testowanie aktuatora GMM	138
4.8.	Zasadność i kierunki dalszych badań	140
	Bibliografia	141
Rozdział 5.	Efekt magnetokaloryczny	147
5.1.	Wprowadzenie	148
5.2.	Budowa chłodziarek magnetycznych	149
5.3.	Badania własne	150
5.3.1.	Cel i założenia	150
5.3.2.	Badania materiałowe	153
5.3.3.	Budowa łoża magnetycznego	155
5.3.4.	Źródło pola magnetycznego	156
5.3.5.	Układ wymiany ciepła	158
5.3.6.	Dodatkowy system chłodzący	158
5.3.7.	Konstrukcja demonstratora	159
5.4.	Zasadność i kierunki dalszych badań	165
	Bibliografia	165
Rozdział 6.	Elastomery magnetoreologiczne	167
6.1.	Wprowadzenie. Kompozyty magnetoreologiczne z matrycami litymi	168
6.2.	Przegląd literatury przedmiotu i cele badań własnych	170
6.3.	Matryca elastomeru magnetoreologicznego. Dobór składników	180
6.4.	Cząstki aktywne magnetycznie, dobór	181
6.5.	Wytwarzanie elastomerów MRE	183
6.6.	Cel i metodyka badań	189
6.6.1.	Badania kompozytów w warunkach cyklicznego ścinania	192
6.7.	Badania właściwości magnetomechanicznych elastomerów magnetoreologicznych	193
6.8.	Zasadność i kierunki dalszych badań	196
	Bibliografia	196
Rozdział 7.	Magnetowizja	199
7.1.	Wprowadzenie	200
7.2.	Efekt Villariego i jego zastosowania w mechanice eksperymentalnej	202
7.2.1.	Metody magnetyczne w nieniszczących badaniach materiałów	202
7.2.2.	Efekt Villariego jako zjawisko o charakterze magnetomechanicznym	203
7.2.3.	Efekt Villariego w procesie zmęczenia ferromagnetyków	205

7.3.	Prototyp systemu magnetowizyjnego do badań materiału w płaskim stanie naprężenia	211
7.3.1.	Opis aparatury pomiarowej	212
7.3.2.	Techniczne możliwości identyfikacji modelu magnetostrykcji	213
7.4.	Założenia w zakresie budowy własnych przyrządów i głowic do pomiaru pola magnetycznego	217
7.4.1.	Idea bezkontaktowego pomiaru pola magnetycznego czujnikiem pasywnym	217
7.4.2.	Pomiary w zakresie słabych pól magnetycznych	220
7.4.3.	Pomiary z zastosowaniem magnetorezystorów	222
7.4.4.	Rozwój przyrządów pomiarowych i głowic do pomiaru pola magnetycznego	225
7.5.	Systemy magnetowizyjne	233
7.5.1.	Struktura kamery magnetowizyjnej z użyciem systemu Hunt Enginering	234
7.5.2.	Systemy skanerów pola magnetycznego o dużej rozdzielczości . . .	240
7.5.3.	Wybrane przykłady wizualizacji pola magnetycznego przez system skanera pola magnetycznego Magscanner-Maglab	246
7.5.4.	Kierunki rozwoju systemu Magscanner-Maglab	248
7.5.5.	Zastosowanie systemu Magscanner-Maglab do identyfikacji efektu Villariego	251
7.5.6.	Doświadczalna weryfikacja uzyskanych modeli magnetomechanicznych	256
7.5.7.	Zastosowanie systemu Magscanner-Maglab w badaniach jakościowych wyrobów przemysłowych	258
7.5.8.	Zastosowanie systemów skanujących do wizualizacji zewnętrznej struktury badanych obiektów	261
7.6.	Identyfikacja zjawisk o charakterze magnetomechanicznym w blachach . .	262
7.6.1.	Magnetyczny analog krzywej jednoosiowego rozciągania i krzywej umocnienia	263
7.6.2.	Badanie tekstury blach ferromagnetycznych metodą magnetyczną	267
7.6.3.	Magnetomechaniczne właściwości blach spawanych laserowo w procesie quasi-statycznego rozciągania	268
7.6.4.	Magnetyczna pamięć historii odkształcania materiału ferromagnetycznego	271
7.7.	Badanie przemiany fazowej indukowanej odkształceniem	276
7.7.1.	Badanie procesu wydzielania fazy martenzytycznej z rejestracją sygnału magnetycznego w próbkach masywnych	277
7.7.2.	Badanie procesu wydzielania fazy martenzytycznej z rejestracją sygnału magnetycznego w obiektach walcowych i kulistych	282
7.7.3.	Badania atermicznej przemiany martenzytycznej w foliach z austenitu	283

7.8.	Znaczenie magnetowizji w monitorowaniu procesów technologicznych . . .	290
7.8.1.	Zastosowanie kamery magnetowizyjnej w badaniach procesu tłoczenia blach	291
7.8.2.	Magnetowizyjna diagnostyka w zakresie silnych pól magnetycznych	298
7.8.3.	Określenie stopnia demagnetyzacji termicznej przemysłowych magnesów trwałych	307
7.8.4.	Magnetowizyjna diagnostyka degradacji materiałów na skutek gwałtownego cyklicznego przemagnesowania	313
7.9.	Kierunki proponowanych dalszych badań własnych	319
	Bibliografia	320
Rozdział 8.	Energy Harvesting	329
8.1.	Wprowadzenie	330
8.2.	Wybrane obszary zastosowań EH	332
8.2.1.	Samochody	333
8.2.2.	Budowle, infrastruktura techniczna	334
8.2.3.	Człowiek jako źródło energii	335
8.3.	Energy Harvesting, rola materiałów Smart	338
8.4.	Energy Harvesting a bezprzewodowy transfer energii i informacji	339
8.5.	Energy Harvesting, badania własne	342
8.5.1.	Wprowadzenie. Rozwój wybranych technologii harvestingowych	342
8.5.2.	Harvester jako generator prądu elektrycznego	347
8.5.3.	Rodzaje obwodów elektrycznych ze względu na źródła energii	347
8.5.4.	Harvestery z przetwarzaniem magnetycznym	349
8.5.5.	Harvestery z wykorzystaniem efektu Faradaya	350
8.5.6.	Harvester z rdzeniem magnetostrykcyjnym	352
8.5.7.	Harvestery wykorzystujące udar mechaniczny i dedykowane im przetwornice elektroniczne małych mocy	366
8.5.8.	Bezprzewodowa transmisja energii i informacji z użyciem ultradźwięków. Badania własne	371
8.5.9.	Autonomiczny system diagnostyki parametrów środowiskowych i eksploatacyjnych Multi-DOF	387
8.5.10.	Bezprzewodowe węzły harvestingowe w ramach systemu Multi-DOF	388
8.5.11.	Energy Harvesting. Przykłady aplikacji innych materiałów Smart w badaniach własnych	389
8.5.12.	Energy Harvesting. Kierunki dalszych badań własnych	396
	Bibliografia	398
	Streszczenie w języku angielskim	409

Rozdział 1. Wprowadzenie

Materiały z grupy Smart¹ (ang.: *Smart Materials* – SM) tworzą liczną już grupę nowych tworzyw konstrukcyjnych. Fenomen materiałów Smart polega na tym, że główne cechy użytkowe, wyrażone za pomocą wielkości jednego pola fizycznego (np. pola mechanicznego), zależą od wielkości innego pola (np. magnetycznego, elektrycznego czy pola temperatur). Kluczowe znaczenie podczas opisu i wykorzystania tych materiałów mają zatem efekty krzyżowe. W zależności od rodzaju materiału Smart zasadnicze znaczenie mogą mieć wówczas zjawiska, odpowiednio: magnetomechaniczne, elektromechaniczne, magnetotermiczne itd. Dzięki swoim specyficznym cechom, materiały te umożliwiają konstruowanie układów o właściwościach adaptacyjnych (ang.: *Smart Structures*) dotychczas niemożliwych do uzyskania z użyciem materiałów konwencjonalnych.

Znaczną podgrupę SM stanowią materiały, których główne cechy użytkowe można stymulować polem magnetycznym (ang.: *Smart Magnetic Materials* – SMM). Wyróżnić tutaj należy między innymi materiały: magnetoreologiczne, materiały o gigantycznej magnetostrykcji i magnetorezystywności, magnetokaloryczne, z pamięcią kształtu aktywowane magnetycznie i inne. Oznacza to, iż różnorodne właściwości SMM – w tym takie, jak np. lepkość, kształt, sztywność, temperatura, rezystancja, kolor – mogą być stymulowane polem magnetycznym.

Można już dziś założyć, iż poziom upowszechnienia materiałów Smart jest jedną z miar innowacyjności gospodarki krajów i regionów. Wytwarzanie materiałów Smart stymuluje również rozwój badań podstawowych z zakresu różnorodnych efektów krzyżowych (ang.: *cross effects*). Kluczowe znaczenie, zarówno cywilne jak i militarne, mają obecne już dziś i prognozowane zastosowania SMM. Wymienić tu można przykłady „inteligentnego” tłumienia drgań takich obiektów stacjonarnych, jak budynki, mosty, rurociągi, sieci energetyczne. Równie znaczącym

¹ W ostatnich latach próbowano znaleźć polski odpowiednik terminu „materiały Smart”. Propozycje wprowadzenia takich odpowiedników, jak materiały sprytne, materiały cwane, materiały adaptacyjne nie uzyskały do tej pory akceptacji środowiska. Próba wprowadzenia terminu materiały inteligentne budzi z kolei wątpliwości, co do precyzji. Pomimo że najbliższe autorowi jest określenie materiały adaptacyjne, autor zdecydował się używać konsekwentnie terminu Smart.

obszarem wykorzystania SMM jest transport (samochody, pociągi, samoloty). Zwiększa się liczba aplikacji w medycynie, czego przykładem są inteligentne protezy, operacje chirurgiczne na odległość, nowe metody terapii nowotworów czy magnetyczne „znaczniki” (markery) leków. Bardzo obiecujące są materiały z grupy SMM do zabezpieczenia informacji przesyłanych przewodowo. Wśród przykładów wymienić też należy rozwój nowych metod badań nieniszczących takich, jak magnetowizja (ang.: *magnetovision*). W ostatnich kilku latach wielkie zainteresowanie wywołuje wykorzystanie SMM do odzysku energii, zazwyczaj elektrycznej (ang.: *Energy Harvesting* – EH), ze źródeł występujących powszechnie w otoczeniu (czyli z tzw. energii tła), które mają charakter niepożądany i zazwyczaj tłumiony. EH z kolei może być wykorzystane jako źródło zasilania sensorów i ich układów w postaci systemów pomiarowych diagnozujących permanentnie konstrukcję (ang.: *Structural Health Monitoring* – SHM).

Wymienione atuty SMM są łącznie powodem intensywnych badań w wielu instytucjach naukowych i centrach przemysłowych.

Smart Magnetic Materials można podzielić według różnych kryteriów. Jedną z możliwych klasyfikacji wyróżnia następujące rodzaje SMM:

- Materiały o zmiennej strukturze wewnętrznej:
 - ciecze magnetoreologiczne (ang.: *MagnetoRheological Fluids* – MRF),
 - ciecze ferreologiczne (ang.: *Ferrofluids* – FRF)
 - materiały porowate nasycone cieczami magnetoreologicznymi (ang.: *Magnetorheological Composite* – MRC),
 - żele (smary) ... wypełnione proszkami z materiałów ferromagnetycznych,
 - ciecze ze sproszkowanymi materiałami magnetokalorycznymi.
- Materiały o ustalonej strukturze wewnętrznej:
 - lite materiały magnetostrykcyjne, w tym o tzw. gigantycznej magnetostrykcji (ang.: *Giant Magnetostrictive Materials* – GMM),
 - elastomery wypełnione proszkami z materiałów ferromagnetycznych (np. żelazo karbonylkowe, GMM lub ich kombinacja),
 - polimery na bazie żywic epoksydowych zawierające sproszkowane materiały ferromagnetyczne,
 - lite i sproszkowane materiały magnetokaloryczne.

W monografii omówiono wybrane SMM i ich aplikacje, a w tym:

- kompozyty o porowatej matrycy wypełnione cieczą magnetoreologiczną (ang.: *Magnetorheological Composites* – MRC),
- materiały o gigantycznej magnetostrykcji (ang.: *Giant Magnetostrictive Materials* – GMM),
- kompozyty zawierające sproszkowany materiał o gigantycznej magnetostrykcji (ang.: *Giant Magnetostrictive Materials composites* – GMMc).

- materiały magnetokaloryczne (ang.: *MagnetoCaloric Materials* – MCM),
- elastomery magnetoreologiczne (ang.: *MagnetoRheological Elastomers* – MRE znane również jako *Magneto-Active Elastomers* – MAE),
- magnetowizję,
- odzysk energii elektrycznej z otoczenia (ang.: *Energy Harvesting*), głównie z drgań i udaru mechanicznego.

W każdym z wymienionych przypadków omówiono technologie wytwarzania, sposób stymulacji polem magnetycznym, metodykę badań i identyfikacji właściwości oraz przykłady aplikacji. Materiał wzbogacono przeglądem literatury oraz rezultatami badań własnych.

W rozdziale drugim (Kompozyty z udziałem cieczy magnetoreologicznych) pokazano, iż efekt kształtowania zewnętrznych wymiarów materiału można uzyskać także przez nasycenie struktury porowatej za pomocą cieczy (MRF). Matrycę nośną kompozytu magnetoreologicznego może stanowić gąbka, tkanina, filc lub inny elastyczny materiał porowaty. Przez nasycenie matrycy otrzymujemy materiał charakteryzujący się, podobnie jak ciecz (MRF), zależnością mechanicznych parametrów od pola magnetycznego. Rosnące zainteresowanie tymi materiałami i próby ich szerokiego zastosowania, szczególnie w zakresie aktywnych tłumień, powoduje, iż są one coraz dokładniej poznawane i opisywane. Ze względu na występowanie złożonej struktury matrycy i wypełnienia uznano za zasadne nazywanie takiego materiału kompozytem magnetoreologicznym, w skrócie MRC (ang.: *MagnetoRheological Composite*), co stosowano dalej w pracy. Opisano sposób wytworzenia cieczy magnetoreologicznej do kompozytu MRC, w tym rozważono wpływ dodatków i zbadano sedimentację. Wytworzono następnie kompozyt magnetoreologiczny (MRC) o matrycy z elastycznych materiałów porowatych (w postaci gąbek poliuretanowych) i cieczy magnetoreologicznej. Przeprowadzono analizę właściwości MRC w warunkach obciążeń cyklicznych i udarowych. Zaprezentowano oryginalne stanowiska i procedury badawcze.

W rozdziale trzecim (Terfenol-D jako materiał o gigantycznej magnetostrykcji) opisano materiały o tzw. gigantycznej magnetostrykcji; wykazano, iż kluczowa rola GMM w wielu obszarach wynika z możliwości przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną (działanie typu akuator) oraz mechanicznej w magnetyczną (działanie typu sensor), o dużym współczynniku sprawności. Umożliwia to różnorodne aplikacje w konstrukcjach lotniczych, samochodowych, okrętowych, budowlanych oraz efektywne zastosowania w medycynie, przemyśle wydobywczym, aparaturze akustycznej i wielu innych. GMM mogą być wykorzystane jako aktywne tłumiki, które nie pochłaniają energii (jak materiały magnetoreologiczne), gdyż można za ich pomocą wytworzyć w pętli „kontrdranie” wygaszające emisję źródła. Materiały te odgrywają również kluczową rolę w zakresie odzysku energii

(ang.: *Energy Harvesting* – EH) z drgań, co omówiono z kolei w rozdziale ósmym. Obiektem badań był Terfenol-D. Niezbędnym warunkiem efektywnych aplikacji GMM w układach adaptacyjnych jest identyfikacja zachowania się materiałów w przypadku występowania różnorodnych pól fizycznych. Dlatego kluczowe znaczenie miało tworzenie modeli zjawiska gigantycznej magnetostrykcji, w tym z uwzględnieniem prądów wirowych, oraz ich identyfikacja. Badania własne dotyczące Terfenolu-D obejmowały różnorodne aspekty. Wyznaczono skład chemiczny, zbadano mikrostruktury, przeprowadzono pomiary: magnetyzacji, częstotliwości rezonansowej, magnetostrykcji w warunkach wymuszenia statycznego i cyklicznego oraz zbadano zjawisko Villariego. Zbudowano stanowiska badawcze w postaci magnetostrykcyjnych wzбудników laboratoryjnych oraz model wzbudnika magnetostrykcyjnego, uwzględniającego wpływ prądów wirowych. Zaproponowano też przykłady aplikacji Terfenolu-D w budowie tłumików i aktuatorów oraz wykazano przydatność tych obiektów w konstrukcjach mechanicznych.

W rozdziale czwartym (Kompozyty z udziałem GMM) wykazano, iż opisany uprzednio lity Terfenol-D, pomimo swoich zalet (duża magnetostrykcja nasycenia, dobre właściwości dynamiczne), ma jednak pewne wady ograniczające jego zastosowanie. Indukujące się pod wpływem pola magnetycznego prądy wirowe zawężają zakres efektywnej pracy takich materiałów do częstotliwości rzędu kilku kiloherców. Kolejną istotną wadą litego Terfenolu-D jest jego kruchość i niewielka wytrzymałość na rozciąganie, a także cena.

Uzasadniało to potrzebę opracowania nowej grupy materiałów – kompozytów GMM. W kompozytach tych osnową jest najczęściej żywica wypełniona materiałem magnetostrykcyjnym w postaci proszku, pręcików lub płatków. Spoiwo żywiczne tworzy pomiędzy cząsteczkami elektrycznie nieprzewodzącą warstwę, która znacznie redukuje obszar indukowania się prądów wirowych. Ułatwiło to zastosowanie kompozytu do pracy w częstotliwościach znacznie przekraczających możliwości materiału litego. Dodatkowymi zaletami kompozytów jest ich wytrzymałość na rozciąganie, a także prostota formowania dowolnych kształtów. Badania własne miały na celu: opracowanie procedury wytwarzania wybranego typu kompozytów magnetostrykcyjnych na bazie proszków Terfenolu-D, wytworzenie próbek kompozytowych, w tym o różnej polaryzacji oraz zróżnicowanej zawartości objętościowej Terfenolu-D w matrycy, zbudowanie stanowiska i opracowanie metodyki badania kompozytów, opracowanie technologii i wytwarzanie próbek kompozytowych zawierających inne dodatki, poza proszkiem Terfenolu-D, przeprowadzenie badań magnetostrykcji, zbadania właściwości magnetycznych oraz wskazanie możliwych obszarów aplikacji.

W rozdziale piątym (Efekt magnetokaloryczny) opisano badania wybranego materiału magnetokalorycznego, czyli takiego, którego temperatura ulega

zmianie pod wpływem cyklicznie zmieniającego się pola magnetycznego. Obiektem badań był gadolin – materiał atrakcyjny dla konstruktorów chłodziarek magnetycznych dzięki temperaturze Curie (T_c) bliskiej pokojowej oraz względnie dużej zmianie temperatury i entropii magnetycznej. Jest to jednocześnie materiał referencyjny, który służy do porównań w badaniach efektu z użyciem bardziej zaawansowanych stopów wykazujących ten efekt. Źródłem pola magnetycznego były magnesy stałe (w postaci tzw. macierzy Halbacha), które nie potrzebują zewnętrznego zasilania ani układu chłodzącego; ich wadą są ograniczenia w wartościach generowanych pól magnetycznych (maksymalnie 2 T). Celem badań własnych było skonstruowanie demonstratora układu chłodzącego, który umożliwiłby badanie kolejnych materiałów. Aby zrealizować wyznaczony cel, przyjęto następujące założenia dotyczące budowy i działania demonstratora: cykl pracy – AMR (ang.: *Active Magnetic Regenerator*), a sposób wprowadzania materiału magnetokalorycznego w pole magnetyczne zrealizowano mechanicznie przez cykliczny ruch posuwisto-zwrotny. Omówiono trzy typy demonstratorów oraz przytoczono wyniki badań z użyciem jednego z nich.

W rozdziale szóstym (Elastomery magnetoreologiczne) omówiono badania kompozytów z matrycami elastomerowymi, czyli tzw. elastomerów magnetoreologicznych (zwanych także elastomerami magnetoaktywnymi). Stymulacja zewnętrznym polem magnetycznym powoduje nieliniową i odwracalną zmianę kilku właściwości naraz (np. lepkość, sztywność).

Projektując elastomery magnetoreologiczne, dążono do uzyskania maksymalnie dużych zmian właściwości pod wpływem pola magnetycznego. W odróżnieniu od cieczy MR, pracujących powyżej granicy plastyczności, typowy obszar pracy elastomerów magnetoreologicznych mieści się poniżej tej granicy. Można zatem powiedzieć, że jeśli chodzi o zastosowanie, materiały te nie konkurują, lecz uzupełniają się nawzajem.

Elastomery magnetoreologiczne są zbudowane z dwóch elementów: niemagnetycznej, polimerowej matrycy oraz rozmieszczonych w niej cząstek aktywnych magnetycznie. Dzięki usieciowanej strukturze osnowy, elementy wypełnienia magnetycznego nie mogą się w niej swobodnie przemieszczać. Nie występuje zatem zjawisko sedimentacji. Z powodu ograniczonych ruchów cząstek, odpowiedź materiału na przyłożenie pola magnetycznego (efekt magnetoreologiczny) może być szybsza niż w cieczach MR, nawet poniżej 10 milisekund.

W badaniach wykorzystano elastomer termoplastyczny, umożliwiający wielokrotną obróbkę termiczną. Wypełnienie materiału matrycy stanowiły cząstki miękkich ferromagnetyków (w tym żelazo karbonylkowe używane do cieczy MR). Zarówno kształt, jak i rozmiar elementów magnetycznie aktywnych istotnie wpływał na charakter kompozytu. Ważnym parametrem wpływającym na obserwowalny

w elastomerze efekt magnetoreologiczny był objętościowy stosunek wypełnienia magnetycznego do materiału matrycy.

Przyjęto następujące cele badań, a mianowicie: wytworzenie kompozytów magnetoreologicznych na bazie matryc litych z wykorzystaniem elastomerów termoplastycznych, opracowanie metodyki badań i oszacowanie wpływu pola magnetycznego, wykonanie typoszeregu próbek elastomerów magnetoreologicznych dla różnych składów i struktur wewnętrznych oraz badania uporządkowania wewnętrznej struktury elastomerów magnetoreologicznych i roli dodatków uplastyczniających. Podjęto również zagadnienie modelowania efektu krzyżowego oraz aplikacji elastomerów.

W rozdziale siódmym (Magnetowizja) opisano badania, które doprowadziły do rozwoju unikatowej nieniszczącej techniki pomiarowej nazwanej magnetowizją (analogicznie do np. terminu termowizja w pomiarach pól temperatury). Zaprezentowano budowę i możliwości pomiarowe systemów magnetowizyjnych, czyli różnych skanerów pola magnetycznego najnowszej generacji, o cechach użytkowych umożliwiających szybkie uzyskiwanie obrazu magnetycznego różnorodnych obiektów płaskich i walcowych. Zbudowano kilka typów głowic, kamer i skanerów z zastosowaniem układów pomiarowych zawierających pasywne czujniki magnetorezystancyjne, jak i wykorzystujących np. efekt Halla. Opracowano też metodykę badania pól magnetycznych z użyciem wymienionych urządzeń. Wykazano, iż system pomiarowy pola magnetycznego może być wykorzystywany zarówno jako układ całkowicie autonomiczny, jak i sprzężony, w tym przez wspólne sterowanie, np. z typową maszyną wytrzymałościową do badań statycznych i zmęczeniowych. Głównym celem aplikacyjnym było opanowanie pomiaru, za pomocą odpowiedniego sensora, bardzo małych pól magnetycznych (porównywalnych z ziemskim), występujących wokół obciążonego (odkształconego) ferromagnetyka. Za szczególnie obiecujące uznano następujące obszary zastosowań, a mianowicie: badanie zjawisk magnetomechanicznych i identyfikację ich modeli, lokalizację pól odkształceń oraz miejsc występowania deformacji plastycznych, detekcję nieciągłości struktury (np. wtrącenia, tekstura, mikropęknięcia, identyfikacja faz), identyfikację historii obciążania materiału oraz badanie kinetyki przemian fazowych (np. atermiczna przemiana martenzytyczna, badanie materiałów z pamięcią kształtu). Wykazano ponadto przydatność magnetowizji w badaniach: procesu tłoczenia blach, niejednorodności namagnesowania, efektów poligrafii magnetycznej. Zaprezentowano też przydatność tej techniki pomiarowej w badaniach materiałów magnetycznych Smart i harvesterów.

W rozdziale ósmym (Energy Harvesting) opisano rezultaty uzyskane w zakresie *Energy Harvesting* (dalej jako: EH)² znany również w literaturze przedmiotu jako: *power harvesting* lub *energy scavenging*. EH to zestaw metod umożliwiających pozyskanie energii elektrycznej z otaczających źródeł, takich jak: energia mechaniczna, cieplna, słoneczna, energia elektromagnetyczna, gradienty zasolenia itd.). Generalnie chodzi o wykorzystanie źródeł występujących powszechnie w otoczeniu (tzw. energia tła), które mają charakter niepożądany i zazwyczaj tłumiony (np. hałas, udary i drgania mechaniczne urządzeń i konstrukcji, smog elektromagnetyczny, ciepło w następstwie tarcia i spalania, przepływu prądu, chłodzenia silników itp.) lub powszechnie dostępny (światło słoneczne, energia fal, różnice zasolenia, procesy biochemiczne, np. w roślinach), a także związanych z biologią człowieka (ruch, ciepło ciała itp.). Aktualnie zakłada się, iż EH może być efektywnym źródłem „bezkosztowego” (po pominięciu kosztów instalacji) zasilania urządzeń małej mocy (np. urządzenia elektroniczne, układy sensorów itp.). Stąd narastające zainteresowanie aplikacjami cywilnymi i militarnymi. Zakłada się, iż w przyszłości rozległe systemy harvesterów będą również źródłem energii elektrycznej dużej mocy. Wiodące gospodarki i ośrodki naukowe przeznaczają znaczne środki na badania podstawowe i stosowane w zakresie EH. Tendencja ta utrzyma się przez wiele lat; prognozy w tym zakresie są jednoznaczne. Szacuje się, iż w roku 2011 rynek harvesterów był wart 700 mln dolarów, a jego wartość w 2021 r. wzrośnie do ponad 4 mld dolarów. Przykładowo liczbę harvesterów (w 2011 r.) zastosowanych tylko w układach czujników bezprzewodowych i w elektronice użytkowej szacuje się na 1,6 mln sztuk. Należy przy tym podkreślić, iż nauka i gospodarka polska odstają w tej dziedzinie od głównych trendów. Obszerność tematyki wymagała narzucenia ograniczeń. Dlatego za kluczowe uznano harvestery magnetostrykcyjne, wykorzystujące materiały typu GMM. Dzięki ich zastosowaniu uzyskano przyrządy zdolne odzyskać energię z drgań oraz ze źródeł do tej pory nieeksplorowanych, takich jak udar mechaniczny. Zaprezentowano liczną grupę własnych konstrukcji harvesterów i wyników badań z ich udziałem. Opisano ponadto rezultaty związane z transportem energii i informacji z użyciem ultradźwięków.

W monografii wykorzystano rezultaty prac zespołu, którym kierował autor, uzyskane dzięki realizacji grantów, w tym finansowane ze źródeł krajowych i europejskich. Wymienić tutaj należy następujące projekty:

- Efekt Villariego w procesie zmęczenia stali ferrytyczno-perlitycznej, projekt badawczy KBN, 1992–1994.

² Brak polskiego odpowiednika skłania autora do stosowania terminu angielskiego, czyli *Energy Harvesting* (EH), powszechnie występującego w literaturze przedmiotu. Podobnie z urządzeniami do wytwarzania energii, które nazywane będą dalej harvesterami.

- Kumulacja energii na defektach w procesie zmęczenia i ilościowe miary procesu zmęczenia, projekt badawczy KBN, 1995–1998.
- Nieniszczące diagnozowanie ferromagnetyków obciążonych zmęczeniowo, projekt badawczy KBN, 1999–2002.
- Cyclic Plasticity Induced Martensitic Transformation, Siegen University – Wrocław University of Technology, projekt badawczy, bilateralny program polsko-niemiecki, 1999–2001.
- Opis właściwości materiału z przemianą martenzytyczną indukowaną odkształceniem plastycznym w zakresie różnych skal długości, projekt badawczy KBN, 2001–2004.
- Projektowanie, otrzymywanie, struktura, właściwości i zastosowania materiałów inteligentnych metalicznych i polimerowych, podprojekt: Projektowanie – otrzymywanie – struktura – właściwości – zastosowanie materiałów magneto-reologicznych i magnetostrykcyjnych, projekt zamawiany, KBN, 2006–2008.
- Green Kitchen; 7th Framework Programme, „People”, Programme: Marie Curie Actions „Industry-Academia Partnerships and Pathways” (IAPP), 2010–2012.
- Nanokompozyty i materiały typu Smart. Podprojekt: Materiały magnetyczne grupy Smart. Projekt realizowany w ramach umowy Politechniki Wrocławskiej i Wrocławskiego Centrum Badań EIT+ (finansowanie: środki strukturalne), 2010–2014.

Część rezultatów uzyskano w ramach projektów wewnętrznych, związanych z realizacją prac doktorskich oraz badań finansowych ze środków na działalność statutową Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej.

Autor składa podziękowania pracownikom, doktorantom oraz dyplomantom Zakładu Mechaniki Ośrodków Ciągłych w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, a także partnerom naukowym z innych ośrodków krajowych i zagranicznych, których pomoc miała istotne znaczenie w realizacji badań z zakresu materiałów magnetycznych Smart i umożliwiła przygotowanie niniejszej monografii. Podziękowania autor kieruje również do recenzentów monografii.

Rozdział 2. Kompozyty z udziałem cieczy magnetoreologicznych

W rozdziale omówiono badania w zakresie kompozytów magnetoreologicznych (MRC), w tym ich budowę, wytwarzanie, wyznaczanie właściwości i zastosowanie. Pokazano, iż efekt magnetoreologiczny można uzyskać także przez nasylenie struktury porowatej za pomocą cieczy magnetoreologicznej (MRF). Matrycę nośną MRC może stanowić gąbka, tkanina, filc lub inny elastyczny materiał porowaty [1].

Sporządzono cieczy magnetoreologiczne (MRF) z uwzględnieniem różnych dodatków poprawiających ich właściwości. Ciecze poddano badaniom procesu sedymentacji. Zaprojektowano i wykonano w tym celu stanowisko badawcze. Wytworzono następnie kompozyty magnetoreologiczne, wykorzystując MRF o dobranym uprzednio składzie. Jako matrycę zastosowano porowaty materiał poliuretanowy.

Wykonano stanowisko pomiarowe do prowadzenia testów na MRC w warunkach cyklicznego ścinania, z jednoczesnym zadawaniem obciążeń magnetycznych i mechanicznych. Jako sposób obciążania przyjęto jednoosiowy stan zbliżony do czystego ścinania, a pole magnetyczne przykładano w kierunku prostopadłym do obciążenia.

Zaobserwowano zmiany naprężenia w badanych kompozytach w następstwie przyłożenia zewnętrznego pola magnetycznego. Wykazano także wzrost wielkości pola pętli histerezy (w układzie naprężenie–odkształcenie), co świadczy o przyroście możliwości pochłaniania energii przez kompozyt. Potwierdzono w ten sposób zależność tłumienia mechanicznego materiału od wartości oddziałującego na niego pola magnetycznego.

Przeprowadzono następnie obserwacje efektu magnetoreologicznego w materiałach dla różnych rodzajów sygnałów odkształcenia (prostokątnego i sinusoidalnego). Zauważono wpływ prędkości odkształcenia na wielkość naprężeń wewnętrznych. Określono też wpływ częstotliwości odkształcania na właściwości materiału. Zauważono, iż jej zmiana skutkuje też zmianą kształtu pętli histerezy oraz naprężeń w MRC. Obie wielkości wzrastały wraz z przyrostem częstotliwości odkształcania kompozytu. Stwierdzono, że w przedziale od 1 Hz

do 6 Hz przyrost ΔW wykazywał charakter liniowy, z zachowaniem stałej wartości pola magnetycznego. Wysznięto wniosek, że zależność amplitudy naprężenia nie jest funkcją liniową. Wykazano ponadto, że wraz ze wzrostem oddziałującego pola magnetycznego zwiększały się pola pętli histerezy dla każdej zadanej wartości odkształcenia. Zwiększanie odkształcenia postaciowego (γ) powodowało przyrost pól pętli histerezy oraz naprężeń.

Skonstruowano stanowisko pomiarowe do oceny możliwości kompozytu do pochłaniania energii mechanicznej, dostarczanej do układu w postaci impulsu (uderzenia). Wykonano w tym celu próbki kompozytów o różnej zawartości cieczy magnetycznej oraz próbkę tzw. czystą (bez MRF). Wykazano, iż wielkość pochłoniętej energii zależna jest od zewnętrznego pola magnetycznego oraz udziału MRF w kompozycje.

Sformułowano też sugestie w zakresie głównych kierunków przyszłych badań w zakresie MRC.

2.1. Kompozyty magnetoreologiczne na bazie MRF

2.1.1. Wprowadzenie

Ciecz magnetoreologiczna (ang.: *Magnetorheological Fluid* – MRF) w warunkach grawitacji wymaga zewnętrznych barier lub naczyń, które utrzymuje ją w określonym miejscu z zachowaniem geometrii. Niedogodność tę można pokonać na kilka sposobów. Pierwszy z nich polega na zastąpieniu cieczy nośnej materiałem o zdecydowanie większej lepkości (np. żel lub smar [2, 3]). Powstaje w ten sposób materiał, podobnie jak MRF, o zmiennej strukturze wewnętrznej, ale z możliwością łatwiejszego utrzymania w jednym miejscu. Wadą tego rozwiązania jest zbyt duża lepkość w stanie wyłączonym – bez pola magnetycznego, która może być przeszkodą w niektórych zastosowaniach. Efekt kształtowania zewnętrznych wymiarów można uzyskać także przez nasycenie cieczą MR materiału porowatego o otwartej strukturze komórkowej (siatkowej). MRF utrzymywana jest w ten sposób w granicach wyznaczonych rozmiarami matrycy, a jednocześnie ma możliwość swobodnego przemieszczania się i oddziaływania w jej wnętrzu. Przez pojęcie siatkowej struktury rozumiany jest materiał składający się głównie z wewnętrznych przestrzeni, otwartych porów, które są między sobą połączone. Przez nasycenie matrycy otrzymujemy materiał charakteryzujący się, podobnie jak ciecz MR, zależnością mechanicznych parametrów od pola magnetycznego. Tak ukształtowany nowy typ materiału nie ma jednej sformalizowanej nazwy. W literaturze przedmiotu odnaleźć możemy takie określenia, jak: *field-responsive fluid-impregnated cellular solids* [4], gąbki magnetoreologiczne (ang.: *magnetorheological foams*) [1]

lub magnetycznie wrażliwe gąbki (ang.: *magnetically responsive foams*) [5]. Ze względu na występowanie złożonej struktury matrycy i wypełnienia, uznano dalej za zasadne nazywanie go w prostszej formie kompozytem magnetoreologicznym, w skrócie MRC (ang.: *MagnetoRheological Composite*), co stosowano dalej w pracy.

Kompozyty MR należą do materiałów, które mimo zupełnie innej budowy często traktowane są jako jeden z działów wiedzy o cieczach MR. Rosnące zainteresowanie tymi materiałami i próby ich szerokiego zastosowania, szczególnie w zakresie aktywnych tłumień, powoduje, iż są one coraz dokładniej poznawane i opisywane. Wśród literatury dotyczącej kompozytów magnetoreologicznych pierwsze informacje o ich właściwościach i zastosowaniu można odnaleźć w pracach [1, 6–9].

Wykorzystanie materiału porowatego do matrycy MRC rozwiązuje jednocześnie wiele problemów związanych z zastosowaniem MRF w aplikacjach technicznych, np.:

- zagadnienie utrzymania cieczy w określonej przestrzeni, które wymaga użycia przystosowanych do tego pojemników,
- brak możliwości nadania określonego kształtu materiałowi,
- ograniczenie zjawiska sedymentacji fazy cząsteczek rozproszonych,
- ograniczenie niezbędnej ilości MRF w aplikacjach technicznych (redukcja kosztów wytworzenia).

Dzięki swobodzie kształtowania wymiarów geometrycznych kompozytów, pojawia się duża liczba nowych zastosowań cieczy magnetoreologicznych. Przykładem są tu tarcie tłumiki magnetoreologiczne [10, 11], które ograniczają zużycie cieczy aktywnej, a zjawisko sedymentacji cząstek, nawet w długim okresie przestoju urządzenia, jest znacznie ograniczone. Przekłada się to na większe bezpieczeństwo stosowania tłumików oraz eliminację wstępnych cykli pracy. Kolejnymi aplikacjami są elementy pochłaniające energię uderzenia, np. zagłówki samochodowe [12, 13], osłony na poszczególne partie ciała pasażerów, wykładziny wewnętrzne kasków, jak również aplikacje o potencjalnym zastosowaniu w przyszłości (aktywne kamizelki kuloodporne).

W pracy [14] przedstawiono badania (testy rozciągania, ściskania i ścinania) przeprowadzone na kompozytach magnetoreologicznych opartych na porowatych materiałach (gąbkach poliuretanowych), w celu wyznaczenia wpływu porowatości matrycy. Wykazano, że mniejsze pory uniemożliwiają wstrzyknięcie dużych ilości MRF, co w rezultacie skutkowało redukcją efektu tłumienia magnetoreologicznego. Z drugiej strony stwierdzono, iż mniejszy udział otwartych porów w matrycy powodował zwiększenie jej sztywności.

Należy podkreślić, iż stosowanie poliuretanu w materiale matrycy niesie ze sobą pewne ograniczenia. Wymienić można tu małą sztywność i wytrzymałość.

Było to powodem, dla którego naukowcy z Shanghai Institute of Technology przeprowadzili badania MRC zbudowanych z użyciem gąbek metalicznych [15]. Wykazali oni, że kompozyty tego typu otwierają nowe obszary badań i zastosowania tłumików MR opartych na materiałach porowatych. Kolejnym przykładem substytutu dla poliuretanu są (ang. *spacer fabrics*), używane na przykład jako opatrunki medyczne lub tkaniny ochronne. W pracy [16] wykazano występowanie efektu magnetoreologicznego w materiałach opartych na tego typu matrycy, które zostały poddane obciążeniu ściskającemu. Dodatkowo w rezultacie przeprowadzonych testów stwierdzono znaczny wpływ przewodności cieplnej na właściwości powstałych kompozytów.

2.1.2. Cele badań własnych

Mając na uwadze rezultaty analizy literatury przedmiotu, przyjęto następujące cele badań własnych:

- wytworzenie cieczy magnetoreologicznej do MRC, w tym rozważenie wpływu dodatków i zbadanie procesu jej sedymentacji,
- wytworzenie kompozytu magnetoreologicznego o matrycy z elastycznych materiałów porowatych (w postaci gąbek poliuretanowych) i cieczy magnetoreologicznej,
- analiza właściwości magnetomechanicznych MRC w warunkach cyklicznych odkształceń,
- badania MRC w warunkach mechanicznych obciążeń udarowych,
- modelowanie materiału kompozytowego,
- poszukiwanie nowych zastosowań.

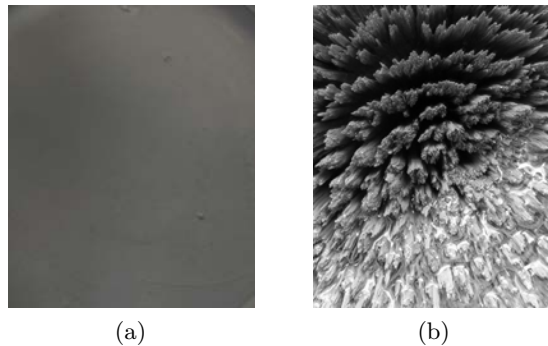
2.2. Ciecz magnetoreologiczna na potrzeby kompozytów MRC

2.2.1. Wprowadzenie

Istota działania cieczy magnetoreologicznych polega na zmianie właściwości MRF pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, stanowiącego sygnał wejściowy. Opisane zjawisko następuje w niezwykle krótkim czasie (w ciągu kilku milisekund) i jest odwracalne w przypadku użycia cząstek aktywnych, wykonanych z materiałów miękkich magnetycznie. Wspomniany efekt jest wynikiem złożonego składu cieczy, dzięki któremu można nazwać ją zawiesiną. W najprostszej postaci jej elementami składowymi jest ciecz nośna (np.: nafta, oleje mineralne, syntetyczne, półsyntetyczne, silikonowe, woda oraz inne) oraz cząsteczki magnetyczne polaryzujące, stanowiące 20–50% objętości cieczy. Cząsteczki aktywne mogą być wykonane z proszków materiałów ferromagnetycznych (np. żelazo karbonylkowe).

Ostatnim komponentem MRF są dodatki, których działanie zostanie przybliżone w dalszej części pracy. Wszystkie wymienione elementy połączone i odpowiednio przygotowane tworzą mieszaninę zmieniającą właściwości pod wpływem pola magnetycznego.

Specyficzne zachowanie cieczy magnetoreologicznej, w wyniku stymulacji polem magnetycznym, jest wynikiem „szeregowania się” cząsteczek magnetycznych znajdujących się w jej wnętrzu. Można to zaobserwować na rysunku 2.1. Wspomniane szeregowanie jest rezultatem wzbudzenia dipoli magnetycznych w cząsteczkach, które kolejno zaczynają się przyciągać/odpychać. Porządkowane drobiny ferromagnetyczne łączą się w grupy – łańcuchy o kierunku identycznym (równoległym) do kierunku rozchodzenia się pola magnetycznego w MRF, czyli linii pola magnetycznego.



Rys. 2.1. Charakterystyczne zachowanie cieczy MRF: (a) bez oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego, (b) w obecności zewnętrznego pola magnetycznego [17]

Im większa wartość zadanego natężenia pola magnetycznego, tym większa siła potrzebna do przerwania łańcuchów strukturalnych (wywołująca przekroczenie granicy plastyczności). Ograniczeniem jest tu poziom nasycenia magnetycznego materiału cząstek. Termin ten oznacza największy możliwy do wzbudzenia w danym materiale (w tym przypadku miękkim magnetycznie) moment magnetyczny. Oznacza to, iż występuje sytuacja, w której dalsze zwiększanie natężenia pola magnetycznego będzie powodowało niewspółmiernie mały wzrost granicznego naprężenia ścinającego lub zostanie on całkowicie zatrzymany.

2.2.2. Pożądane właściwości MRF, wpływ dodatków i innych czynników

Do właściwości MRF, istotnych ze względu na aplikacje przemysłowe, zaliczyć można:

- małą lepkość przy braku zewnętrznego pola magnetycznego,
- dużą granicę plastyczności w warunkach stymulacji magnetycznej (szczególnie dla obciążeń zmiennych),
- krótki czas reakcji cieczy na zadane pole magnetyczne,
- możliwość pracy w szerokim zakresie temperatury (niezwykle ważne w układach, takich jak hamulce czy sprzęgła),
- redukcję efektu sedymentacji, a w przypadku jego wystąpienia łatwość rozmieszania i ponownego ujednorodnienia mieszaniny,
- minimalizację aglomeracji cząsteczek fazy rozproszonej; zjawisko to, polegające na łączeniu się cząstek w nieregularne skupiska w stanie „wyłączonym”, co w rezultacie rzutuje na zmianę właściwości MRF w polu magnetycznym.

Z powodu złożonej budowy MRF, wpływ na jej właściwości wywiera wiele czynników. Istotną część z nich dotyczy cząsteczek aktywnych, jak np. udział, wielkość i kształt drobin, nasycenie magnetyczne czy pole koercji materiału (powinno być jak najmniejsze), z którego są wykonane i inne. Ciecz nośna jest równie istotnym elementem, a jej lepkość wywiera duży wpływ na charakterystyki MRF. Równie ważne jest zachowanie cieczy nośnej w środowisku, w którym wykorzystywane są urządzenia z cieczą MR. W tym przypadku istotne są: temperatura krzepnięcia oraz parowania, neutralność chemiczna, możliwość dokładnego pokrycia cząsteczek aktywnych oraz odporność na parowanie cieczy nośnej.

Bardzo ważnym składnikiem MRF są tzw. dodatki. Ich różnorodność idzie w parze ze zmianami właściwości, jakie wywołują, np.:

- przeciwdziałają aglomeracji polegającej na wzajemnym przyciąganiu się cząstek aktywnych magnetycznie i łączeniu w duże kompleksy,
- zwiększają stabilność sedymentacyjną (zjawisko polegające na samoistnym wyodrębnianiu się cząstek rozproszonych z homogenicznej cieczy magneto-reologicznej wraz z upływem czasu, gdy nie jest ona używana i poddawana mieszaniu; w rezultacie dochodzi do osiadania cząsteczek na dnie pojemnika, w którym znajduje się MRF),
- zapobiegają korozji cząstek aktywnych [18, 19].

Odpowiedni dobór dodatków i ich proporcji daje możliwość szerszego zastosowania cieczy wrażliwych na pola magnetyczne w przemyśle i otwiera kolejne drogi aplikacji. Podsumowując, postęp wiedzy i prowadzenie badań w niniejszej tematyce jest istotne dla rozwoju zastosowań MRF.

Przy braku pola magnetycznego lepkość cieczy magneto-reologicznej nie zależy od szybkości ścinania, natomiast mają na nią wpływ warunki termodynamiczne. Zaliczyć do nich należy temperaturę oraz ciśnienie, które jednocześnie warunkują właściwości cieczy poddanej działaniu pola. Właściwości termodynamiczne są

niezwykle ważne dla zastosowania cieczy aktywnych i muszą być brane pod uwagę w procesie określania składu MRF.

2.2.3. Dobór składu cieczy magnetoreologicznej

Mając na uwadze informacje zawarte w poprzednim podrozdziale, wykonano własną ciecz magnetoreologiczną. Podstawowy jej skład przewidywał dziewięć części wagowych cząsteczek żelaza karbonylkowego i przypadającą na to jedną część oleju silikonowego, pełniącego funkcję ośrodka nośnego. Po zapoznaniu się i analizie dostępnych na rynku odmian olejów wybrano polimer silikonowy o nazwie POLASTOSIL M-200 (producent: Silikony Polskie Sp. z o. o.). Jego podstawowe charakterystyki zostały podane w tabeli 2.1. Za cząsteczki aktywne magnetycznie wykorzystano proszek żelaza karbonylkowego typu CC firmy BASF. Skład chemiczny użytego materiału zaprezentowano w tabeli 2.2.

Tabela 2.1. Parametry oleju silikonowego o nazwie POLASTOSIL M-200

Parametr ¹	Wartość	
Ciężar właściwy (w temp. 25°C)	[g/cm ³]	0,97
Lepkość (w temp. 25°C)	[cP]	200

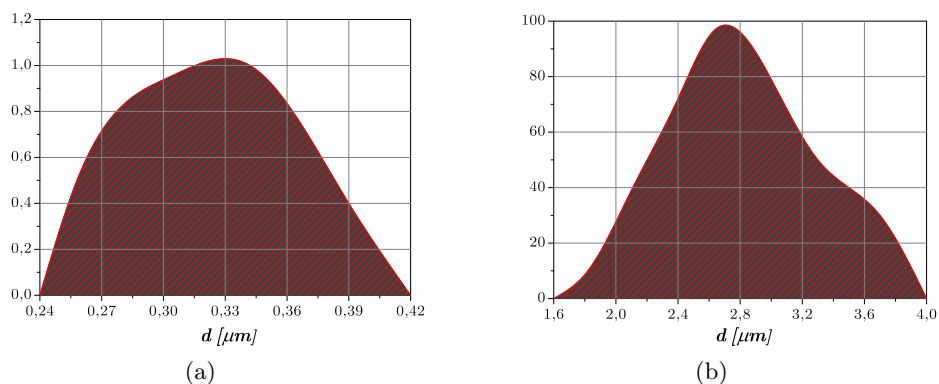
Tabela 2.2. Skład chemiczny wybranego proszku żelaza karbonylkowego

Fe [%]	C [%]	N [%]	O [%]
>99,5	<0,05	<0,01	<0,3

Zgodnie z opisem produktu dostarczonym przez producenta, średnia wielkość cząsteczek powinna wynosić 6 μm . W wyniku badań okazało się, że wartość średnia rozmiaru cząstki wynosi 2,65 μm . Potwierdzeniem są dane zaprezentowane na rysunku 2.2, które przedstawiają rozkład średnic cząsteczek żelaza karbonylkowego.

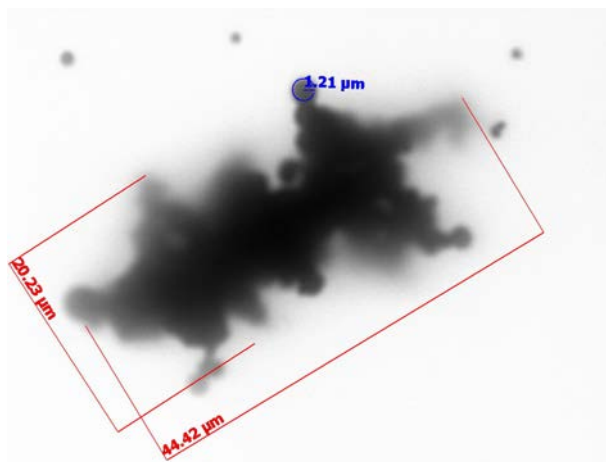
W trakcie pomiaru zaobserwowano zjawisko aglomeracji cząsteczek, czyli łączenia się ich w skupiska dochodzące do bardzo dużych rozmiarów, co widoczne jest na rysunku 2.3. Wyniki badania „na mokro” zostały zweryfikowane odczytem wielkości cząsteczek proszku pod mikroskopem Axiomager.M1m. Urządzenie to, wyposażone w moduł jasnego pola (obserwacja w świetle przechodzącym i odbitym oraz z użyciem kontrastu Nomarskiego – DIC), zostało udostępnione przez Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej. Przykładowy obraz otrzymany w trakcie badania przedstawiono na rysunku 2.4.

¹ Użyto jednostek z oryginalnych materiałów producenta: 1 g/cm³ = 1000 kg/m³, 1 cP (centypauz) = 1 mPa s.

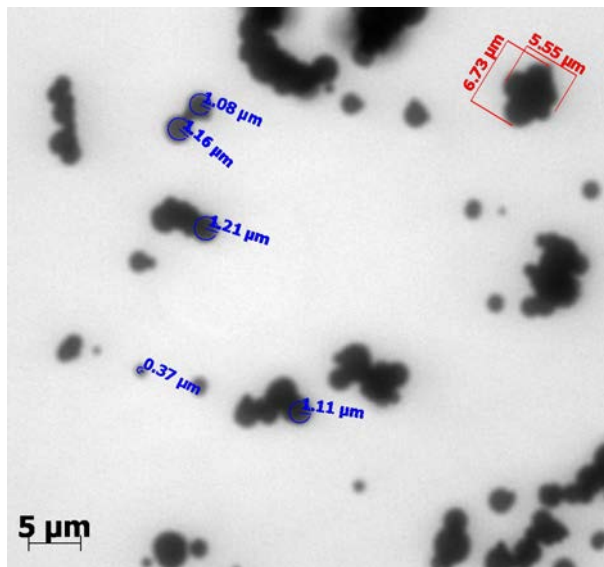


Rys. 2.2. Rozkłady średniej wartości średnic cząsteczek żelaza karbonylowego typu CC firmy BASF – „metoda na mokro”: a) zakres wielkości cząsteczek od $0,25\ \mu\text{m}$ do $0,40\ \mu\text{m}$, b) zakres wielkości od $1,8\ \mu\text{m}$ do $3,8\ \mu\text{m}$. Pomiar wykonany metodą dyfrakcji laserowej z użyciem urządzenia Mastersizer 2000 (Malvern) z przystawką HydroMu, udostępnionego przez Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej [20]

Podczas obserwacji zawiesiny cząstek w płynie zauważono ich silne, chaotyczne ruchy (ruchy Browna). Wy tłumaczeniem zauważonego zjawiska są zderzenia ziaren żelaza karbonylowego z cząsteczkami ośrodka nośnego (wody).



Rys. 2.3. Efekt aglomeracji cząsteczek żelaza karbonylowego. Pomiar: średnica wybranego ziarna żelaza karbonylowego (kolor niebieski); skupisko cząsteczek (kolor czerwony) [20]



Rys. 2.4. Obraz cząstek żelaza karbonylowego typu CC z naniesionymi pomiarami ich promieni (kolor niebieski), czerwonym kolorem zaznaczono wymiary skupiska cząstek dla porównania wyników [20]

Ostatnim etapem doboru składu cieczy MR było określenie dodatków. Ich zadaniem było ograniczenie zjawiska sedymentacji. W tym celu przebadano dwie substancje pod kątem wpływu na właściwości cieczy magnetoreologicznej: smar silikonowy oraz silan (ang.: *Tramino-functional propyltrimethoxysilane*). Wyniki przeprowadzonych badań zostaną przedstawione w dalszej części niniejszego rozdziału.

Ostatecznie przystąpiono do produkcji cieczy MR. Pierwsza faza przewidywała dokładne połączenie cieczy nośnej (oleju silikonowego) ze smarem silikonowym poprzez wymieszanie składników. Proces ten prowadzono do osiągnięcia mieszanki o jednorodnej konsystencji, a następnie odstawiono ją na 24 godziny w celu odgazowania. W kolejnym kroku dodany został proszek żelaza karbonylowego. Jednocześnie całość była poddawana mieszaniu do momentu otrzymania homogenicznej zawiesiny, którą ponownie poddano odgazowaniu. Tak otrzymana ciecz magnetoreologiczna charakteryzowała się składem przedstawionym w tabeli 2.3. Jednorazowo przygotowano około 100 gramów MRF.

Tabela 2.3. Skład wagowy wytworzonej cieczy magnetoreologicznej

Żelazo karbonylowe [%]	Olej silikonowy [%]	Smar silikonowy [%]
69	25	6

2.2.4. Zjawisko sedymentacji i aglomeracji w cieczy magnetoreologicznej

Przez sedymentację rozumie się zjawisko samoistnego wyodrębniania się cząstek z ich zawiesiny w cieczy pod wpływem sił zewnętrznych (najczęściej grawitacji). W przypadku MRF polega ono na wyodrębnianiu się cząstek aktywnych magnetycznych (o większej gęstości niż faza nośna) z homogenicznej cieczy wraz z upływem czasu, osiadaniu tych cząsteczek na dnie zbiornika i tworzeniu zbitego osadu. Powoduje to niepożądaną zmianę charakterystyki MRF, co może prowadzić do jej bezużyteczności. Sedymentację zauważyć można jako rozwarstwienie na ciecz nośną unoszącą się nad skupiskiem cząstek aktywnych. Zmianom właściwości MRF, zachodzącym wraz z upływem czasu, można zapobiegać przez ponowne rozmieszanie. W praktyce wiąże się to z koniecznością wstępnego rozruchu, przez który rozumie się pierwsze cykle pracy urządzenia. W fazie tej ciecz ulega rozmieszaniu, po czym jest gotowa do właściwego użytkowania. W przypadku zastosowań technicznych, związanych z pochłanianiem energii uderzeń, etap wstępnego rozruchu jest zwykle niemożliwy do realizacji ze względu na niezwykle krótki czas przebiegu zjawiska udarowego. Konieczność wstępnych cykli pracy nie jest jedynym problemem związanym ze zjawiskiem sedymentacji MRF. Jak już wspomniano, w przypadku długiego okresu nieużytkowania cieczy dochodzi do jej rozwarstwienia. Ciągłe oddziaływanie siły grawitacji na względnie ciężkie cząsteczki powoduje ich „ubijanie się” pod własnym ciężarem. W rezultacie prowadzi to do wytworzenia warstwy osadu magnetycznego, której rozmieszanie jest trudne, a czasami niemożliwe do wykonania bez mechanicznej ingerencji z zewnątrz.

Przedstawione negatywne skutki zjawiska sedymentacji cieczy magnetoreologicznej obrazują jak ważnym tematem jest kwestia dążenia do jej minimalizacji. W dalszej części pracy przedstawione zostaną wyniki badań wpływu wybranych dodatków na sedymentację MRF.

2.2.5. Badanie sedymentacji MRF

Sedymentacja cząstek i jej tempo są silnie powiązane ze zjawiskiem aglomeracji fazy rozproszonej. Zjawisko to zachodzi w sytuacji, gdy cząsteczki znajdujące się dostatecznie blisko (np. za sprawą przyciągania magnetycznego) łączą się w wyniku oddziaływania sił międzycząsteczkowych. Wpływ aglomeracji na proces sedymentacji związany jest z tym, iż każda mała cząsteczka ośrodka nośnego MRF (np. oleju silikonowego) wykonuje nieuporządkowane ruchy cieplne. Oznacza to, że ma określoną energię kinetyczną, która jest stała w danej temperaturze. Poruszające się cząsteczki zderzają się z rozproszoną w nich fazą proszku magnetycznego, wprawiając jej drobiny w chaotyczne ruchy. Ich występowanie wywiera korzystny

wpływ na ograniczenie zjawiska sedymentacji, a co za tym idzie, wydłużenie okresu przydatności cieczy. Podane zachowanie wynika z faktu, iż wzrastająca masa skupiska cząsteczek przekłada się bezpośrednio na wartość jego energii potencjalnej, podczas gdy średnia energia kinetyczna nie ulega tak drastycznemu zwiększeniu. Po przekroczeniu krytycznej masy dochodzi do opadania dużych skupisk z materiału magnetycznego na dno pojemnika. Wytlumaczeniem niniejszego zjawiska jest zbyt mała prędkość cząstek, która nie przeciwdziała sedymentacji [21].

Przytoczone argumenty potwierdzają ściśle powiązanie procesu rozwarstwienia MRF ze zjawiskiem aglomeracji jej cząstek magnetycznych. Im większe kompleksy, tym teoretycznie większa dynamika sedymentacji i krótszy okres, w którym ciecz wykazuje optymalne charakterystyki pracy. Reasumując, istotnym zagadnieniem jest poszukiwanie dodatków do cieczy MR, które ograniczałyby możliwość łączenia się cząsteczek, np. przez ich pokrycie specjalnymi warstwami (substancje powierzchniowo czynne). Dodatki takie nazywane są w literaturze przedmiotu stabilizatorami właściwości magnetycznych, czyli w pełni uzasadnione jest prowadzenie badań nad ich działaniem oraz zastosowaniem.

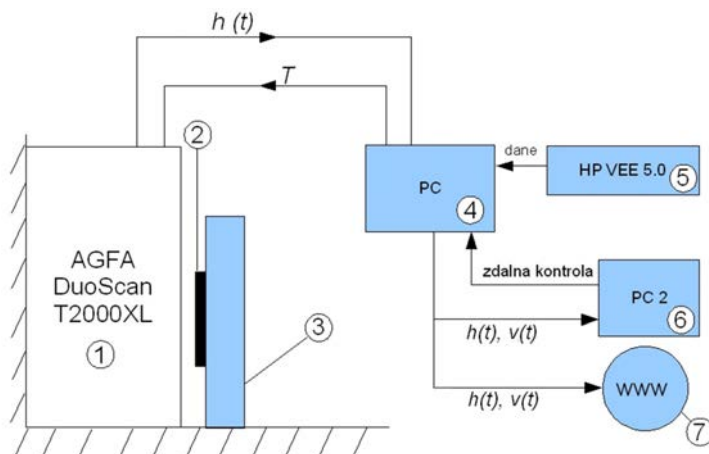
Do badania wpływu domieszek na efekt sedymentacji wybrano dwa dodatki. Pierwszym z nich był smar silikonowy do wysokiej próżni POLASTOSIL M-200, jako przedstawiciel grupy smarów stałych. Zwykle stosowany jest on jako: środek smarny do urządzeń pracujących w warunkach wysokiej próżni (od 10^{-3} do 10^{-7} mbar), laboratoryjny lubrykant, przeciwwzartarciowy smar stały do części szklanych i syntetycznych oraz do smarowania gumowych uszczelek używanych w wysokich temperaturach [22]. Wybrana substancja została wyprodukowana przez firmę POCH S.A.

Drugim rozpatrywanym dodatkiem był trixotropowy związek o nazwie Silan. Celem jego zastosowania było ograniczenie zjawiska aglomeracji cząstek aktywnych magnetycznie przez pokrycie ich warstwą powierzchniowo czynną. Spodziewanym efektem miało być ograniczenie możliwości zbytniego zbliżania się cząstek żelaza karbonylkowego i ich łączenia w większe kompleksy. W rezultacie dynamika procesu sedymentacji MRF powinna zostać spowolniona.

Stanowisko badawcze

W celu analizy sedymentacji MRF skonstruowane zostało oryginalne stanowisko pomiarowe. Badanie wpływu dodatków na dynamikę wspomnianego procesu, wymagało cyklicznych pomiarów grubości osadu z cząstek magnetycznych. Ponieważ nie ma gotowego rozwiązania, stanowisko zaprojektowano i wykonano według własnego pomysłu, uwzględniając następujące wymagania:

- zapewnienie jednakowej temperatury otoczenia testowanych próbek MRF,
- minimalizacja wielkości drgań otoczenia zakłócających przebieg naturalnego procesu opadania,
- automatyzacja procesu pomiarowego.



Rys. 2.5. Stanowisko pomiarowe do badania zjawiska sedymentacji MRF;
 1 – skaner optyczny, 2 – próbki z cieczą MR, 3 – blat mocujący, 4 – komputer sterujący,
 5 – oprogramowanie do obróbki danych pomiarowych,
 6 – zewnętrzny komputer sterujący, 7 – strona serwera programu Agilent VEE [20]

Schemat prototypowego stanowiska został zaprezentowany na rysunku 2.5. Idea jego działania została oparta na pomiarze grubości osadu cząstek magnetycznych MRF przy użyciu skanera optycznego. Urządzenie to, podłączone do komputera sterującego, rejestrowało w sposób automatyczny obraz próbek materiałowych z zadaną częstotliwością. Po zeskanowaniu otrzymany plik graficzny poddawany był edycji, a uzyskane dane obróbce i archiwizacji. Podczas eksperymentu posłużono się oryginalnym programem napisanym w środowisku Agilent VEE, który umożliwiał obserwację wyników pomiarowych. Mając na uwadze zapewnienie niezakłóconego pomiaru, stanowisko pomiarowe z możliwością zdalnej kontroli (z użyciem zewnętrznego komputera) umieszczono w odizolowanym pomieszczeniu.

Próbki materiałowe

Do badania przewidziano 9 próbek opartych na tej samej cieczy MR składającej się wagowo w 70% z żelaza karbonylowego i w 30% z oleju silikonowego. Próbka P0 była próbką referencyjną i nie zawierała żadnych dodatków.

Do testów przyjęto dwie substancje. Pierwszą z nich był smar silikonowy do wysokiej próżni, którego zawartość w poszczególnych próbkach została przed-

Tabela 2.4. Przewidziane udziały wagowe smaru silikonowego w próbkach MRF, w stosunku do całkowitej wagi oleju silikonowego

Smar silikonowy [%]				
Próbka	P1	P2	P3	P4
Udział	10	20	30	40

Tabela 2.5. Zawartość dodatku o nazwie *Silan* w badanych próbkach

Silan [%]				
Próbka	P5	P6	P7	P8
Udział	0,1	0,2	0,3	0,4

stawiona w tabeli 2.4. Kolejnym dodatkiem był środek powierzchniowo czynny o nazwie *Silan* (tab. 2.5).

Metodyka badań

Przeprowadzony eksperyment miał za zadanie dostarczenie informacji na temat wpływu dodatków do MRF na przebieg procesu jej sedymentacji w wyniku oddziaływania sił grawitacji. W tym celu dokonywano pomiaru przygotowanych próbek co godzinę przez 50 kolejnych dni. W rezultacie otrzymano przebiegi zmian w czasie wysokości osadów z cząstek magnetycznych. Na ich podstawie możliwe było określenie:

- tempa przebiegu badanego zjawiska,
- wpływu zawartości dodawanych substancji na dynamikę sedymentacji,
- czasu, po którym proces uległ zakończeniu.

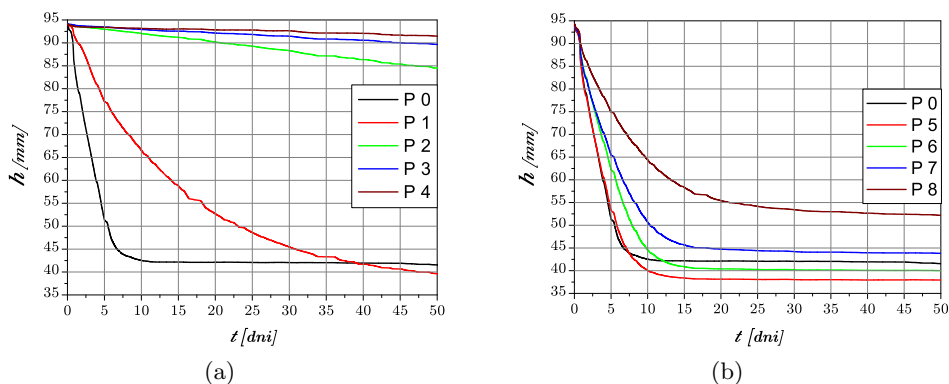
Wyniki badań

Po zakończeniu obserwacji otrzymano dane, które zaprezentowano na rysunkach 2.6a i 2.6b. Przedstawiają one zmiany grubości wydzielonego osadu cząstek magnetycznych na dnie probówek z cieczą. Dla porównania wyników uwzględniono próbkę odniesienia P0 niezawierającą żadnych dodatków. W jej przypadku stwierdzono 56% maksymalne obniżenie wysokości fazy żelaza karbonylowego, co nastąpiło po około 11 dniach.

Pierwszym rozpatrywanym dodatkiem był smar silikonowy do wysokiej próżni. W próbkach zawierających go (P1, P2, P3, P4) odnotowano spowolnienie sedymentacji, w porównaniu do P0. Jednocześnie stwierdzono wpływ udziału stabilizatora na dynamikę procesu rozwarstwienia fazowego MRF. Na podstawie otrzymanych danych wnioskuje się, iż po zakończeniu okresu pomiarowego sedymentacja była kontynuowana dla cieczy z dodatkiem smaru.

Otrzymane przebiegi (rys. 2.6) wskazują, że większa zawartość smaru wpływały na zmniejszenie tempa opadania cząstek ferromagnetycznych. W przypadku próbek P2, P3, P4 zanotowano kolejno 12%, 6% i 4% obniżenie wysokości osadu,

w stosunku do wartości początkowej. Przypuszcza się, że zwiększenie gęstości cieczy MR, po wprowadzeniu dodatku w postaci smaru silikonowego, było główną przyczyną zaobserwowanego zjawiska. Wynika to z faktu, iż opadające cząstki napotykały coraz większy opór ze strony cieczy nośnej, w której były zawieszone, gdy zwiększany był udział stabilizatora.



Rys. 2.6. Przebiegi zmian grubości osadu z cząstek magnetycznych w próbkach cieczy MR. Zmiana tempa procesu sedymentacji wywołana dodatkiem w postaci:

- (a) smaru silikonowego do wysokiej próżni,
 (b) środka powierzchniowo czynnego (silanu) [20]

Identyczną analizę przeprowadzono dla drugiej badanej substancji. Silan jako środek powierzchniowo czynny miał teoretycznie zapobiegać zjawisku aglomeracji cząstek magnetycznych, co powinno przełożyć się na spowolnienie tempa ich opadania. We wszystkich próbkach, z wyjątkiem P8, stwierdzono zakończenie procesu sedymentacji. Dodatek silanu spowodował wydłużenie w czasie procesu opadania również dla najmniejszej zawartości wynoszącej 0,1% (nastąpiło to po około 16 dniach). Po przeliczeniu wysokości osadów, w stosunku do ich wartości początkowych, stwierdzono redukcję na poziomie: P5 – 59%, P6 – 58%, P7 – 53%, P8 – 45%. Zwiększenie zawartości silanu wewnątrz cieczy magnetoreologicznej powodował wydłużenie całkowitego czasu opadania cząstek, przypuszczalnie wskutek ograniczenia zjawiska aglomeracji. Na podstawie zaprezentowanych wyników potwierdzono tezę o wpływie badanych dodatków na tempo przebiegu sedymentacji MRF.

2.3. Kompozyt magnetoreologiczny (MRC)

2.3.1. Matryca porowata

Niezbędnym komponentem kompozytu magnetoreologicznego jest porowata struktura składająca się z sieci połączonych ścian komórek i krawędzi, zwana matrycą. W materiale tej klasy pełni ona funkcję rusztowania dla MRF. Przykładem matrycy mogą być: tkaniny, filc lub materiał porowaty jak gąbka poliuretanowa. Do najważniejszych kryteriów doboru materiału struktury nośnej należą:

- wielkość, kształt oraz regularność porów,
- możliwość łatwego kształtowania wymiarów zewnętrznych matrycy oraz zdolność materiału do ich późniejszego utrzymania,
- zachowanie nadanego kształtu struktury porowatej po nasączeniu jej cieczą MR.

Spośród możliwych do wyboru materiałów wymienione kryteria były spełnione najpełniej przez gąbki poliuretanowe. Wybrany do produkcji MRC materiał poliuretanowy miał pory o widocznej gołym okiem regularności i średniej wielkości ≈ 1 mm (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Struktura porowata gąbki poliuretanowej o średniej wielkości porów równej 1 mm [20]

2.3.2. Wytwarzanie próbek

Pierwszym etapem przygotowania próbek do ich badania podczas cyklicznego ścinania było wytworzenie MRC o porowatej matrycy. W tym celu wybrany materiał poliuretanowy pocięto na prostokątne kawałki długości 9 mm, szerokości 40 mm i wysokości 10 mm. Wymiary zostały dobrane w ten sposób, aby w przypadku maksymalnego odkształcenia testowanej próbki na materiał oddziaływało pole magnetyczne generowane w szczelinie elektromagnesu.

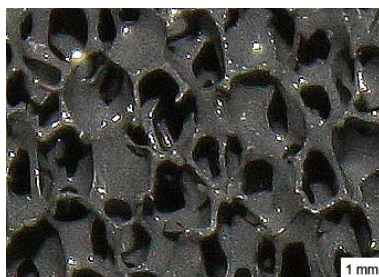
Centralnym elementem próbek była płytka nośna, która została wykonana z laminatu. Jej zadaniem było przenoszenie siły z maszyny wytrzymałościowej na materiał kompozytowy, który odkształcał się pod jej wpływem. Istotnymi wymaganiami w stosunku do płytki nośnej była duża sztywność w zakresie przenoszonych

sił oraz brak właściwości magnetycznych. W trakcie wyboru spoiwa użytego do połączenia elementów składowych poszukiwano substancji niewrażliwej na pola magnetyczne oraz tworzącej strukturę o sztywności znacznie przekraczającej sztywność MRC. Otrzymana w ten sposób próbka przedstawiona została na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Próbka do badania MRC w warunkach cyklicznego ścinania:
1 – cienki laminat umożliwiający zamontowanie próbki w szczelinie elektromagnesu,
2 – materiał porowaty stanowiący matrycę kompozytu, 3 – płytka nośna [20]

W fazie końcowej wprowadzono ciecz MR do porowatej struktury. W trakcie procesu wypełniania kontrolowano zawartość MRF oraz dbano o jej równomierne rozproszczenie w całej objętości matrycy. Na rysunku 2.9 przedstawiono widok materiału kompozytowego. Tak wykonane próbki były gotowe do przeprowadzenia zaplanowanych badań.



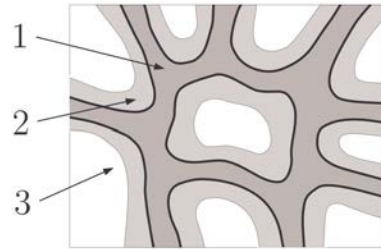
Rys. 2.9. Poliuretanowa matryca porowata o średniej wielkości porów równej 1 mm. Struktura pokryta cieczą magnetoreologiczną stanowiącą 10% jej objętości [23]

W celu wyznaczenia wpływu zawartości MRF na parametry materiału kompozytowego wytworzone zostały cztery typy próbek (tab. 2.6). Pierwsza „wzorcowa” nie miała cieczy aktywnej magnetycznie, pozostałe trzy zawierały płyn w ilości: 10%, 15% i 25% objętości matrycy.

Wypełnienie matrycy cieczą MR pokrywającą wewnętrzne ścianki materiału porowatego zaprezentowano na rysunku 2.10. Podczas doboru parametrów wypełnienia wymagana jest analiza oddziaływania z matrycą nośną – wzajemna interakcja oraz efektywność mierzona końcowym efektem magnetoreologicznym. Zbyt duża ilość MRF w matrycy może prowadzić do niekorzystnych efektów. W tzw. dużych odkształceniach dochodzić może do sytuacji, kiedy na drodze przemieszczającej

Tablica 2.6. Próbkki kompozytowe do badania w warunkach cyklicznego ścinania

Udział objętościowy ciecicy MR w kompozycie	Oznaczenie
0	DB 0
10	DB 1
15	DB 3
25	DB 4



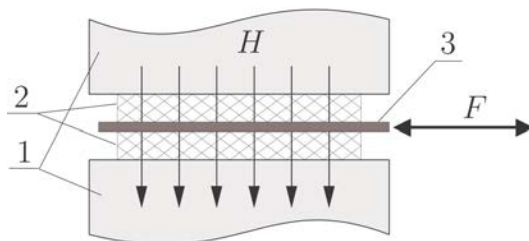
Rys. 2.10. Schemat kompozytu magnetoreologicznego: 1 – struktura nośna, matryca, 2 – MRF, 3 – pusta przestrzeń (powietrze) [7]

się ciecicy we wnętrzu MRC zabraknie wolnego miejsca. Prowadzi to bądź do jej wycieku na zewnątrz, bądź, w przypadku szczelnego zamknięcia zewnętrznych krawędzi, do gwałtownego przyrostu ciśnienia. W rezultacie kompozyt może ulec bądź trwałemu odkształceniu, bądź uszkodzeniu. Nadmierne zwiększanie ilości wypełnienia kompozytu jest również niekorzystne w ujęciu kosztów materiału i nie gwarantuje przyrostu efektu magnetoreologicznego, czyli zwiększenia lepkości. Z drugiej strony zbyt mała zawartość MRF powoduje powstanie pasywnych obszarów wewnątrz kompozytu, które nie pracują pod wpływem pola magnetycznego. Z podanych rozważań wynika, iż należy dążyć do znalezienia optimum wypełnienia matrycy składnikiem aktywnym magnetycznie tak, by uzyskać założone zmiany właściwości magnetomechanicznych bez niepotrzebnych strat i kosztów. Zmiana ilości ciecicy w kompozycie i jej wpływ na efekt magnetoreologiczny nie została wyczerpująco opisana do tej pory w literaturze fachowej, dlatego jest przedmiotem aktualnych badań autorów.

2.4. Badania właściwości magnetomechanicznych MRC z matrycami porowatymi

2.4.1. Cel badań

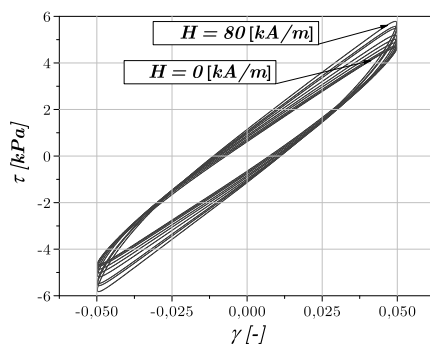
Głównym celem badań było oszacowanie możliwości wytworzonego materiału kompozytowego związanych z rozpraszaniem energii mechanicznej dostarczanej do układu, czyli tłumienia. Należy zaznaczyć, iż tłumienie tego typu polega w głównej mierze na zamianie energii mechanicznej na energię cieplną (zmiany wewnątrz materiału, takie jak jego uszkodzenia, są pomijane). Przygotowanie stanowiska pomiarowego oraz wytwarzanie próbek MRC miało na celu uzyskanie w przekroju badanego materiału stanu obciążenia możliwie zbliżonego do czystego ścinania.



Rys. 2.11. Schemat próbki z kompozytu MR do badań cyklicznych na ścinanie:

1 – rdzeń magnetyczny, 2 – kompozyt MR, 3 – płytka nośna,
 H – wektor pola magnetycznego, F – zewnętrzna siła ścinająca [24]

Sposób badania podstawowych właściwości próbek kompozytów przyjęto zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2.11. Pole magnetyczne przykładane było w kierunku prostopadłym do obciążenia. Stanowisko pomiarowe składało się z części mechanicznej (wymuszającej kontrolowane odkształcenie), części elektromagnetycznej (zadającej pole magnetyczne o określonej, sterowalnej wartości H) oraz części pomiarowej z możliwością akwizycji i obróbki danych. Przykładowe wyniki badań wykonane na jednej z próbek kompozytowych pokazano na rysunku 2.12.



Rys. 2.12. Przykładowy zbiór pętli histerezy dla cyklicznego ścinania podczas zmiany wartości zadawanego pola magnetycznego (krok co 10 kA/m) – próbka DB 1 [20]

Próbkę obciążano cyklicznie z zachowaniem stałej amplitudy odkształcenia. Wyraźnie zaobserwowano zmiany naprężenia w funkcji natężenia pola magnetycznego. Świadczy to o poprawnej reakcji wytworzonego materiału. Pole zmieniano skokowo, rejestrując poszczególne pętle. W trakcie analizy otrzymanych wyników stwierdzono zwiększenie pola pętli, co świadczy o wzroście zdolności do pochłaniania energii.

2.4.2. Stanowisko badawcze

Wykonanie badań kompozytów wymaga stworzenia odpowiedniego stanowiska badawczego umożliwiającego w sposób kontrolowany zadawanie obciążeń mechanicznych i magnetycznych. W tym celu zaadaptowano stanowisko do badań wytrzymałościowych próbek oparte na pulsatorze hydraulicznym MTS. Schemat stanowiska pokazano na rysunku 2.13. Istotną modyfikacją, w stosunku do standardowego wyposażenia pulsatora hydraulicznego, jest tutaj zespół zadawania i sterowania natężenia pola magnetycznego. Dodatkowo stanowisko wyposażone zostało w oryginalny układ do zadawania obciążenia mechanicznego w warunkach cyklicznego lub quasi-statycznego ścinania kompozytu.

Na rysunku 2.14 przedstawiono widok układu pomiarowego z niezbędnym osprzętem elektronicznym i zamocowaną próbką kompozytową.

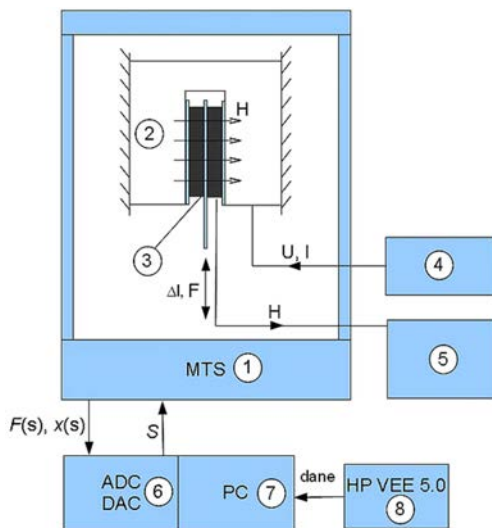
2.4.3. Opis eksperymentu

Eksperyment zakładał przebadanie wytworzonych materiałów magnetoreologicznych (o różnej zawartości MRF) w warunkach cyklicznego ścinania podczas jednoczesnej stymulacji próbek polem magnetycznym o regulowanym natężeniu. Zadawany sygnał (siła wymuszająca) miał charakter sinusoidalny. Wyniki badania próbek przedstawione zostały jako zależności: naprężenie tnące–odkształcenie postaciowe $\tau(\gamma)$, z których każda opisywała jeden wybrany cykl odkształcania. Powstałe wykresy przyjmowały postać pętli histerezy o różnych kształtach i wielkościach, na co miały wpływ następujące czynniki: wartość natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, amplituda oraz częstotliwość odkształcania, jak również zawartość cieczy magnetoreologicznej w kompozycie. Przykładowy zbiór pętli otrzymanych dla trzech różnych amplitud odkształcania przedstawiono na rysunku 2.15.

2.4.4. Wpływ zawartości cieczy na kształt pętli histerezy

Wpływ zawartości cieczy określono, badając trzy próbki o różnej zawartości cieczy aktywnej magnetycznej (oznaczenia i ilości MRF odpowiednio: DB 1 – 0%, DB 2 – 15% i DB 3 – 25% objętości matrycy) oraz próbkę o zerowej zawartości cieczy DB 0. Ostatnia z nich, nie mając właściwości magnetycznych, stanowiła punkt odniesienia do określenia zmian parametrów mechanicznych porowatej matrycy po nasyceniu jej MRF.

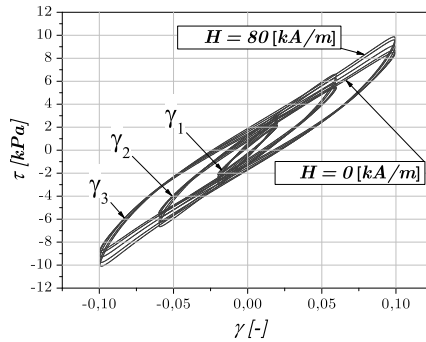
Pierwszy etap przewidywał określenie wpływu zawartości cieczy na kształt pętli histerezy otrzymanych z pomiarów. Przykładowe ich porównanie, dla stałej wartości natężenia $H = 30$ kA/m, zaprezentowano na rysunku 2.16.



Rys. 2.13. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – pulsator MTS, 2 – źródło pola magnetycznego, elektromagnes, 3 – badana próbka, 4 – zasilacz prądowy, 5 – czujnik natężenia pola magnetycznego, 6 – system akwizycji danych, 7 – komputer PC, 8 – program do przetwarzania danych pomiarowych [25]

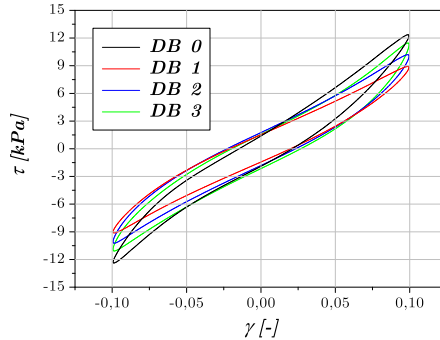


Rys. 2.14. Stanowisko badawcze do badań właściwości magnetomechanicznych kompozytów magnetoreologicznych: 1 – pulsator MTS, 2 – układ regulacji pola magnetycznego, 3 – czujnik siły, 4 – układ magnetyczny wraz z zamontowaną próbką, 5 – zasilacz regulowany [20]



Rys. 2.15. Zbiór pętli histerezy dla przypadku cyklicznego ścinania kompozytu dla zmiany wartości natężenia zadawanego pola magnetycznego (krok co 20 kA/m).

Wykresy dla trzech wartości amplitudy odkształcenia postaciowego (γ) i częstotliwości obciążania równej $f = 1$ Hz. Próbką DB 1 [25]



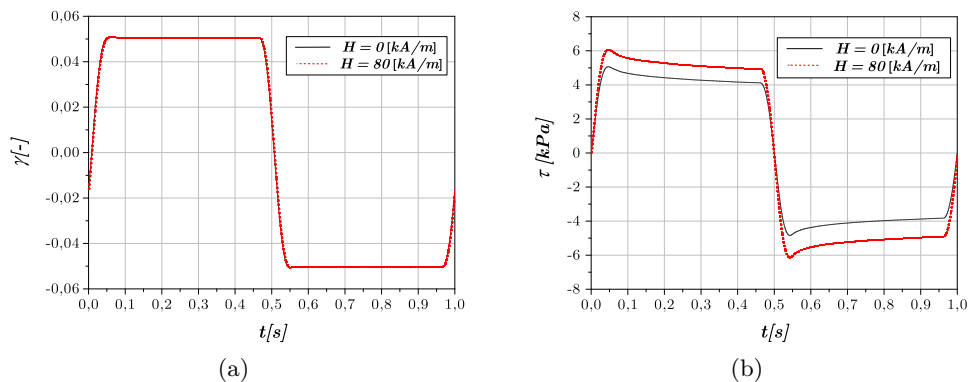
Rys. 2.16. Pętle histerezy dla próbek o różnej zawartości cieczy magnetoreologicznej: $f = 1$ Hz; $\gamma_a = 0,1$; $H = 30$ kA/m [20]

Wprowadzenie MRF do wnętrza poliuretanowej matrycy spowodowało, że maksymalne naprężenie uzyskane w kompozytach było mniejsze od wartości otrzymanej dla czystej próbki DB 0. Źródła tego zjawiska należy upatrywać w zmniejszeniu zjawiska tarcia we wnętrzu matrycy. Struktura nośna nasycona cieczą MR, opartą na oleju silikonowym, ma bowiem mniejsze opory tarcia niż nienapełnionych cieczą.

2.4.5. Wpływ charakteru sygnału wymuszającego

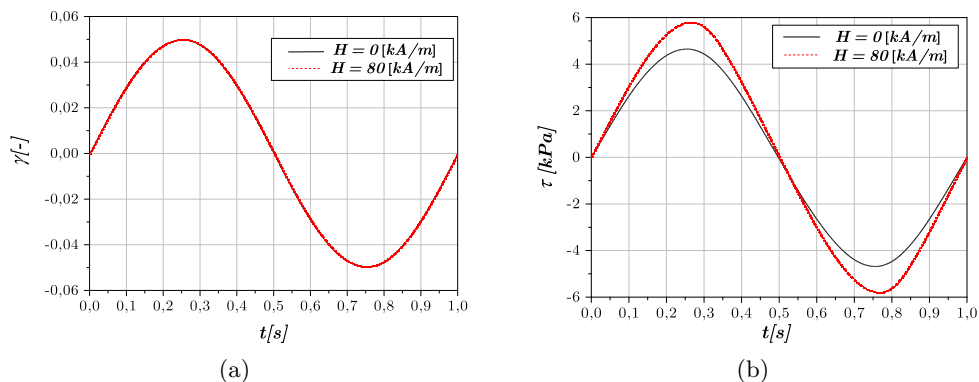
Obserwacje efektu magnetoreologicznego przeprowadzono w warunkach wymuszania mechanicznego sygnałem odkształcenia. Do badania przewidziano dwa rodzaje sygnału wymuszającego o kształcie zbliżonym do prostokąta oraz sinuso-

idealnym. W trakcie eksperymentu rejestrowano wartości przemieszczenia i siły w funkcji czasu, co zostało przedstawione na rysunkach 2.17 oraz 2.18.



Rys. 2.17. Przebiegi sygnałów: odkształcenia postaciowego (γ) i naprężenia ścinającego (τ) w MRC, przy braku oraz w trakcie stymulacji kompozytu polem magnetycznym. Przypadek prostokątnego sygnału wymuszającego. Próbka DB 1 [20]

Można na nich zauważyć, iż charakter sygnału ma wpływ na rodzaj przebiegu zmian naprężenia ścinającego oraz kąta odkształcenia postaciowego w trakcie cyklu ścinania. W przypadku naprężenia wyraźnie widoczny jest wpływ stymulacji polem magnetycznym. Skutkuje on wzrostem amplitudy naprężenia o około 25% (sygnał sinusoidalny) oraz o 20% (sygnał prostokątny) podczas oddziaływania polem



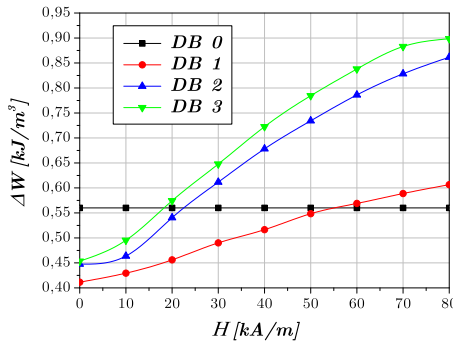
Rys. 2.18. Przebiegi zmian odkształcenia postaciowego (γ) i naprężenia ścinającego (τ) powstałego w kompozycie magnetoreologicznym. Przypadek sinusoidalnego sygnału wymuszającego. Próbka DB 1 [20]

o największej przewidzianej wartości natężenia ($H = 80 \text{ kA/m}$), w porównaniu do wyników przy braku pola.

Na szczególną uwagę zasługuje zachowanie materiału kompozytowego w reakcji na wymuszanie sygnałem prostokątnym. Na wykresie 2.17b zauważyć można charakterystyczne piki przedstawiające maksymalne naprężenia materiałowe. Po osiągnięciu τ_{\max} jego wartość zaczyna stopniowo maleć do chwili zmiany kierunku odkształcania, co wiązać się może ze zjawiskiem relaksacji materiału. Zauważone zjawisko nie zostało zarejestrowane w sinusoidalnym sygnale wymuszenia. Na podstawie tego wnioskuje się o istotnym wpływie prędkości odkształcania MRC na wielkość jego wewnętrznych naprężeń.

2.4.6. Wpływ pola magnetycznego oraz zawartości MRF

Wyniki zaprezentowane na rysunku 2.19 potwierdzają wpływ zawartości cieczy aktywnej magnetycznie na możliwość rozpraszania energii przez MRC. Stwierdzono, iż wzrost wielkości wypełnienia matrycy wiązał się z powiększaniem pól pętli histerezy ΔW dla kolejnych próbek. W przypadku materiałów DB 1, DB 2 i DB 3 zauważono systematyczny wzrost pętli w trakcie zwiększania natężenia pola magnetycznego, jednak w zakresie H 60–80 kA/m obserwowano stopniowe hamowanie tempa wspomnianego przyrostu. Zauważone zjawisko oznaczać może zbliżanie się do maksymalnego nasycenia magnetycznego materiału.

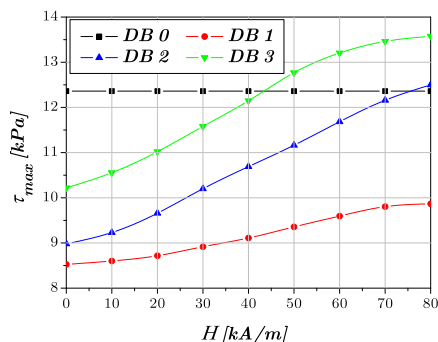


Rys. 2.19. Zależność powierzchni pętli histerezy ΔW od wartości pola magnetycznego. Przebiegi dla trzech próbek o różnej zawartości cieczy magnetoreologicznej oraz próbki zerowej DB 0 [25]

Analiza zależności $\Delta W(H)$ wykazała, iż są określone warunki (wartość natężenia pola magnetycznego, ilość cieczy wewnątrz matrycy, częstotliwość oraz wielkość odkształcania), w których pola pętli histerezy czystej gąbki poliuretanowej jest większa niż kompozytu magnetoreologicznego. Zauważyć to można na rysunku 2.19, jako wartości pól pętli znajdującej się pod czarną linią reprezentującą wyniki dla

próbki DB 0. Potwierdzono w ten sposób możliwość sterowania właściwościami tłumiącymi kompozytu zarówno „w górę”, jak i „w dół” w stosunku do wartości tzw. „zerowej”, czyli dla matrycy nienasyconej. Fakt ten może zostać efektywnie wykorzystany w różnego typu zastosowaniach technicznych.

Analizie poddano także maksymalne naprężenie, jakie uzyskano w jednym cyklu dla danego typu kompozytu podczas stymulacji polem magnetycznym. Zestawienie wyników pokazano na rysunku 2.20.



Rys. 2.20. Naprężenie maksymalne τ_{\max} w zależności od natężenia pola magnetycznego: $\gamma_a = 0,1; f = 1 \text{ Hz}$ [20]

Wyraźnie widoczny jest przyrost τ_{\max} jako efekt wzrostu natężenia pola magnetycznego. Świadczy to o zmianie właściwości materiału, czyli jego usztywnieniu. Zmiany maksymalnego naprężenia w funkcji natężenia pola magnetycznego mają charakter zbliżony do liniowego, w szerokim zakresie zmian natężenia.

Uzyskane rezultaty ułatwiły podjęcie prób aplikacji kompozytu magnetoreologicznego w wybranej konstrukcji mechanicznej, co było przedmiotem dalszych badań.

2.4.7. Określenie wpływu częstotliwości odkształcania MRC

Głównym celem opisanych dalej badań było oszacowanie wpływu częstotliwości odkształcania na zachowanie się badanych kompozytów. Należy podkreślić, iż w trakcie uprzednio prowadzonych testów próbki były poddawane odkształcaniu dla jednej, stałej częstotliwości ($f = 1 \text{ Hz}$). Rezultaty tych badań zaprezentowano wcześniej, gdzie przebiegi czasowe sygnałów siły, a po przeskalowaniu naprężenia, były zależne od wartości natężenia pola magnetycznego (testy przeprowadzono dla wymuszeń o przebiegu sinusoidalnym oraz prostokątnym).

Kompozyt magnetoreologiczny jest materiałem, w którym, jak podaje literatura przedmiotu – zazwyczaj silnie obserwowalne są efekty tzw. czasowe. W odróżnieniu od materiałów sprężystych (takich jak np. stal) niewielkie zmiany prędkości powodują wówczas znaczące zmiany naprężeń w materiale. Zależność

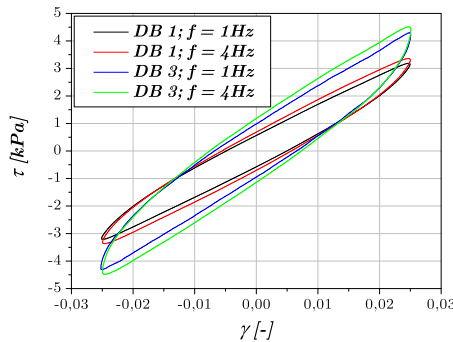
od prędkości odkształcania MRC powoduje, że tłumienie powinno być badane pod kątem wpływu częstotliwości obciążania na ich właściwości mechaniczne i magnetomechaniczne.

Badanie wpływu prędkości odkształcania zrealizowano przez cykliczne obciążanie próbek kompozytowych sygnałem sinusoidalnym o różnych częstotliwościach i stałej amplitudzie ($\gamma_a = 0,025$), umożliwiło to zmianę prędkości, z jaką występowały odkształcenia w kompozycie. Zaplanowany eksperyment został przeprowadzony zgodnie z programem zawartym w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Program badania kompozytów magnetoreologicznych

Numer testu		I	II	III	IV
Częstotliwość wymuszenia	Hz	1	2,5	4	6
Natężenie pola magnetycznego	kA/m	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80			
Amplituda odkształcenia	–	0,025			

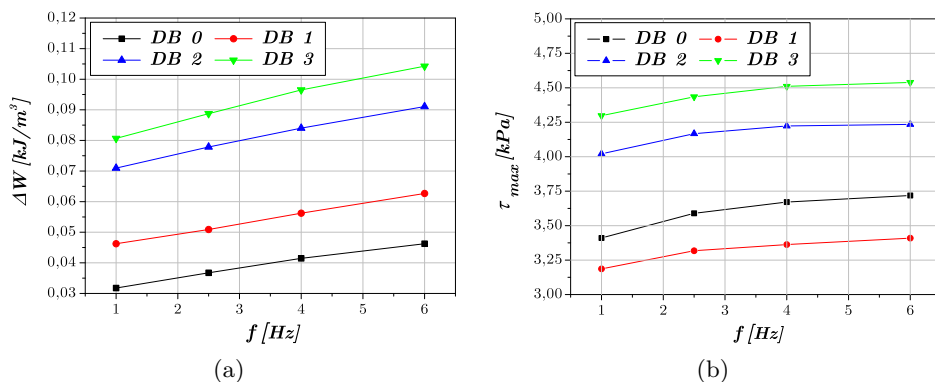
Rezultaty wykonanych badań przedstawiono w formie pętli histerezy w układzie naprężenie–odkształcenie $\tau(\gamma)$. Ponieważ liczba uzyskanych wyników badań jest bardzo duża, dalej przedstawiono wyłącznie przykładowe pętle dla dwóch materiałów. Na rysunku 2.21 zaprezentowano wpływ częstotliwości dla materiałów DB 1 i DB 3. Widoczne są wyraźnie zmiany kształtu i położenia pętli świadczące o zmianach zachodzących w materiale pod wpływem prędkości odkształcania zarówno dla przypadku braku pola magnetycznego, jak i dla maksymalnej stosowanej wartości jego natężenia.



Rys. 2.21. Pętle histerezy dla próbki DB 1 i DB 3.

Częstotliwość odkształcania $f_1 = 1$ Hz oraz $f_2 = 4$ Hz;
amplituda odkształcenia $\gamma_a = 0,025$; natężenie pola magnetycznego $H = 50$ kA/m [20]

Analizując otrzymane dane pomiarowe dla badań wykonanych zgodnie z tabelą 2.7, stwierdzono, że zmiana częstotliwości sygnału wymuszającego powodowała zmianę kształtu pętli histerezy i zwiększenie amplitudy naprężeń w materiale.



Rys. 2.22. Wykresy zmian: a) wartość pól powierzchni pętli histerezy; b) naprężeń maksymalnych, w funkcji częstotliwości odkształcania kompozytów. Przebiegi dla trzech próbek o różnej zawartości MRF oraz próbki zerowej DB 0.

$$\gamma_a = 0,025; H = 50 \text{ kA/m [20]}$$

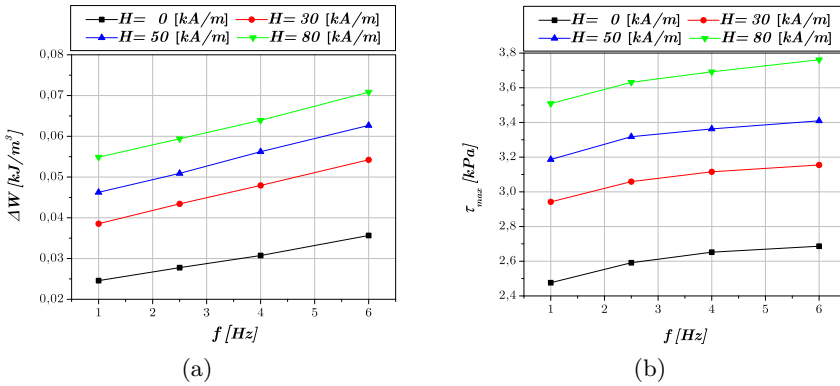
Ponadto, po wyznaczeniu wartości liczbowych dla pętli (pomiar pól powierzchni pętli oraz amplitudy naprężenia) i porównaniu wyników stwierdzono zwiększenie obu parametrów dla większych częstotliwości odkształcania MRC. Jednocześnie zauważono, że w przedziale 1–6 Hz wspomniany przyrost wykazywał charakter liniowy. Wyniki badań dla całej gamy badanych materiałów i stałej wartości pola magnetycznego ($H = 50 \text{ kA/m}$) pokazano na rysunkach 2.22a i 2.22b.

W kolejnym badaniu poddano ocenie wpływ pola magnetycznego na zmiany pól pętli i amplitud naprężenia dla różnych częstotliwości. Charakter zmian był podobny dla wszystkich materiałów. Na rysunku 2.23 zaprezentowano wyniki dla materiału DB 1. Analogicznie, do przypadku opisanego wcześniej, zwiększenie częstotliwości wymuszenia skutkowało większymi wartościami maksymalnych naprężeń w badanym materiale z zachowaniem stałego natężenia pola magnetycznego. Należy podkreślić, że zależność amplitudy naprężenia nie jest funkcją liniową (co występuje w odniesieniu do pola pętli histerezy).

2.4.8. Wpływ wielkości odkształcenia postaciowego (γ)

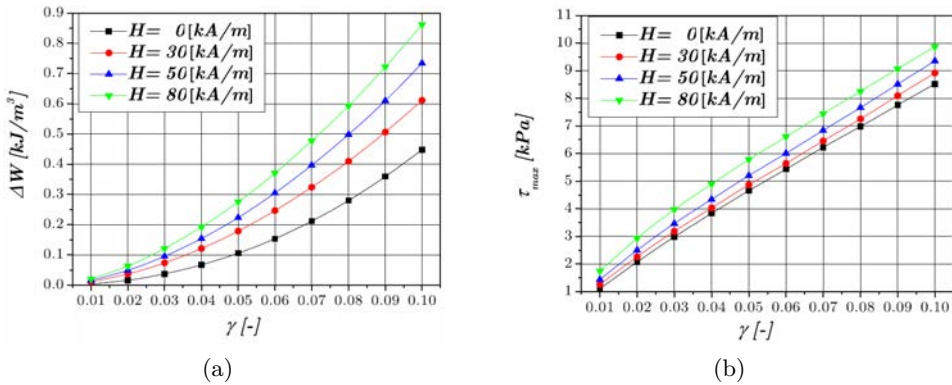
Za kolejny punkt rozważań obrano wpływ wartości odkształcenia postaciowego kompozytu. W tym celu wykonano wiele pomiarów ze zmienną wartością amplitudy odkształcenia. Przykładowy zbiór pętli histerezy, dla różnych wartości amplitudy odkształcenia postaciowego, przedstawiono na rysunku 2.15.

Na podstawie otrzymanych danych stwierdzono, że wraz ze wzrostem oddziałującego pola magnetycznego zwiększały się pola pętli histerezy dla każdej zadanej wartości odkształcenia. Zwiększanie wartości γ_a powodowało przyrost pól



Rys. 2.23. Wpływ częstotliwości odkształcania materiałów MR na pole powierzchni pętli histerezy ΔW oraz na wartość naprężenia maksymalnego τ_{max} . Badanie przeprowadzone dla czterech wartości oddziałującego pola magnetycznego na próbkę DB 1 ($\gamma_a = 0,025$) [20]

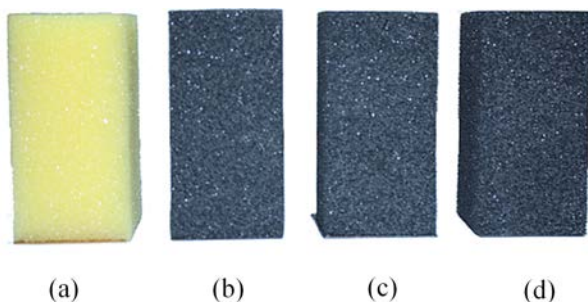
pętli histerezy (rys. 2.24a) oraz zwiększenie naprężeń (rys. 2.24b). Ponadto na podstawie zgromadzonych danych wnioskuje się, iż ΔW zmieniało się liniowo. Badania przeprowadzone dla próbek o większej zawartości cieczy MR (DB 2, DB 3) potwierdziły podobny charakter zauważonego procesu.



Rys. 2.24. Wartość (a) pól pętli histerezy (b) naprężenia maksymalnego, podczas zmiany wielkości odkształcania γ . Próbkę DB 1; $f = 1$ Hz [20]

2.5. Badania kompozytów magnetoreologicznych w warunkach obciążeń udarowych

Po wyznaczeniu podstawowych właściwości magnetomechanicznych MRC, na bazie matrycy porowatej, przystąpiono do badania tychże materiałów w warunkach uderzenia. W tym celu przygotowano serię próbek, które poddane zostały ścisnieniu ze zwiększoną prędkością (uderzeniu). Do badań nad zdolnością do rozpraszania energii uderzenia przewidziano trzy typy kompozytów o różnej zawartości cieczy magnetycznej oraz próbkę referencyjną (bez MRF). Zdjęcia wykonanych próbek zaprezentowano dalej (rys. 2.25).



Rys. 2.25. Próbki materiałowe przygotowane dla próby udarowej:
a) próbka U0; b) próbka U1; c) próbka U2; d) próbka U3 [20]

Pomimo znaczących różnic w wypełnieniu cieczą magnetoreologiczną, próbki nie różnią się wyglądem zewnętrznym. Oznaczenia poszczególnych próbek do testów uderzeniowych zostały przedstawione w tabeli 2.8. Należy zaznaczyć, że udziały procentowe zawartości cieczy wewnątrz wytworzonych MRC, odpowiadały zawartościom zastosowanym podczas próby cyklicznego ścinania. Próbka U0 stanowiła punkt odniesienia dla pozostałych materiałów.

Tabela 2.8. Próbki do badania w warunkach uderzenia

Oznaczenie próbki	Zawartość cieczy MR (%)	Cykliczne ścinanie
U0	0	DB0
U1	10	DB1
U2	15	DB2
U3	25	DB3

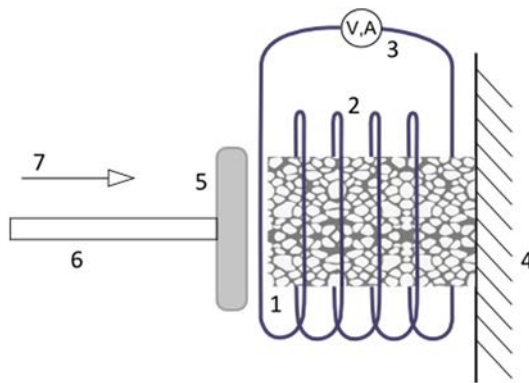
Pierwszym etapem wytwarzania próbek było wycięcie prostokątnych kawałków poliuretanowej matrycy o wymiarach $40 \times 40 \times 80$ mm. Trzy z nich zostały następnie nasączone określoną ilością cieczy MR. Wprowadzanie MRF do porowatej matrycy wykonano metodą iniekcji. W ten sposób możliwe było

„umieszczenie” zdefiniowanej ilości cieczy w strukturze nośnej oraz jej równomierne rozprowadzenie w całej objętości. Ilość wprowadzonej cieczy mierzono za pomocą wagi. Ostatnią czynnością była instalacja płytki z laminatu do jednego z końców badanego materiału. Komponent ten, niemający właściwości magnetycznych, umożliwiał stabilne zamocowanie próbki wewnątrz źródła pola magnetycznego (cewka).

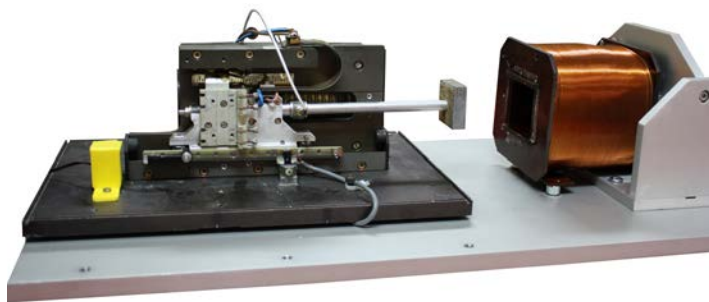
Przebadanie kompozytów magnetoreologicznych, pod kątem zdolności do dyssypacji energii uderzenia, wymagało od stanowiska pomiarowego dostarczania informacji zarówno o parametrach mechanicznych (przeszyczenie, siła), jak i magnetycznych. Stanowisko takie powinno składać się z:

- **części elektromagnetycznej** – źródła pola magnetycznego z możliwością modyfikacji wartości natężenia,
- **części mechanicznej** – zapewniającej kontrolowane uderzenie w czasie,
- **części pomiarowej** – umożliwiającej zbieranie i przetwarzanie informacji o mierzonych wartościach.

Po zapoznaniu się z wymaganiami eksperymentu wykonano stanowisko pomiarowe. Ogólny jego schemat pokazany został na rysunku 2.26, a zdjęcie na rysunku 2.27. Głównym elementem stanowiska jest bijak, który uderza w próbkę umieszczoną w cewce (źródło pola magnetycznego). Zmiany zachodzące podczas ściskania kompozytów są rejestrowane przez czujniki przeszycczenia i siły.



Rys. 2.26. Schemat stanowiska do badania MRC na uderzenie: 1 – próbka kompozytu, 2 – cewka magnetyczna, 3 – źródło zasilania, 4 – nieruchoma podstawa, 5 – tłok bijaka (element uderzający), 6 – prowadnica bijaka, źródło przeszycczenia i siły, 7 – pomiar przeszycczenia, prędkości oraz siły zagłębienia się bijaka w materiał kompozytu



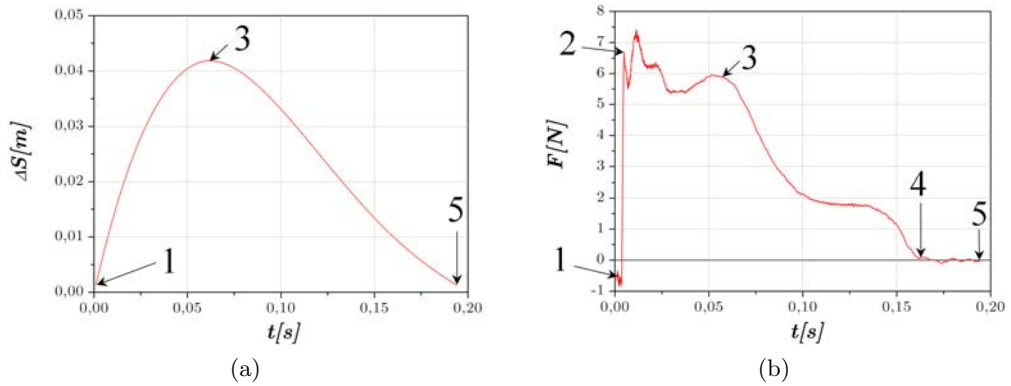
Rys. 2.27. Stanowisko pomiarowe do prowadzenia badań uderowych kompozytów magneto-reologicznych. Widok ogólny [23]

2.5.1. Wyniki badania kompozytów

W trakcie eksperymentu rejestrowano przemieszczenie elementu bijącego oraz siłę reakcji materiału na uderzenie. Zadaniem badanego kompozytu było rozproszenie dostarczonej energii kinetycznej, która definiowana była przez masę oraz prędkość bijaka. Ponieważ wytworzony kompozyt ma właściwości zależne od pola magnetycznego; spodziewano się zaobserwować wpływ natężenia tegoż pola na efektywność pochłaniania energii.

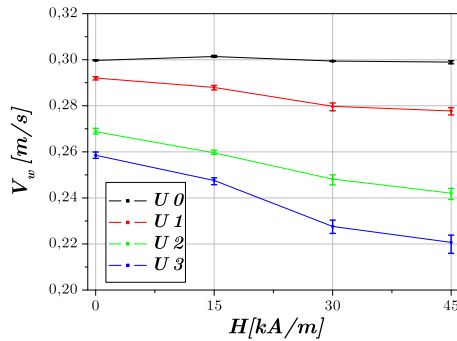
Przykładowe przebiegi siły i przemieszczenia rejestrowane w trakcie uderzenia bijaka w materiał kompozytu zostały zaprezentowane na rysunku 2.28. Zaznaczono na nich punkty charakterystyczne. Proces uderzania w badany materiał można podzielić na kilka etapów. Po otrzymaniu przez jednostkę sterującą sygnału do rozpoczęcia badania następowało wyzwolenie elementu uderzającego. Był on rozpędzany do zadanej prędkości na zdefiniowanym uprzednio odcinku drogi, po której przekroczeniu zasilanie silnika liniowego było odłączane i rozpoczynany był proces zbierania danych pomiarowych (1). Od tej pory bijak przemieszczał się w sposób swobodny. W chwili kontaktu urządzenia z próbką rejestrowano skok wartości siły na siłomierzu (2). Moment ten rozpoczynał okres pracy badanego materiału, którego reakcja stopniowo wyhamowywała rozpędzony tłok. W chwili osiągnięcia przez tłok prędkości równej zero, następowała zmiana kierunku jego ruchu (3) i rozpoczynał się etap drogi powrotnej. Punkt (4) przedstawia moment wyjścia bijaka z materiału, natomiast punkt (5) chwilę zatrzymania elementu uderzającego i zakończenie pomiaru.

Opisanemu badaniu poddano wszystkie typy wytworzonych kompozytów magneto-reologicznych, poddając ocenie możliwość ich aplikacji jako aktywnych elementów pochłaniających energię. Przyjęto przy tym, iż jednym z głównych parametrów świadczących o zdolności materiału do dyssypacji energii uderzenia był spadek prędkości bijaka po wyjściu (odbiciu) z badanej próbki. Wynikało to



Rys. 2.28. Przemieszczenie ΔS elementu uderzającego (bijaka) oraz zmiana wartości siły reakcji kompozytu F zarejestrowana w czasie. Wykres dla próbki $U3$ [23]

z faktu, iż wielkość ta związana jest bezpośrednio z różnicą energii kinetycznych przed i po kontakcie z obiektem tłumiącym. Za cel postawiono sobie sprawdzenie, jaki wpływ na proces rozpraszania ma pole magnetyczne oddziałujące na materiał z zewnątrz. Porównanie badanych materiałów było możliwe dzięki zapewnieniu jednakowej prędkości wejściowej bijaka V_0 dla każdej próby. Wykres na rysunku 2.29 przedstawia porównanie prędkości wyjściowych V_w elementu uderzającego z próbek.



Rys. 2.29. Prędkość bijaka na wyjściu z materiału jako funkcja natężenia pola magnetycznego oddziałującego na materiał [23]

Na podstawie przyjętego założenia możliwe było wskazanie materiału o największym tłumieniu jako tego, dla którego V_w było najmniejsze. Stwierdzono, iż wartość prędkości wyjściowej dla próbki $U0$ (nie zawierającej MRF) była niezależna od natężenia pola magnetycznego. Oznacza to, że zgodnie z przewidywaniami nie zarejestrowano dla niej efektu tłumienia magnetoreologicznego. W przypadku

każdej próbki MRC obserwowano stopniowe zmniejszanie V_w wraz ze zwiększeniem się pola magnetycznego. Najniższą V_w zanotowano dla próbki U3 podczas jej stymulacji największą przewidzianą wielkością H . Po przeliczeniu wartości liczbowych stwierdzono, iż w jej przypadku prędkość wyjścia została zmniejszona o około 28% w porównaniu z wynikiem dla czystej matrycy poliuretanowej.

Otrzymane rezultaty umożliwiają jednoznaczne stwierdzenie, iż wykonane kompozyty magnetoreologiczne mogą być wykorzystane do pochłaniania energii w warunkach obciążenia udarowego. Potwierdzenie stanowią ilościowe informacje o wpływie udziału procentowego MRF w kompozycie i wartości natężenia pola magnetycznego na możliwość dyssypacji energii przez MRC. Ogólnie materiały tej klasy mogą z powodzeniem znaleźć zastosowanie jako elementy wykonawcze w adaptacyjnych systemach tłumienia energii uderzeń. Aktualnie prowadzone są prace nad stymulowanym magnetycznie tłumikiem do konstrukcji mechanicznych opartym na MRC.

2.6. Podsumowanie

2.6.1. Wnioski i uwagi końcowe

Przytoczono główne rezultaty oraz zestawiono wnioski i uwagi.

- Sporządzono ciecze magnetoreologiczne z uwzględnieniem różnych dodatków poprawiających ich właściwości. Ciecze poddano badaniom procesu sedymentacji. Zaprojektowano i wykonano w tym celu oryginalne stanowisko badawcze.
- Wytworzono kompozyty magnetoreologiczne, wykorzystując MRF o dobranym uprzednio składzie. W matrycy zastosowano porowaty materiał poliuretanowy.
- Wykonano stanowisko pomiarowe do prowadzenia testów na MRC w warunkach cyklicznego ścinania, z jednoczesnym zadawaniem obciążeń magnetycznych i mechanicznych.
- Warunki prowadzenia eksperymentu zostały dobrane w celu wyznaczenia tłumienia materiału, na które wpływały zarówno parametry mechaniczne, jak i związane z polem magnetycznym.
- Kompozyty poddano badaniom wykazującym ich reakcję na zewnętrzne pole magnetyczne. Za sposób obciążania przyjęto jednoosiowy stan zbliżony do czystego ścinania, a pole magnetyczne przykładano w kierunku prostopadłym do obciążenia. Wyraźnie zaobserwowano zmiany naprężenia w badanych kompozytach w następstwie przyłożenia zewnętrznego pola. Wyniki badań wykazały także zwiększenie pola pętli histerezy (w układzie naprężenie–odkształcenie), co świadczy o przyroście możliwości pochłaniania energii przez wykonane kom-

pozyty MR. Potwierdzono w ten sposób zależność tłumienia mechanicznego materiału od wartości oddziałującego na niego pola magnetycznego.

- Przeprowadzono obserwacje efektu magnetoreologicznego w materiałach dla różnych rodzajów sygnałów odkształcenia (prostokątnego i sinusoidalnego). Na podstawie uzyskanych rezultatów zauważono, że w przypadku sygnału prostokątnego w materiale może zachodzić zjawisko relaksacji, czego nie zauważono w przypadku sygnału sinusoidalnego. Obserwacja ta ilustruje rolę wpływu prędkości odkształcenia na wielkość naprężeń wewnętrznych.
- Określono wpływ częstotliwości odkształcania na właściwości materiału. Zauważono, iż jej modyfikacja skutkuje zmianą kształtu pętli histerezy MRC oraz naprężeń w materiale. Obie wielkości zwiększały się wraz z przyrostem częstotliwości odkształcania kompozytu. Jednocześnie zauważono, że w przedziale 1–6 Hz przyrost ΔW wykazywał charakter liniowy, z zachowaniem stałej wartości pola magnetycznego. Na podstawie uzyskanych wyników wysunięto wniosek, że zależność amplitudy naprężenia nie jest funkcją liniową.
- Przeprowadzone badania wykazały, że wraz ze zwiększonym oddziaływaniem pola magnetycznego wzrastały pola pętli histerezy dla każdej zadanej wartości odkształcenia.
- Zwiększanie wartości odkształcenia postaciowego (γ) powodowało przyrost pól pętli histerezy oraz zwiększenie naprężeń.
- Skonstruowano stanowisko pomiarowe do oceny wytworzonych kompozytów magnetoreologicznych pod kątem rozpraszania energii udaru.
- Oszacowano możliwości wytworzonego materiału kompozytowego do pochłaniania energii mechanicznej, dostarczanej do układu w postaci impulsu (uderzenia). Wykonano w tym celu trzy próbki kompozytów o różnej zawartości cieczy magnetycznej oraz jedną próbkę tzw. czystą. Wykazano, iż wielkość pochłoniętej energii zależna jest od zewnętrznego pola magnetycznego oraz udziału MRE w kompozycie, co potwierdziło, iż cel zadania został osiągnięty.

2.6.2. Sugestie dalszych prac

Przewiduje się, że główne kierunki przyszłych badań w zakresie MRC będą następujące:

- Udoskonalenie metody wytwarzania „mokrych”, porowatych kompozytów magnetoreologicznych nasyconych MRF. Planowane jest wytworzenie nowych typów mikro- i nanoproszków ferromagnetycznych jako fazy aktywnej magnetycznie ferrocieczy. W tym celu, przewiduje się wykorzystanie technologii *sol-gel*.
- Badania nad określeniem wytrzymałości zmęczeniowej kompozytów magnetoreologicznych oraz procesu starzenia się ich matryc i MRF.

- Działania mające na celu uproszczenie i zwiększenie efektywności działania źródła pola magnetycznego. Szczególnie obiecujące wydają się systemy dyskretnej kontroli pola, które będą przedmiotem badań.
- Rozwój modeli konstytutywnych MRC i sposobów ich identyfikacji.
- Przewiduje się, że docelowym zastosowaniem MRC będą tanie, półaktywne tłumiki o szerokim potencjale aplikacyjnym. Za główne obszary ich zastosowania uznaje się: transport, budynki i struktury wytrzymałe na obciążenia sejsmiczne, duże obiekty przemysłowe oraz urządzenia domowe.

Bibliografia

- [1] Carlson J.D., Jolly M.R., *MR fluid, foam and elastomer devices*, Mechatronics, 10, 2000, 555–569.
- [2] Malcolm J.W., Fuchs A., Gordaninejad F., *Development and characterization of magnetorheological polymer gels*, Journal of Applied Polymer Science, 84, 14, 2002, 2733–2742.
- [3] Rankin P.J., Horvath A.T., Klingenberg D.J., *Magnetorheology in viscoplastic media*, Rheology Acta, 38, 1999, 417–477.
- [4] Deshmukh S.S., McKinley G.H., *Adaptive energy-absorbing materials using field responsive fluid-impregnated cellular solids*, Smart Materials and Structures, 16, 1, 2007, 106.
- [5] Purizhansky E.M., *Magnetically responsive foam and manufacturing process therefor*, US Patent 6,673,258 B2, 2004.
- [6] Carlson J.D., Chrzan M., *MR fluid sponge devices and their use in vibration control of washing machines*, [w:] *Proceedings of the 8th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, SPIE, Newport Beach, CA, 2001, 370–378.
- [7] Lewandowski D., *Właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2005.
- [8] Carlson J.D., *What makes a good MR fluid?*, [w:] *8th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions*, Nice 2001.
- [9] Alteheld A., Duwenhorst J., Egbers G., Gabriel C., Prissok F., Rüllmann M., Schütte M., *Compact and foamed magnetorheological polyurethanes*, Dresden 2008.
- [10] Carlson J.D., Jolly M.R., *MR fluid, foam and elastomer devices*, Mechatronics, 10, 2000, 555–569.
- [11] Carlson J.D., *Low-cost mr fluid sponge devices*, [w:] *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*, R. Tao (red.), World Scientific 1999, 621–628.
- [12] Deshmukh S.S., McKinley G.H., *Fluid-filled cellular solids for controlled*, US Patent 0173422 A1 2004.
- [13] Deshmukh S.S., *Development, characterization and applications of magnetorheological fluid based “SMART” materials on the macro-to-micro scale*, rozprawa doktorska, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering 2007.

- [14] Glaser R., Caccese V., Shahinpoor M., *Development of magneto-rheological fluid composites with rigidification characteristics*, Smart Materials and Structures, 20, 2011.
- [15] Liu X.H., Fu Z.M., Yao X.Y., Li F., *Performance of magnetorheological fluids flowing through metal foams*, Measurement science review, 11, 5, 2011, 144–148.
- [16] Mistik S.I., Shah T., Hadimani R.L., Siores E., *Compression and thermal conductivity characteristics of magnetorheological fluid-spacer fabric smart structures*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 23(11), 2012, 1277–1283.
- [17] Bodniewicz D., Lewandowski D., Kaleta J., *Cykliczne właściwości kompozytów magneto-reologicznych*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania: materiały XXIII Symposium Zmęczenie i Mechanika Pękania*, J. Sempruch, D. Skibicki (red.), Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz–Pieczyńska 2010, 17–18.
- [18] Barber D.E., Nixon D.A., *Non-settling glycol based magnetorheological fluids*, US Patent 8,062,541, 2011.
- [19] Grasshoff H.D., Pirck D., *Liquid composition and its use as magneto-rheological liquid*, US Patent 6,245,253, 2001.
- [20] Bodniewicz D., *Wykorzystanie kompozytu magneto-reologicznego do tłumienia energii uderzenia*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2010.
- [21] Bednarek S., *Ciecze ferromagnetyczne – materiały o niezwykłych właściwościach i ich zastosowania*, Foton, 104, 2009, 22–29.
- [22] *Dow corning high vacuum grease – 976V – SPI supplies*, <http://www.2spi.com/catalog/vac/dow.php>.
- [23] Bodniewicz D., Lewandowski D., Kaleta J., *Damping of impact forces by cellular composites filled with magnetorheological fluids*, [w:] *5th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART'11*, ECCOMS, Universität des Saarlandes, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken 2011, 1–10.
- [24] Kaleta J., Lewandowski D., *Inelastic properties of magnetorheological composites: I. Fabrication, experimental tests, cyclic shear properties*, Smart Materials and Structures, 16, 5, 2007, 1948–1953.
- [25] Bodniewicz D., Lewandowski D., Kaleta J., *Cyclic properties of magnetorheological composites*, [w:] *28th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Budapest Scientific Society for Mechanical Engineering, Siófok, Węgry, 2011, 271–272.

Rozdział 3. Terfenol-D jako materiał o gigantycznej magnetostrykcji

W rozdziale opisano materiały o tzw. gigantycznej magnetostrykcji (GMM). Wykazano, iż kluczowa rola GMM w wielu obszarach wynika z ich możliwości przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną (działanie typu akuator) oraz mechanicznej w magnetyczną (działanie typu sensor), o dużym współczynniku sprawności. Materiały te odgrywają również kluczową rolę w zakresie odzysku energii (ang.: *Energy Harvesting* – EH) z drgań.

Przedmiotem głównego zainteresowania było tłumienie w wybranym materiale wykazującym gigantyczną magnetostrykcję, w warunkach obciążenia mechanicznego o charakterze statycznym i cyklicznym. Podjęto próbę opisu zjawiska z wykorzystaniem energii jako wielkości kryterialnej. Obiektem badań był Terfenol-D.

Badania obejmowały różnorodne aspekty. Wyznaczono właściwości Terfenolu-D. Określono skład chemiczny i zbadano mikrostrukturę materiału. Określono magnetyzację, krzywą namagnesowania, magnetyzację nasycenia, histerezę magnetyczną, podatność, przenikalność magnetyczną, częstotliwość rezonansową, a także określono dekrement tłumienia.

Stworzono stanowiska badawcze w postaci magnetostrykcyjnych wzbudników laboratoryjnych, na których zbadano histerezę magnetyczną, prądy wirowe i efekty naskórkowe oraz straty mechaniczne. Wykonano układ kontrolno-pomiarowy, który zapewniał nastawę parametrów mechanicznych i magnetycznych, miał system akwizycji obu typów sygnałów pomiarowych oraz zapewniał możliwość ich przetwarzania w celu wyznaczania energii dyssypacji i krzyżowych charakterystyk magnetomechanicznych.

Zbadano magnetostrykcję w warunkach wymuszenia statycznego i cyklicznego. Określono wpływ naprężenia wstępnego na magnetostrykcję. Wykazano istotny wpływ prądów wirowych w zakresie wyższych częstotliwości (już powyżej 50 Hz).

Zbadano też odwrotną magnetostrykcję (efekt Villariego) w warunkach quasi-statycznego obciążenia ściskającego.

Stworzono też własny model wzbudnika magnetostrykcyjnego, uwzględniający wpływ prądów wirowych. Przeprowadzono testową i zasadniczą serię badań, których wyniki posłużyły do identyfikacji modeli tłumienia oraz wpływu prądów wirowych na zjawiska tzw. gigantycznej magnetostrykcji.

Zaproponowano też przykłady aplikacji Terfenolu-D w budowie tłumików i aktuatorów oraz wykazano przydatność tych obiektów w konstrukcjach mechanicznych.

W końcowej części pracy wskazano kierunki dalszych badań w zakresie materiałów magnetostrykcyjnych oraz potencjalne nowe aplikacje, głównie w zakresie konstrukcji mechanicznych.

3.1. Wprowadzenie

Znaczącą grupę magnetycznych materiałów Smart (ang.: *Smart Magnetic Materials* – SMM) stanowią materiały o tzw. gigantycznej magnetostrykcji (ang.: *Giant Magnetostrictive Materials* – GMM). Ich kluczowa rola w wielu obszarach wynika z możliwości przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną (działanie typu aktuator) oraz mechanicznej w magnetyczną (działanie typu sensor), o dużym współczynniku sprawności. Umożliwia to różnorodne aplikacje w konstrukcjach lotniczych, samochodowych, okrętowych, budowlanych oraz efektywne zastosowania w medycynie, przemyśle wydobywczym, aparaturze akustycznej i wielu innych. GMM mogą być wykorzystane jako aktywne tłumiki, które nie pochłaniają energii (jak materiały magnetoreologiczne), gdyż można za ich pomocą wytworzyć w pętli „kontrdrżanie” wygaszające emisję źródła. Materiały te odgrywają również kluczową rolę w zakresie odzysku energii (ang.: *Energy Harvesting* – EH) z drgań, co omówiono w rozdziale 8.

Zagadnienie GMM, głównie w odniesieniu do Terfenolu-D, podjęto w dalszej części monografii.

W materiale typu GMM występują zjawiska krzyżowe o charakterze magneto-mechanicznym. Jednym z nich jest magnetostrykcja (tzw. efekt Joule'a), czyli zjawisko fizyczne, które polega na liniowym i/lub objętościowym deformowaniu się ciała na skutek zmiany jego magnetyzacji. Głównym czynnikiem, wpływającym na zmianę magnetyzacji, jest zmiana zewnętrznego pola magnetycznego. Silny wpływ na magnetyzację ma także temperatura otoczenia oraz naprężenia wewnętrzne występujące w ferromagnetyku. Zjawisko magnetostrykcji, podobnie jak magnetyzacja materiału, charakteryzuje się histerezą magnetomechaniczną. Pod względem aplikacyjnym jej minimalizacja stwarza realne szanse na uzyskanie dużej sprawności przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną. Następnym

odkształcania ferromagnetyków jest z kolei odwrotna magnetostrykcja zwana też efektem Villariego.

Niezbędnym warunkiem efektywnych aplikacji GMM w układach adaptacyjnych jest identyfikacja zachowania się materiałów w warunkach występowania różnorodnych pól fizycznych. Dlatego kluczowe znaczenie ma tworzenie modeli zjawiska gigantycznej magnetostrykcji oraz ich identyfikacja. Jest to również część niniejszej pracy. W literaturze przedmiotu przyjęto, że w przypadku materiałów magnetostrykcyjnych, w warunkach obciążeń quasi-statycznych polem magnetycznym, mamy do czynienia z polem histerezy magnetomechanicznej. Jeżeli ten sam materiał zostanie poddany przemagnesowaniu w zmiennym polu magnetycznym, wraz ze zwiększeniem się częstotliwości, zmienia się pole i kształt pętli histerezy. Zmiana pętli histerezy jest następstwem wystąpienia prądów wirowych. Konieczność uwzględnienia zjawisk mechanicznych, magnetycznych, elektrycznych i cieplnych powoduje, iż szczególnego znaczenia nabierają modele energetyczne. Energia bowiem – jako wielkość addytywna – najlepiej uwzględni wpływ poszczególnych zjawisk.

3.1.1. Właściwości stopów (Dy-Tb)-Fe₂.

Analiza literatury przedmiotu

Literatura dotycząca właściwości GMM, w tym głównie Terfenolu-D jest obszerna. Szczegółowego jej przeglądu dokonano również w pracy [1]. W roku 1965 w Naval Ordnance Laboratory (NOL) i Ames Laboratory odkryto, że pierwiastki ziem rzadkich, jak Tb i Dy, w niskich temperaturach charakteryzują się dużo większą magnetostrycją (tzw. gigantyczną magnetostrycją) niż np. nikiel. Międzymetaliczna faza Lavesa Tb_xDy_{1-x}Fe_y charakteryzuje się z kolei gigantyczną magnetostrycją w temperaturze pokojowej. W roku 1986 firma ETREMA Products Inc. zaczęła produkować komercyjnie najpowszechniej dziś stosowany materiał o wzorze stechiometrycznym zbliżonym do Tb_{0,27-0,3}Dy_{0,73-0,7}Fe_{1,9-1,95} (Terfenol-D). Materiał ten był obiektem wielu prac. Badano wpływ składu chemicznego, struktury krystalograficznej [2–4] oraz pola magnetycznego na ułożenie domen [5–7], a także rolę defektów sieci krystalicznej [8–11]. Wyniki badań, dotyczących z kolei rozkładu magnetyzacji w materiałach typu (Tb-Dy)-Fe₂, można znaleźć w pracach [6–8, 12–19]. Współczynnik magnetostrykcji nasycenia badano w [7, 12, 20], a wpływ temperatury na właściwości stopów (Dy-Tb)-Fe₂ analizowano w [21–24]. Zauważono też wpływ stałego pola magnetycznego [2, 25] oraz zmianę modułu Younga (tzw. efekt ΔE) pod wpływem zmiany zewnętrznego pola magnetycznego [26–29]. Wpływ naprężeń wstępnych rozważano z kolei w [17, 30–32]. Wytrzymałość stopów (Tb-Dy)-Fe₂ na rozciąganie, ściskanie, obciążenia cykliczne i udarowe badano w [29, 33, 34]. Zagadnienia te nie będą tutaj szerzej analizowane.

Zwróćmy natomiast uwagę na inne aspekty. Ze względu na występowanie zjawiska prądów wirowych właściwości magnetomechaniczne stopów (Tb-Dy)-Fe₂ silnie zależą od częstotliwości. Zakłada się, że podstawowy, stosowany zakres częstotliwościowy zmiennego pola magnetycznego ogranicza się do około 1 Hz [35, 36]. Powyżej tej częstotliwości występuje rezonans mechaniczny powodujący nasilenie przyrostu odkształceń pod wpływem przyrostu pola magnetycznego. W celu zmniejszenia wpływu prądów wirowych stosuje się np. laminaty. Kształt krzywych magnetostrykcyjnych zmienia się wraz ze wzrostem częstotliwości oraz amplitudy pola magnetycznego. W zakresie małych amplitud krzywe magnetostrykcyjne dla quasi-statycznych warunków, mają postać zbliżoną do liniowej. Z kolei wraz ze wzrostem amplitudy krzywe magnetostrykcyjne mają charakter nieliniowy. Pojawienie się zmiennego w czasie pola magnetycznego powoduje przejście histerezy o kształcie typu „S” w elipsę. Wzrost częstotliwości powoduje także zmniejszenie odkształceń magnetostrykcyjnych [37, 38], z powodu zwiększającej się bezwładności układu.

Odpowiedni dobór częstotliwości pracy wzbudnika magnetostrykcyjnego umożliwia wykorzystanie zjawiska rezonansu, w celu zwiększenia amplitudy odkształceń. Dzięki pracy w okolicach częstotliwości rezonansowych można, przy tej samej amplitudzie pola magnetycznego, uzyskać kilkakrotne zwiększenie amplitudy odkształceń. Częstotliwość wpływa także, często niekorzystnie, na przesunięcie fazowe między sygnałami pola magnetycznego a odkształceniem magnetosprężystym, co skutkuje zwiększeniem pola pętli histerezy [39].

Niewiele prac poświęcono badaniu dynamicznych właściwości magnetostrykcyjnych stopów (Dy-Tb)-Fe₂. W pracy [40], indukując impuls magnetyczny (trwający 5 μs), określono eksperymentalnie czas odpowiedzi próbki masywnej w postaci pręta średnicy 6 mm na około 1 μs. Autorzy wyznaczyli prędkość fali mechanicznej w materiale magnetostrykcyjnym, wyniosła ona 1700 m/s. Badano także wpływ źródła pola magnetycznego (położenie cewki indukcyjnej) na wartość indukowanych odkształceń. Ułatwiło to na określenie minimalnej odległości cewki od końca próbki na około 4 mm oraz zasięgu odkształceń magnetostrykcyjnych na około 15 mm. Według [41], próbka długości 10 cm wydłuży się o 0,2 mm w ciągu 50 μs.

W pracy [41] badano także zależność magnetyzacji oraz przyłożonych naprężeń od czasu. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w przypadku konstruowania precyzyjnych pozycjonerów oraz czujników. Wykazano niewielki wpływ czasu obciążenia zarówno polem magnetycznym, jak i naprężeniem na wartości zadane. W temperaturze pokojowej stabilizacja magnetyzacji oraz naprężenia następowała po około 600 s (zmiana wartości sygnału około 2–3%).

3.1.2. Zjawisko magnetostrykcji w Terfenolu-D

W materiałach aktywnych (ang.: *Smart Materials*) wykorzystuje się zjawiska fizyczne umożliwiające zamianę energii z jednej formy w drugą, jak np. energii elektrycznej w mechaniczną (w materiałach piezoceramicznych i elektrostrykcyjnych), energii magnetycznej w mechaniczną (w materiałach magnetostrykcyjnych) czy termicznej w mechaniczną (w materiałach z pamięcią kształtu). Niektóre z nich mają także możliwość odwrócenia procesu zamiany energii. W tabeli 3.1 porównano wybrane materiały aktywne [42–44]; właściwości przedstawionych materiałów są wykorzystywane w elementach wykonawczych (ang.: *actuator*) oraz w czujnikach (ang.: *sensor*).

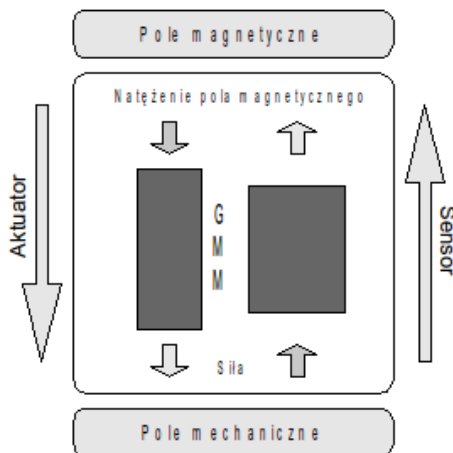
Zjawisko magnetostrykcji i efekt do niej odwrotny (efekt Villariego) są co najmniej od 60 lat wykorzystywane do budowy przetworników. Przyjmuje się, że jeśli energia magnetyczna zamienia się w mechaniczną (rys. 3.1), to mamy do czynienia z elementami wykonawczymi. W przypadku odwrotnym – zamiany energii mechanicznej na magnetyczną – mówi się z kolei o czujnikach [45–47].

Tabela 3.1. Porównanie materiałów aktywnych (ang.: *Smart Materials*) [42–44]

	Piezocera- miczny	Elektro- strykcyjny	Magneto- strykcyjny	Stopy z pamięcią kształtu
Max. odkształcenie [%]	0,13	0,1	0,2–0,6	2–8
Moduł Younga [GPa]	60,6	64,5	29,0	–
Gęstość ¹ [g/cm ³]	7,5	7,8	9,0–9,3	7,1
Gęstość energii aktywującej [J/kg]	6,83	4,13	6,42	252–4032
Współczynnik histerezy [%]	10	<1	2	wysoki
Temperatura pracy [°C]	–20–200	0–40	400	300
Częstotliwość pracy [Hz]	100 k	100 k	30 k	<5

Historia magnetostrykcji sięga 1842 roku, w którym James Joule zaobserwował zmiany wymiarów w próbce niklu pod wpływem pola magnetycznego. Podobne zjawisko zaobserwowano w kobaltcie, żelazie i stopach tych metali. Magnetostrykcja, rozumiana jako odkształcenie pod wpływem pola magnetycznego tych materiałów, sięgała 0,005%. Z powodu tak małych zmian odkształcenia w znanych ówczesnie materiałach zjawisko to nie miało większego zastosowania. Wykorzystano je dopiero podczas II wojny światowej do budowy sonaru.

¹ Użyto jednostek z cytowanych publikacji: 1 g/cm³ = 1000 kg/m³.



Rys. 3.1. Schemat transformacji energii w materiałach magnetostrykcyjnych [45–47]

Tabela 3.2. Właściwości wybranych materiałów magnetostrykcyjnych [48–50]

Material	ρ [g/cm ³] ²	E [GPa]	λ_{\max} [%]	T_{Curie} [K]
Fe	7,86	210	−0,0050	633
Ni	8,9	210	−0,0014	1043
Permalloy (65%Fe, 45%Ni)	–	–	0,0027	713
SmFe ₂	8,53	–	−0,2340	688
Fe ₃ O ₄	–	–	0,0060	858
DyFe ₂	9,28	–	0,0650	635
TbFe ₂ (Terfenol)	9,06	–	0,2630	703
Tb _{0,3} Dy _{0,7} Fe _{1,9} (Terfenol-D)	9,21	29	0,1600–0,2400	653
Tb _{0,6} Dy _{0,4} @ 77K	–	–	0,6300	215
TbZn	–	–	0,4500–0,5500	180
TbDyZn	–	–	0,5000	250

W roku 1965 odkryto w Naval Ordnance Lab i Ames Laboratory [48], że niektóre pierwiastki ziem rzadkich, jak Tb (terb) i Dy (dysproz), w niskich temperaturach charakteryzują się o kilka rzędów większą magnetostrykcją λ niż nikiel (tab. 3.2). Kilka lat później udało się uzyskać związki tych pierwiastków z żelazem, w których zjawisko magnetostrykcji występuje w temperaturze pokojowej. Szeroką paletę tych materiałów, opisywanych ogólnym wzorem chemicznym Tb_xDy_{1-x}Fe_y nazwano „terfenolami”. W roku 1986 firma ETREMA Products Inc. zaczęła produkować komercyjnie najpowszechniej dziś stosowany materiał – Terfenol-D (Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9}).

² Użyto jednostek z cytowanych publikacji: 1 g/cm³ = 1000 kg/m³.

Terfenol-D [51] jest międzymetalicznym stopem pierwiastków ziem rzadkich, terbu i dysprozu oraz żelaza. Jest produkowany w postaci kryształu (metodą Bridgmana i metodą Czochralskiego). Terfenole ułatwiają uzyskanie w zależności od postaci, w której są produkowane i stosowane [52], pozornie przeciwstawnych właściwości magnetomechanicznych:

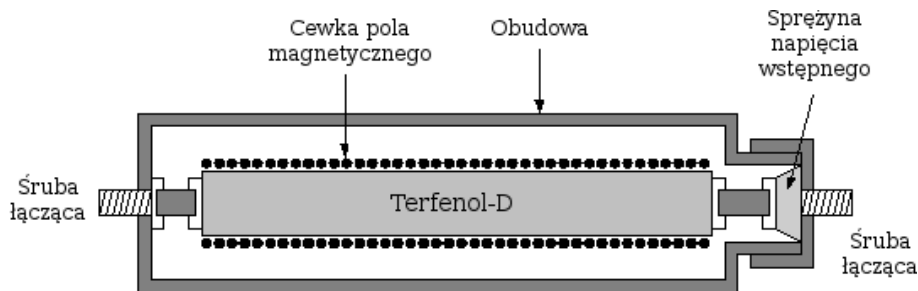
- jako materiały lite (pręty, kształtki, folie, cienkie warstwy) wykazują niewielką histerezę magnetomechaniczną, co powoduje, że wzajemne przekształcanie energii mechanicznej i magnetycznej zachodzi w przetwornikach z dużą sprawnością,
- w postaci proszków, po odpowiednim połączeniu z żywicami, silikonami, gumami itp. i spolaryzowaniu magnetycznym umożliwiają otrzymanie materiałów o dużych właściwościach tłumiących.

Możliwe stało się zatem uzyskanie materiałów z programowalnymi właściwościami mechanicznymi i magnetycznymi, o bardzo szerokim zastosowaniu technicznym [53]. Terfenol-D ma także zastosowanie w budowie sonarów [51], sensorów, pomp hydraulicznych o niewielkich rozmiarach [54], silnikach krokowych i obrotowych [49], precyzyjnych pozycjonerach [48] oraz w konstrukcjach wymagających tłumienia drgań (np. w śmigle helikoptera [55]).

„Programowanie” właściwości terfenoli jest możliwe dzięki temu, że podstawowe charakterystyki materiału zależą między innymi od parametrów takich, jak tzw. naprężenie wstępne σ_0 , natężenie pola podmagnesowującego H_0 oraz widma i czasu trwania obciążenia czynnego. Na przykład w elementach wykonawczych Terfenol-D w postaci pręta otoczony jest cewką wytwarzającą pole magnetyczne. Dodatkowo, w celu poprawienia charakterystyki pracy, stosuje się sprężyny napinające. Sprężyny wywołują w materiale naprężenie wstępne, umożliwiając zachowanie liniowej charakterystyki w większym zakresie odkształceń. Na rysunku 3.2 przedstawiono przykładowy schemat budowy elementu wykonawczego firmy MIDE z USA [43], który ułatwia uzyskanie dużej siły o niewielkich rozmiarach i krótkim czasie reakcji. W tabeli 3.3 przedstawiono z kolei przykładowe parametry osiągnięte przez taki element wykonawczy [43].

3.2. Badania własne

Spektrum badań własnych, dotyczących Terfenolu-D, było obszerne i obejmowało różnorodne aspekty, w tym między innymi oznaczenie składu chemicznego, badanie mikrostruktury, badania dyfrakcji rentgenowskiej, pomiar magnetyzacji, pomiar częstotliwości rezonansowej, pomiar magnetostrykcji w warunkach wymuszenia statycznego i cyklicznego oraz badania zjawiska Villariego. Stworzono też oryginalne stanowiska badawcze w postaci magnetostrykcyjnych wzbudników



Rys. 3.2. Schemat elementu wykonawczego firmy MIDE z USA; opracowanie własne na podstawie [43]

Tabela 3.3. Przykładowe parametry elementu wykonawczego firmy MIDE [43]

Wielkość	Przykładowa wartość
Średnica pręta (Terfenol-D)	8,9 mm
Długość pręta (Terfenol-D)	75,9 mm
Czas odpowiedzi	< 0,3 ms / > 4 kHz
Skok	0,114 mm
Siła	2,669 kN
Zakres temperatury pracy	-15–300 °C
Zajmowana przestrzeń	< (48,1 × 48,1 × 75,9) mm

laboratoryjnych, na których zbadano histerezę magnetyczną, prądy wirowe i efekty naskórkowe oraz straty mechaniczne. Opracowano też własny model wzbudnika magnetostrykcyjnego, uwzględniający wpływ prądów wirowych. Zaproponowano też przykłady zastosowań Terfenolu-D w budowie tłumików i aktuatorów oraz wykazano przydatność tych obiektów w konstrukcjach mechanicznych. Całość dorobku zaprezentowano między innymi w pracach [1, 45, 46, 56–67]. Dalej przytoczono jedynie wybrane przykłady badań własnych.

Procedurze badawczej poddany został stop (Tb-Dy)-Fe₂ – GMM pochodzący z firmy Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co. (Chiny) oraz Terfenol-D z firmy ETREMA Products, Inc. (USA). Zestawienie podstawowych właściwości materiału magnetostrykcyjnego zawiera tabela 3.4.

3.2.1. Badanie magnetostrykcji w warunkach wymuszenia statycznego

Ważnym zadaniem, umożliwiającym wykorzystanie materiałów wykazujących gigantyczną magnetostrykcję w zastosowaniach inżynierskich [59–61], jest przeprowadzenie identyfikacji magnetostrykcji i odwrotnej magnetostrykcji w warunkach

Tabela 3.4. Właściwości materiału magnetostrykcyjnego typu (Tb-Dy)-Fe₂ (producenci: Etrema, Mide, Tianxing)

Magnetostrykcja	$(8-20) \times 10^{-4}$ przy 100 kA/m
Gęstość ³	9,2 g/cm ³
Moduł Younga	(25–35) GPa
Wytrzymałość na rozciąganie	28 MPa
Wytrzymałość na ściskanie	(260–700) MPa
Temperatura Curie	653 K
Temperaturowy zakres pracy	(263–573) K
Przenikalność magnetyczna względna	3–15
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	$(8-12) \times 10^{-6}$ /K
Pojemność cieplna	0,35 kJ/kg K
Przewodność cieplna	13,5 W/(m K)
Rezystywność właściwa	58×10^{-8} Ω m
Gęstość energii	(14–25) kJ/m ²
Współczynnik sprzężenia magnetomech.	0,75
Prędkość dźwięku	(1640–1940) m/s
Czas odpowiedzi	~ 1 ms (0,3 ms/4 kHz)
Dokładność przemieszczenia	$(10^{-1}-10^{-3})$ mm
Zakres częstotliwości pracy	< 30 kHz

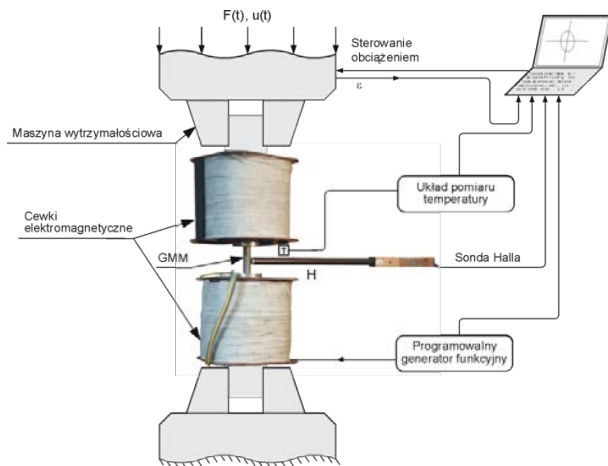
obciążeń statycznych [47, 62, 63, 65, 68]. Kluczowe jest zrozumienie roli odgrywanej przez naprężenie wstępne rdzenia – σ_0 (ang.: *prestress*) oraz stałe pole podmagnesowujące – H_0 (ang.: *bias magnetic field*), które to czynniki wpływają na charakter tłumienia magnetomechanicznego i sprawność przetwarzania energii.

W badaniach wykorzystano stanowisko, które umożliwiło zaobserwowanie dwóch efektów magnetomechanicznych:

- Efektu magnetostrykcji – w następstwie przyłożonego z zewnątrz pola magnetycznego $H(t)$, rejestrowany jest sygnał mechaniczny siły $F(t)$ lub przemieszczenia $u(t)$. Stymulacja stałym zewnętrznym polem podmagnesowującym H_0 oraz naprężeniem wstępnym σ_0 powoduje płynną zmianę charakterystyk magnetomechanicznych.
- Efektu odwrotnej magnetostrykcji (efektu Villariego) – w następstwie przyłożonego z zewnątrz stałego lub cyklicznego pola mechanicznego, np. w postaci siły $F(t)$ lub przemieszczenia $u(t)$, mierzoną odpowiedzią układu jest sygnał magnetyczny $H(t)$, co nie było przedmiotem pracy.

Na rysunku 3.3 przedstawiono stanowisko, którego szczegółowy opis zawarto w [1, 46, 58].

³ Użyto jednostek z cytowanych publikacji, $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$.

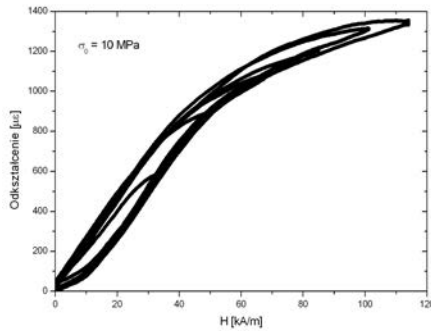


Rys. 3.3. Schemat stanowiska do badania materiałów typu GMM w warunkach obciążeń statycznych (konstrukcja własna) [1, 46, 58]

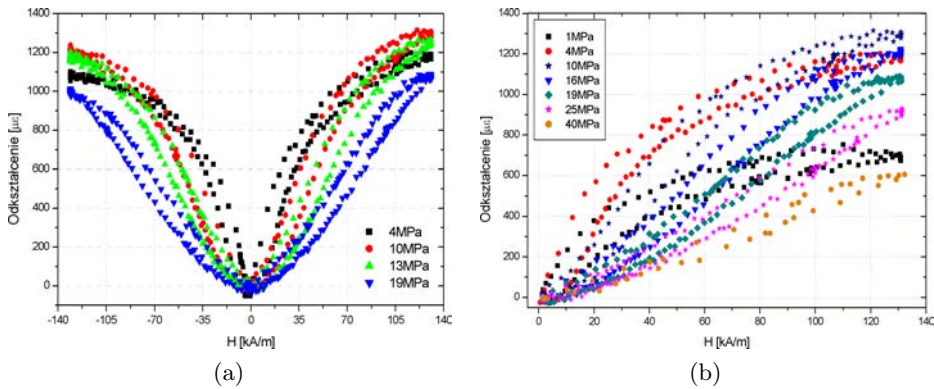
Obiektem badań były próbki Terfenolu-D w postaci prętów o wymiarach $\Phi 10$ mm i długości 50 mm. Pomiary miały na celu określenie wpływu naprężenia ściskającego σ_0 , przyłożonego wzdłuż osi próbki, na wartość odkształceń magnetostrykcyjnych λ w zewnętrznym polu magnetycznym H . Materiał ten można było badać tylko podczas ściskania, ponieważ charakteryzuje się on bardzo małą wytrzymałością na rozciąganie.

Przeprowadzono serię badań polegających na identyfikacji krzywych magnetostrykcyjnych w układzie współrzędnych H – λ w warunkach quasi-statycznych zmian natężenia pola magnetycznego dla wartości naprężenia wstępnego $\sigma_0 = \{1; 4; 7; 10; 13; 16; 19; 22; 25; 28; 31; 34; 37; 40\}$ MPa. Natężenie zewnętrznego pola magnetycznego zwiększało się w cyklu odzerowym, przyjmując maksymalne wartości $H = \{15; 30; 45; 65; 80; 100; 115; 130\}$ kA/m. Po osiągnięciu każdej z założonych wartości natężenia pola magnetycznego, wielkość H zmniejszano do zera i ponownie zwiększano, aż do osiągnięcia kolejnego maksimum. Wszystkie analizowane rezultaty uzyskano dla temperatury $T = 293$ K. Ze względu na otwarty magnetowód układu, próbka była wstępnie rozmagnesowana przed każdym pomiarem.

Na rysunku 3.4 przedstawiono wyniki pomiarów zależności odkształceń magnetostrykcyjnych λ od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego H dla naprężenia wstępnego $\sigma_0 = 10$ MPa. Są to zatem typowe magnetomechaniczne pętle histerezy [1, 47, 58, 68]. W przebiegu sygnału charakterystyczna jest droga narastania oraz opadania krzywej w kolejnych przebiegach, przy czym narastanie i opadanie następuje po tej samej drodze.



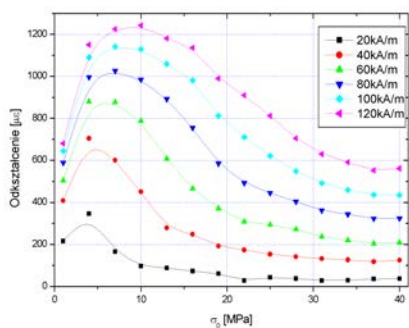
Rys. 3.4. Zależność odkształcenia λ od natężenia pola magnetycznego H dla $\sigma_0 = 10$ MPa (jedynie dla dodatnich odcinków H i λ ; temperatura pomiaru $T = 293$ K) [1, 47, 58, 68]



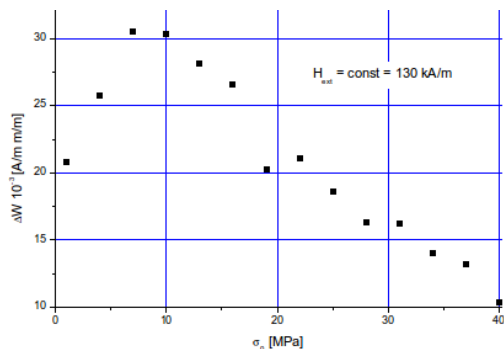
Rys. 3.5. Zależność odkształcenia λ od natężenia pola magnetycznego H , dla różnych naprężeń wstępnych σ_0 – tzw. efekt *pre-stress* [1, 46, 47, 56, 57]

Natężenie zewnętrznego pola magnetycznego zwiększało się w cyklu odzerowym, przyjmując maksymalne wartości $H = \{15; 30; 45; 65; 80; 100; 115\}$ kA/m. Po osiągnięciu każdej z założonych wartości natężenia pola magnetycznego, wielkość H zmniejszono do zera i ponownie zwiększano, aż do osiągnięcia kolejnego maksimum (ang.: *step-by-step*). Na rysunku widoczne jest także zjawisko histerezy magnetomechanicznej związanej z ruchem domen magnetycznych [69–71].

Na rysunku 3.5 pokazano z kolei wyniki badań wpływu naprężenia wstępnego σ_0 na charakterystyki magnetostrykcyjne [1, 46, 47, 56, 57]. Wraz ze zwiększeniem się naprężenia widoczna jest zmiana kształtu charakterystyk, z krzywoliniowego na dążący do liniowego. Wartość odkształcenia przy 130 kA/m początkowo znacząco zwiększa się, gdy wzrasta naprężenie – osiągając maksimum dla przedziału



Rys. 3.6. Zależność maksymalnej wartości odkształcenia λ od natężenia pola magnetycznego H , dla różnych naprężeń wstępnych σ_0 [1, 46, 47, 56, 57]



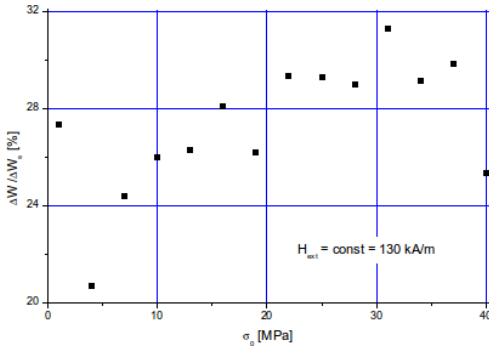
Rys. 3.7. Zależność tłumienia od naprężenia wstępnego dla stałego natężenia pola $H = 130 \text{ kA/m}$ [46, 56, 57]

10–13 MPa. Po dalszym zwiększeniu się naprężenia σ_0 , wartości odkształcenia maleją.

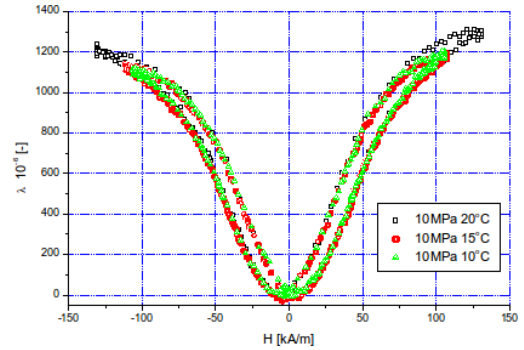
Na rysunku 3.6 widoczne są różnice w zakresie uzyskanych maksymalnych wartości odkształcenia w układzie współrzędnych H – λ , dla różnej wartości naprężenia wstępnego oraz maksymalnej amplitudy pola magnetycznego [1, 46, 47, 56, 57].

Należy zauważyć, że maksymalne odkształcenie zależy zarówno od naprężenia wstępnego, jak i maksymalnego natężenia pola magnetycznego (wymuszenia). Rozważając budowę przetwornika magnetostrykcyjnego, σ_0 należy wybrać z przedziału 4–13 MPa, w zależności od stosowanych natężeń pola magnetycznego.

Następnie rozważono wpływ σ_0 na tłumienie, co obrazują rysunki 3.7 i 3.8 [46, 56, 57]. Za miarę tłumienia ΔW przyjęto pole pętli histerezy (jedynie dla dodatnich odcinków λ i H) w układzie współrzędnych λ – H . Jednostką tak rozumianego tłumienia jest zatem [m/m, A/m]. Na rysunkach zaprezentowano wyniki pomiarów próbki poddanej działaniu pola magnetycznego o natężeniu $H = 130 \text{ kA/m}$. Na rysunku 3.7 widoczne jest zwiększenie tłumienia ΔW w przedziale do $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$, a następnie sukcesywne, prawie liniowe jego zmniejszenie, aż do wartości $\Delta W = 10 \text{ m/m A/m}$. Szczególnie istotny jest zestaw wyników zaprezentowany na rysunku 3.8, gdzie wartości ΔW odniesione do pola pod krzywą magnetostrykcji ΔW_s . Łatwo zauważyć, że stosunek ten przyjmuje względnie małą wartość (rzędu 25–26%) – a więc dużą sprawność przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną – dla naprężenia wstępnego $\sigma_0 \approx 10$ –13 MPa. W rezultacie do dalszych badań przyjęto, że w układzie pomiarowym zastosowane zostanie $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$. Należy zauważyć, że zbliżone wartości uzyskano także w [10].



Rys. 3.8. Zależność tłumienia od naprężenia wstępnego dla stałego natężenia pola $H = 130$ kA/m [46, 56, 57]



Rys. 3.9. Wpływ temperatury na wartości magnetostrykcji dla $\sigma_0 = 10$ MPa [46, 56]

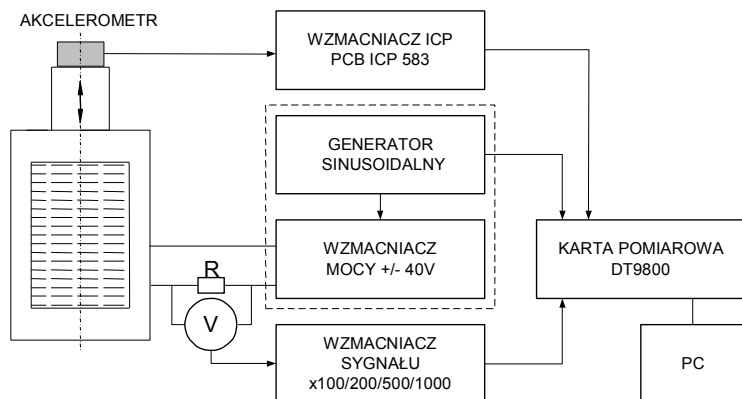
Następnie rozważono wpływ temperatury w zakresie zmian, jaki może występować w warunkach laboratoryjnych. Na rysunku 3.9 przedstawiono uzyskane krzywe magnetostrykcyjne dla temperatur odpowiednio równych 10, 15 i 20 °C, dla naprężenia $\sigma_0 = 10$ MPa [46, 56]. Z przedstawionych wykresów, jak i pozostałych danych dla $\sigma_0 = \{1; 4; 13\}$ MPa, wynika, że zmiana temperatury w zakresie kilku stopni (co może wystąpić w laboratorium) nie wpływa znacząco na uzyskiwane wyniki pomiarowe.

3.2.2. Badanie magnetostrykcji w warunkach wymuszenia cyklicznego

Efektywne wykorzystanie materiałów z gigantyczną magnetostrykcją wymaga przeprowadzenia identyfikacji, szczególnie w warunkach obciążeń cyklicznych dominujących w zastosowaniach. Powszechnie wiadomo, że wraz ze zwiększeniem częstotliwości wymuszenia polem magnetycznym zwiększa się wpływ tłumienia mechanicznego oraz prądów wirowych na kształt charakterystyk magnetomechanicznych. Kolejny problem, to stabilność charakterystyk w następstwie obciążeń cyklicznych.

Na rysunku 3.10 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego przeznaczonego do pomiaru właściwości cyklicznych układu wzбудnika magnetostrykcyjnego [1, 60, 61, 67]. Schemat obejmuje:

- układ wzбудnika magnetostrykcyjnego zawierającego pręt magnetostrykcyjny typu GMM, o wymiarach $\varnothing 10 \times 70$ mm,
- układ zasilania wzбудnika złożonego ze wzmacniacza mocy ± 40 V i generatora sygnału Metex MS-9140,



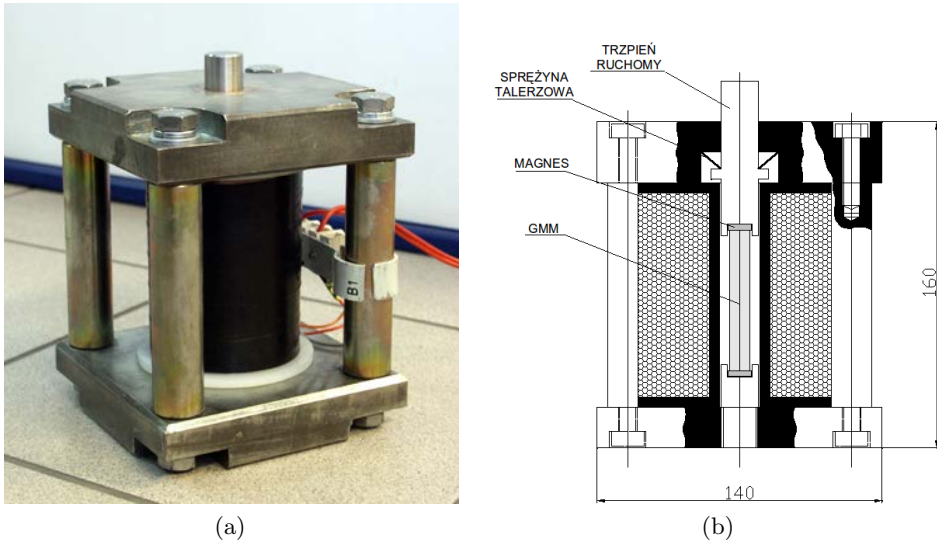
Rys. 3.10. Schemat stanowiska do badania materiałów typu GMM w warunkach obciążeń cyklicznych [1, 60, 61, 67]

- tor pomiaru przyspieszenia końca ruchomego trzpienia wzbudnika magnetostrykcyjnego (końca pręta materiału magnetostrykcyjnego) złożonego z czujnika przyspieszenia PCB 336C oraz wzmacniacza PCB ICP 583 ICP,
- tor pomiaru pola magnetycznego wewnątrz cewki indukcyjnej na podstawie pomiaru prądu złożonego z rezystora oraz wzmacniacza sygnału ($\times 100/200/500/1000$),
- komputer PC wyposażony w kartę pomiarową DT9800.

Obiektem badań była próbka z Terfenolu-D umieszczona w układzie wzbudnika magnetostrykcyjnego (rys. 3.11) [1, 46, 47, 56, 57, 62, 64]. Pręt ściśnięto wstępnie za pomocą sprężyny do wartości naprężenia wstępnego σ_0 , wynoszącego 10 MPa. Dodatkowo, umieszczając na obu końcach pręta dwa magnesy stałe, przyłożono pole podmagnesowujące $H_0 = 35$ kA/m.

Pomiary miały na celu określenie wpływu częstotliwości wymuszenia zmiennym polem magnetycznym $H(t)$ przyłożonym wzdłuż osi próbki na wartości przemieszczenia $u(t)$ ruchomego trzpienia wzbudnika magnetostrykcyjnego, połączonego bezpośrednio z końcem próbki magnetostrykcyjnej. Przeprowadzono serię badań polegających na wyznaczeniu krzywych magnetomechanicznych w układzie współrzędnych $H-u$, w warunkach cyklicznych zmian natężenia pola magnetycznego, dla częstotliwości wymuszenia odpowiednio: $f = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 200; 300; 400; 500; 600\}$ Hz. Ze względu na ograniczenie techniczne układu zasilania wzbudnika magnetostrykcyjnego amplituda natężenia zewnętrznego pola magnetycznego malała wraz ze zwiększaniem się częstotliwości. Wszystkie analizowane rezultaty uzyskano dla temperatury $T = 293$ K.

Na rysunku 3.12 zestawiono wyniki pomiarów zależności przemieszczenia $u(t)$ końca próbki od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego $H(t)$ dla częstotli-



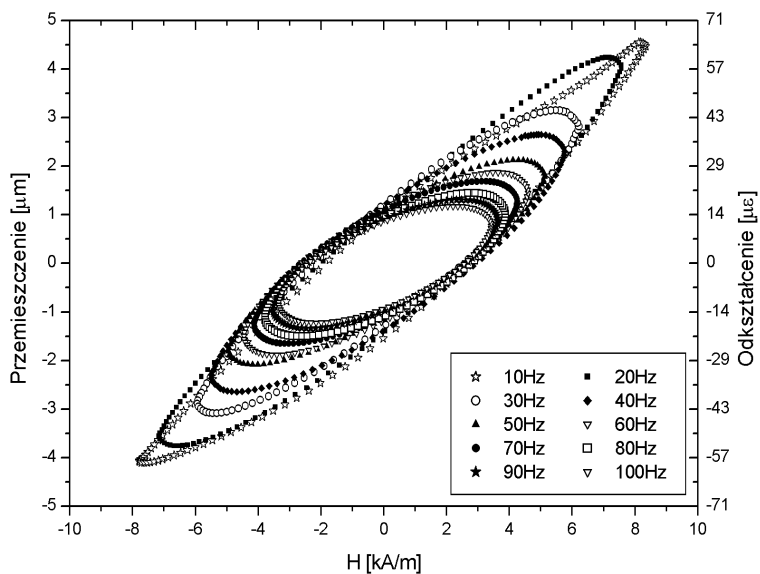
Rys. 3.11. Wzbudnik magnetostrykcyjny wykorzystujący materiał typu GMM:
 (a) prototypowy układ laboratoryjny,
 (b) schemat (konstrukcja własna) [1, 46, 47, 56, 57, 62, 64]

wości wymuszenia odpowiednio $f = \{10; 20; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600\}$ Hz [1]. Widoczny jest silny wpływ częstotliwości wymuszenia polem magnetycznym na kształt charakterystyk magnetomechanicznych. W zakresie częstotliwości 10–100 Hz przyjmują one kształt zbliżony do elipsy (rys. 3.12a). Natomiast dla większych częstotliwości otrzymano kształty owalne (rys. 3.12b). Jest to przejawem wystąpienia prądów wirowych dla częstotliwości już powyżej 50 Hz, co zostało szczegółowo przedyskutowane w pracy [1].

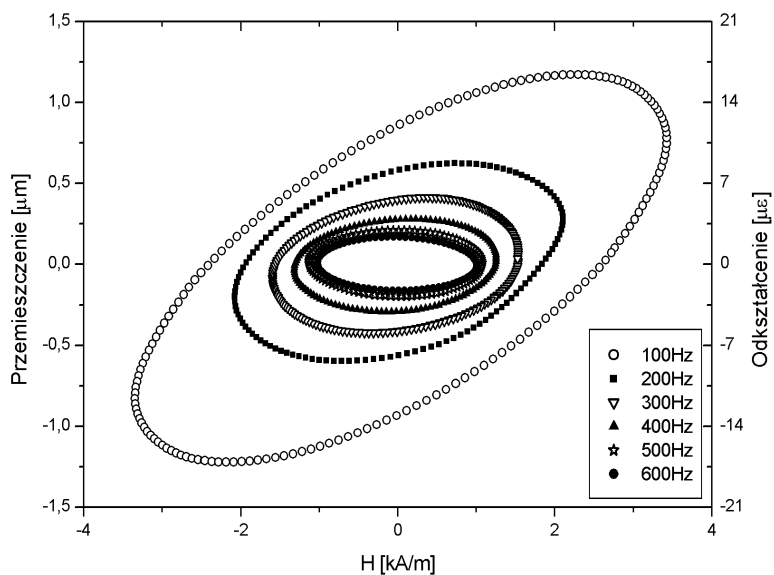
Na rysunku 3.12 uwypukła się problem sterowania wzbudnikiem magnetostrykcyjnym w zakresie wyższych częstotliwości. Przy kontrolowanym stałym napięciu zasilania amplitudy wymuszenia wraz ze zwiększeniem częstotliwości, poza zmianą kształtu charakterystyki, maleje amplituda przemieszczenia. Dzieje się tak głównie na skutek występowania indukcyjności w układzie elektrycznym wzbudnika oraz ze względu na zjawisko prądów wirowych.

3.2.3. Tłumienie w Terfenolu-D z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych

Przedmiotem zainteresowania było też tłumienie w Terfenolu-D w warunkach obciążenia mechanicznego o charakterze statycznym i cyklicznym. Zagadnienie szczegółowo opisano w [1]. Wybrane aspekty przedstawiono również w pracach [46, 56–58, 61–63, 65, 67].

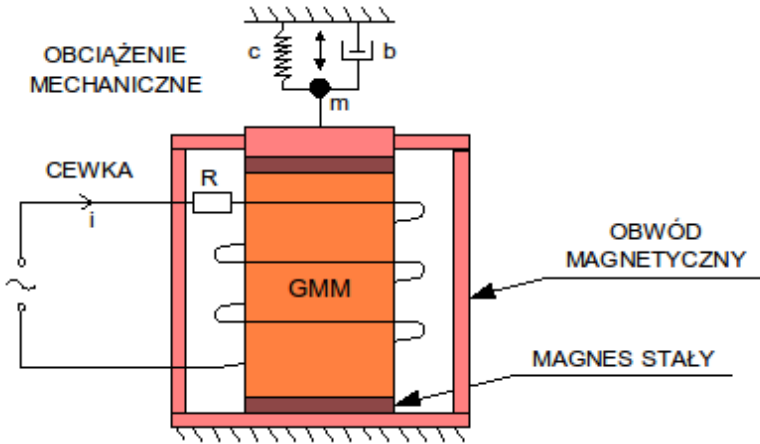


(a)



(b)

Rys. 3.12. Zależność przemieszczenia od pola magnetycznego dla różnych częstotliwości zmiennego pola magnetycznego [1]



Rys. 3.13. Wzbudnik magnetostrykcyjny jako układ elektromagnetomechaniczny [1]

Problem tłumienia rozpatrzone, wykorzystując w tym celu model wzbudnika magnetostrykcyjnego. W najprostszej postaci konstrukcja takiego wzbudnika składa się z obwodu elektrycznego i magnetycznego oraz materiału magnetostrykcyjnego poddanego obciążeniom mechanicznym (rys. 3.13) [1]. Rozpatrując taki układ, w pierwszej kolejności należy uwzględnić obecność efektów związanych z polem mechanicznym, magnetycznym i elektrycznym. Dodatkowo można także uwzględnić efekty związane ze zmianą temperatury. Mamy więc do czynienia z histerezą magnetyczną, efektem prądów wirowych (efektem naskórkowym) oraz tłumieniem mechanicznym. Wzbudnik magnetostrykcyjny jest zatem w rzeczywistości skomplikowanym układem elektromagnetomechanicznym. Wszystkie z wymienionych efektów wpływają na pole pętli histerezy w układzie współrzędnych $H-\varepsilon$ (natężenie pola magnetycznego–odkształcenie) oraz na ostateczny jej kształt. W szczególności, zgodnie z prawem Faradaya, powinno to być szczególnie zauważalne w przypadku zmiany częstotliwości wymuszenia w postaci pola magnetycznego [72].

W założeniach konstrukcji modelu wzbudnika magnetostrykcyjnego uwzględniono wpływ naprężeń zewnętrznych na magnetosprężyste zachowanie się materiałów wykazujących gigantyczną magnetostrykcję, podczas podmagnesowania stałym polem magnetycznym. Ponadto założono konieczność opisu histerezy magnetycznej oraz oszacowania wpływu prądów wirowych na rozpatrywany układ.

Celem poznawczym badań była zatem identyfikacja właściwości magneto-mechanicznych. Podjęto w tym celu próbę opisu zjawiska z wykorzystaniem energii jako wielkości kryterialnej. Dzięki uzyskanym результатам można stwierdzić, że model tzw. gigantycznej magnetostrykcji musi uwzględniać wpływ prądów wirowych. Wykazano ponadto, w jaki sposób model zależy od parametrów pola

mechanicznego oraz natężenia pola magnetycznego. W ograniczonym zakresie zbadano także odwrotną magnetostrykcję (efekt Villariego) w GMM.

Celem aplikacyjnym pracy było stworzenie opisu nieliniowego układu wzbudnika magnetostrykcyjnego. Proponowany model był niezbędny do sterowania w układzie rzeczywistym wykorzystującym tego typu człon wykonawczy.

Podejmując temat tłumienia w Terfenolu-D, z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych [1], dokonano na wstępie przeglądu ponad 150 prac dotyczących magnetostrykcji oraz modeli wzbudników magnetostrykcyjnych, którego wyniki nie będą tutaj przytaczane. W wyniku analizy literatury można stwierdzić, że nie uwzględniono należyście w żadnym ze znanych modeli wpływu prądów wirowych na zmianę charakterystyk sterowanego urządzenia. W literaturze przedmiotu wspomniano jedynie o istniejącym problemie straty ciepła [10, 71] oraz efekcie naskórkowym [10].

Podstawę do opisu układu wzbudnika magnetostrykcyjnego stanowił zmodyfikowany model energetyczny Venkataramana, wzbogacony o człon opisujący zjawisko prądów wirowych. W zaproponowanym opisie wykorzystano jednocześnie model histerezy magnetycznej Jilesa–Athertona. Efekt prądów wirowych uwzględniono w postaci strat ciepła Joule’a [69, 72] oraz indukowanego przez prądy wirowe pola magnetycznego o przeciwnym zwrocie [70].

Dla układu wzbudnika magnetostrykcyjnego posłużono się bilansem energii, w którym uwzględniono energię zewnętrzną dostarczoną do układu, energię wewnętrzną w układzie, energię traconą przez układ i dyssypowaną na zewnątrz, np. w postaci ciepła oraz energię kinetyczną układu. Bilans taki przyjmuje następującą postać [1, 67]:

$$\begin{aligned} \overbrace{\Delta E_{\text{mag}} + \Delta E_{\text{mech}}}^{\text{e. dostarczona}} = & \overbrace{\Delta E_{\text{mag_an}} + \Delta E_{\text{mag_hist}}}^{\text{e. magnetyczna}} + \overbrace{\Delta E_{\text{mag_spr}}}^{\text{e. magnetosprężysta}} \\ & + \overbrace{\Delta E_{\text{spr}} + \Delta E_{\text{mech_hist}} + \Delta E_{\text{kin}}}^{\text{e. mechaniczna}} + \overbrace{\Delta E_{\text{wir_mag}} + \Delta E_{\text{wir_hist}}}^{\text{e. prądów wirowych}} \end{aligned}$$

w której kolejne człony energii oznaczają:

ΔE_{mag} – dostarczona do układu energia zewnętrznego pola magnetycznego,

ΔE_{mech} – dostarczona do układu energia pola mechanicznego (sił zewnętrznych),

$\Delta E_{\text{mag_an}}$ – składowa energii magnetycznej dla przypadku bezstratnej zmiany magnetyzacji,

$\Delta E_{\text{mag_hist}}$ – energia strat histerezy magnetycznej,

$\Delta E_{\text{mag_spr}}$ – energia oddziaływań magnetosprężystych,

ΔE_{spr} – energia odkształceń sprężystych,

$\Delta E_{\text{mech_hist}}$ – energia tłumienia mechanicznego w układzie,

ΔE_{kin} – energia kinetyczna układu,

$\Delta E_{\text{wir_mag}}$ – energia pola magnetycznego indukowanego przez prądy wirowe,
 $\Delta E_{\text{wir_hist}}$ – energia strat histerezy indukowanych prądami wirowymi.

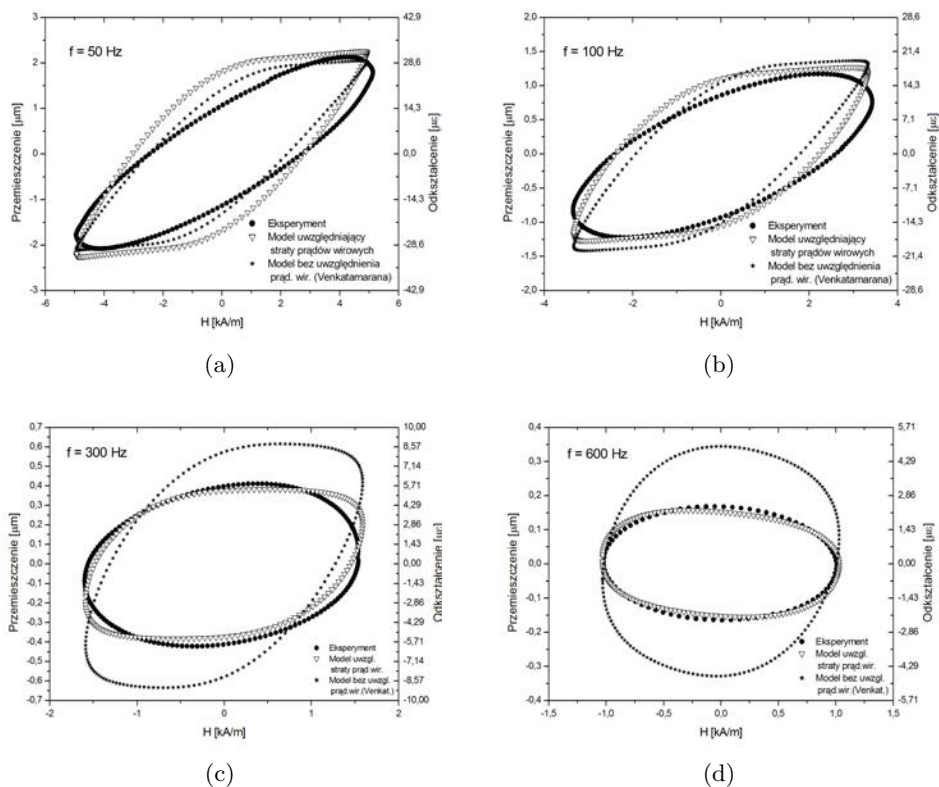
Następnie określono wielostopniową procedurę wyznaczenia parametrów modelu wzbudnika magnetostrykcyjnego i wyznaczono ich wartości. Był to kluczowy rezultat pracy [1].

W celu określenia korelacji wyników eksperymentalnych oraz symulacji z użyciem podanego modelu, porównano krzywe magnetostrykcyjne uzyskane zarówno w warunkach statycznego obciążenia polem magnetycznym, jak też dynamicznej zmiany pola w zakresie 50–600 Hz. Za kryterium korelacji przyjęto metodę najmniejszych kwadratów. Wykazano zadowalającą korelację wyników eksperymentalnych z rezultatami wyznaczonymi z modelu. Jednocześnie wykazano, iż model własny zdecydowanie przeważa, szczególnie w zakresie wyższych częstotliwości, nad modelem Venkataramana, w którym pominięto wpływ prądów wirowych. Stworzono tym samym możliwość efektywnego sterowania nieliniowym układem wzbudnika w zakresie dynamicznym. Przykład wyników eksperymentalnych oraz rezultaty identyfikacji zaprezentowano na rysunku 3.14.

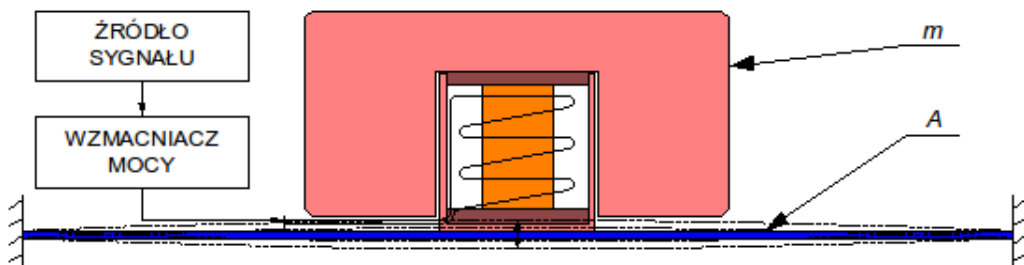
3.3. Przykłady zastosowań Terfenolu-D w konstrukcjach mechanicznych

3.3.1. Magnetostrykcyjny generator drgań akustycznych (głośnik magnetostrykcyjny)

Jedną z ciekawych oraz najbardziej efektywnych aplikacji tej klasy materiałów jest magnetostrykcyjny generator drgań akustycznych, nazywany także głośnikiem magnetostrykcyjnym [1]. Urządzenie to w pełni wykorzystuje zalety wzbudnika magnetostrykcyjnego – dużą siłę i wysokie pasmo generowanego sygnału – oraz cechę uznawaną za niekorzystną – małe przemieszczenie. Na rysunku 3.15 przedstawiono schemat działania generatora drgań akustycznych. Głównym elementem układu jest wzbudnik magnetostrykcyjny, na którym oparta jest pewna masa m . Przesunięcie m względem powierzchni A powoduje wprowadzenie jej w drgania na skutek sił bezwładności. Przy stosunkowo niewielkich przemieszczeniach powierzchni A generowana jest fala akustyczna o dość dużym natężeniu dźwięku sięgającym do 90 dB. Fakt ten może być wykorzystywany zarówno do generowania dźwięku na powierzchniach typu blat stołu lub szyba, jak i do aktywnego tłumienia hałasu drgających powierzchni, np. karoserii samochodu. Podobne rozwiązanie oferowane jest już od kilku lat komercyjnie przez firmę FeONIC [73]. Obecnie znanych jest też kilka innych komercyjnie znanych rozwiązań tego typu (firmy Etrema oraz Newlands Technology Ltd.).



Rys. 3.14. Porównanie krzywych magnetostrykcyjnych uzyskanych na drodze symulacji wg modelu (własnego) [1, 67] uwzględniającego prądy wirowe oraz modelu Venkataramana [71], przy naprężeniu ściskającym 10 MPa i częstotliwości odpowiednio: 50, 100, 300 oraz 600 Hz



Rys. 3.15. Schemat układu generatora drgań akustycznych (konstrukcja własna) [1]



Rys. 3.16. Prototypowy generator drgań akustycznych (konstrukcja własna) [1]

Zaletą rozwiązania jest prostota i innowacyjność konstrukcji urządzeń generujących dźwięki, a wadą znaczne koszty produkcji związane z zaawansowaną, nietypową technologią. W przypadku urządzeń przenośnych stosunkowo duży jest też pobór mocy. Rozwiązanie jest coraz powszechniej stosowane w reklamie oraz tam, gdzie wskazane jest ukrycie źródeł dźwięku, np. w miejscach narażonych na wandalizm.

3.3.2. Aktywny tłumik drgań

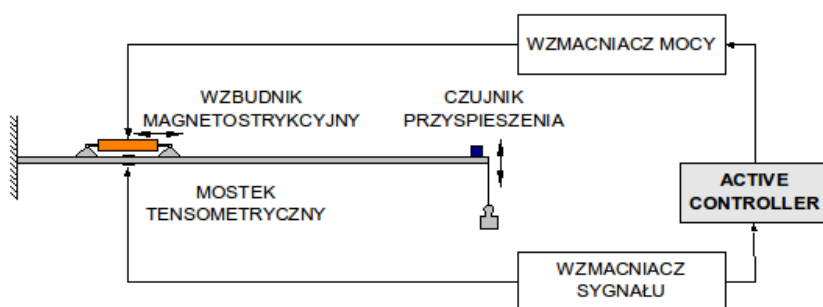
Zastosowanie aktywnych tłumików drgań, generujących stosunkowo dużą siłę, umożliwia innowacyjne rozwiązanie problemu drgań konstrukcji stalowych. Duże możliwości aktywnego tłumienia drgań o małej amplitudzie oferują wzbudniki magnetostrykcyjne typu GMM, charakteryzujące się dużą siłą, rzędu kilku kN oraz stosunkowo dużą częstotliwością dochodzącą do kilkunastu kHz. Wadą tych urządzeń jest generowanie małego przemieszczenia rzędu dziesiątych części milimetra. W pracach [1, 66, 74] zaprezentowano sposób tłumienia drgań układu belki o jednej lub dwóch podporach. Skonstruowano wzbudnik magnetostrykcyjny (rys. 3.17) przeznaczony do tłumienia drgań w belce. Urządzenie umożliwia przyłożenie do belki momentu siły, za pomocą którego kontroluje się drgania konstrukcji. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 3.18. Głównym elementem układu jest wzbudnik oraz aktywny kontroler. Celem było zminimalizowanie amplitudy drgań belki z wykorzystaniem przyłożenia momentu o przeciwnym zwrocie.

Prezentowana konstrukcja była przedmiotem badań opisanych w pracach [66, 74] zrealizowanych w Laboratorium Dynamiki. Celem było stworzenie układu sterowania tłumieniem belki (rys. 3.19). Do realizacji wyznaczonego zadania opracowano program, który w czasie rzeczywistym pobierał dane pochodzące z układu i wyznaczał parametry sterowania elementem tłumiącym. Dla stworzenia programu

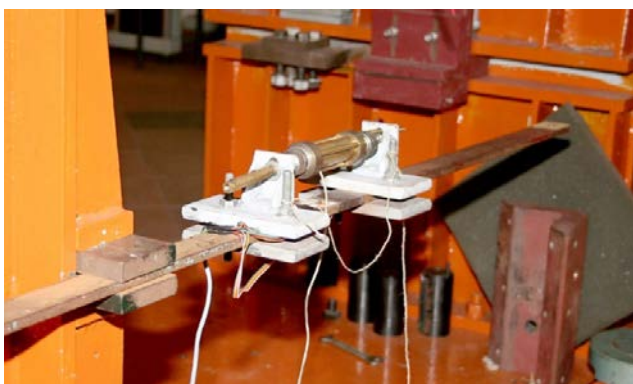
został wybrany graficzny język programowania G (w pakiecie LabView). Jako algorytm sterujący zastosowano uniwersalny algorytm PID (ang.: *Proportional-Integral-Derivative controller*). Przeprowadzono badania na układzie modelowym,



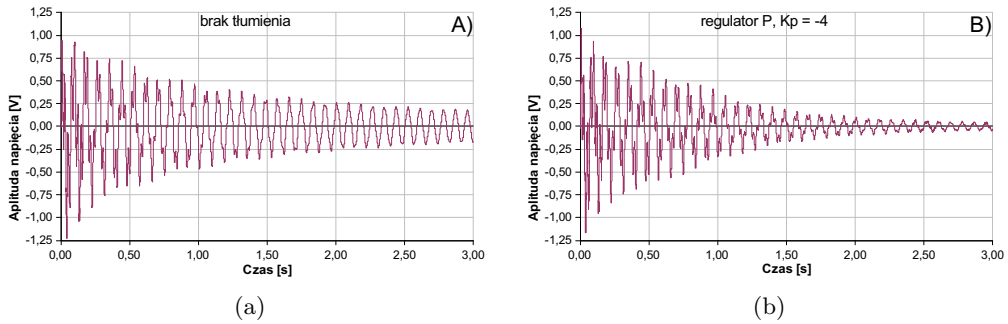
Rys. 3.17. Wzbudnik magnetostrykcyjny przeznaczony do aktywnego tłumienia drgań belki stalowej (konstrukcja własna) [1]



Rys. 3.18. Schemat systemu aktywnego tłumienia drgań belki stalowej [1, 66, 74]



Rys. 3.19. Układ do analizy drgań belki stalowej ze wzbudnikiem magnetostrykcyjnym do aktywnego tłumienia (konstrukcja własna) [1, 74]



Rys. 3.20. Zależność amplitudy drgań swobodnych od czasu dla układu jednostronnie utwierdzonej: a) brak aktywnego tłumienia; b) z aktywnym tłumieniem (regulator P) [66, 74]

z którym współpracował komputer sterujący procesem tłumienia drgań belki. Badania polegały na wykonaniu serii pomiarów amplitudy drgań tłumionych w zależności od czasu, dla różnej geometrii belki oraz wartości współczynników algorytmu. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wykresów (rys. 3.20). Parametry zastosowane w algorytmie sterującym w zróżnicowany sposób wpływały na tłumienie drgań układu [66, 74]. Decydującym czynnikiem była wartość współczynnika wzmocnienia K_p , natomiast czas zdwojenia powodował głównie eliminację drgań wtórnych w układzie.

3.4. Zasadność i kierunki dalszych badań

Materiały o tzw. gigantycznej magnetostrykcji, w tym z udziałem Terfenolu-D, będą nadal obiektem badań podstawowych i aplikacyjnych. Uwzględniając rezultaty uzyskane dotychczas przez zespół autora, a także analizę trendów widocznych w literaturze przedmiotu, uważa się za zasadne prowadzenie badań uwzględniających:

- Modyfikacje składu, struktury i postaci Terfenolu-D. Badania podstawowe z zakresu inżynierii materiałowej obejmujące wpływ dodatków stopowych, uzyskiwanie stopów amorficznych i nanokrystalicznych oraz różnych postaci wyrobów końcowych, czyli prętów, folii, proszków, laminatów itd. Duże nadzieje związane są z możliwością wytwarzania kompozytów ze sproszkowanymi materiałami GMM, co omówiono dokładnie w rozdziale 4.
- Pogłębianie wiedzy w obszarze prądów wirowych GMM wymaga dalszych badań, szczególnie w zakresie większych częstotliwości wymuszenia polem magnetycznym. Należy też dokładniej rozpatrzyć nierównomierny rozkład pola

magnetycznego w próbce (tzw. efekt naskórkowości), co powinno wpłynąć na zwiększenie dokładności sterowania wzbudnikiem magnetostrykcyjnym w zakresie małych przemieszczeń.

- Dalszych badań wymaga nieliniowy efekt magnetosprężysty i jego zależność od zmiennego obciążenia naprężeniem oraz wpływu temperatury.
- Wskazane są poszukiwania nowych zastosowań dla materiałów GMM jako sensorów i aktuatorów. Rozwój niezbędnych ku temu podzespołów elektronicznych stwarza dodatkowe szanse na sukcesy w tym zakresie. Materiały magnetostrykcyjne, w tym terfenole, wydają się szczególnie przydatne w rozwoju metod odzysku energii z drgań (*Energy Harvesting* – EH) oraz transferu energii i informacji przez różne media (ciała stałe, ciecze, gazy). Zagadnienie to rozpatrzono dokładniej w rozdziale 8.
- Kluczowe znaczenie ma także modelowanie zjawiska magnetostrykcji uwzględniające różne skale długości (mikro-, mezo-, makroskala).

Bibliografia

- [1] Bomba J., *Tłumienie w materiale o gigantycznej magnetostrykcji: eksperyment, modelowanie, identyfikacja*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2009, promotor: Jerzy Kaleta.
- [2] Greenough R., Pollard D., Schulze M., *Nondestructive evaluation of Terfenol-D for transducer applications*, Journal of Applied Physics, 81, 8, 1997, 5716–5718.
- [3] Dooley J., De Graef M., McHenry M.E., *Induction mapping of magnetostrictive materials*, Journal of Applied Physics, 83, 11, 1998, 6837–6839.
- [4] Mei W., Okane T., Umeda T., Zhou S., *Directional solidification of Tb–Dy–Fe magnetostrictive alloy*, Journal of Alloys and Compounds, 248, 1, 1997, 151–158.
- [5] Branwood A., Janio A.L., Piercy A.R., *Domain structures in polycrystalline Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe₂ (Terfenol) in the applied field region of optimum magnetoelastic properties*, Journal of Applied Physics, 61, 8, 1987, 3796–3798.
- [6] Wang B., Busbridge S., Li Y., Wu G., Piercy A., *Magnetostriction and magnetization process of Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe₂ single crystal*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 218, 2, 2000, 198–202.
- [7] Jiles D., Hariharan S., *Interpretation of the magnetization mechanism in Terfenol-D using barkhausen pulse-height analysis and irreversible magnetostriction*, Journal of Applied Physics, 67, 9, 1990, 5013–5015.
- [8] Zhao X., Lord D., Faunce C., *Influence of defects on magnetostrictive performance in Terfenol-D*, Journal of Applied Physics, 87, 9, 2000, 6286–6288.
- [9] Lord D., Harvey D., *Anisotropy in twinned Terfenol-D crystals*, Journal of Applied Physics, 76, 10, 1994, 7151–7153.
- [10] Engdahl G. (red.), *Handbook of giant magnetostrictive materials*, Academic Press, San Diego, CA, 2000.

- [11] Holden A., Lord D., Grundy P., *Surface deformations and domains in Terfenol-D by scanning probe microscopy*, Journal of Applied Physics, 79, 8, 1996, 6070–6072.
- [12] Jiles D., Ostenson J., Owen C., Chang T., *Barkhausen effect and discontinuous magnetostriction in Terfenol-D*, Journal of Applied Physics, 64, 1988, 5417.
- [13] Dooley J., De Graef M., *Energy filtered Lorentz microscopy*, Ultramicroscopy, 67, 1, 1997, 113–131.
- [14] Holden A., Lord D., Grundy P., *Transmission electron microscopy of Terfenol-D crystals*, Journal of Applied Physics, 79, 8, 1996, 4650–4652.
- [15] Holden A., Kennedy J., Halliday N., Lord D., Jenner A., *Nonlinear magnetization processes in twinned Terfenol-D crystals*, Journal of Applied Physics, 81, 1997, 5712.
- [16] Lord D., Holden A., Grundy P., *Magnetic force microscopy of Terfenol-D fracture surfaces*, Journal of Applied Physics, 81, 8, 1997, 5728–5730.
- [17] Schmidt J., Tickle R., Skidmore G.D., Merton C., James R.D., Dan Dahlberg E., *Microscopic stress-induced magnetization changes in a fracture (111) surface of Terfenol-D observed with magnetic force microscopy*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 190, 1, 1998, 98–107.
- [18] Zhao X., Lord D., *Magnetostriction and susceptibilities of twinned single crystals of Terfenol-D*, Journal of Applied Physics, 83, 11, 1998, 7276–7278.
- [19] Zhao X., Lord D., *Effect of demagnetization fields on the magnetization processes in Terfenol-D*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 195, 3, 1999, 699–707.
- [20] Mei W., Yoshizumi M., Okane T., Umeda T., *Crystal growth of giant magnetostrictive Tb-dy-fe alloy*, Journal of Alloys and Compounds, 258, 1, 1997, 34–38.
- [21] Jiles D., *The development of highly magnetostrictive rare earth-iron alloys*, Journal of Physics D: Applied Physics, 27, 1, 1994, 1.
- [22] Restorff J., Wun-Fogle M., Clark A., *Temperature and stress dependences of the magnetostriction in ternary and quaternary Terfenol alloys*, Journal of Applied Physics, 87, 9, 2000, 5786–5788.
- [23] Prajapati K., Greenough R., Jenner A., *Device oriented magnetoelastic properties of $Tb_xDy_{1-x}Fe_{1.95}$ ($x = 0.27, 0.3$) at elevated temperatures*, Journal of Applied Physics, 76, 10, 1994, 7154–7156.
- [24] Lanotte L., Ausanio G., Iannotti V., *Evidence of magnetostrictive influence on magnetic hysteresis behaviour at low temperature*, Physica B: Condensed Matter, 275, 1, 2000, 150–153.
- [25] Greenough R., Schulze M., Pollard D., *Non-destructive testing of Terfenol-D*, Journal of Alloys and Compounds, 258, 1, 1997, 118–122.
- [26] Dapino M.J., Calkins F.T., Flatau A.B., Hall D.L., *Measured Terfenol-D material properties under varied applied magnetic field levels*, [w:] *1996 Symposium on Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 1996, 697–708.
- [27] Dapino M.J., Flatau A.B., Calkins F.T., *Statistical analysis of Terfenol-D material properties*, [w:] *Smart Structures and Materials '97*, International Society for Optics and Photonics, 1997, 256–267.
- [28] Savage H.T., Clark A.E., Pearson D., *The stress dependence of the ΔE effect in Terfenol-D*, Journal of Applied Physics, 64, 10, 1988, 5426–5426.

- [29] Calkins F.T., Dapino M.J., Flatau A.B., *Effect of prestress on the dynamic performance of a Terfenol-D transducer*, [w:] *Smart Structures and Materials '97*, International Society for Optics and Photonics, 1997, 293–304.
- [30] Galloway N., Greenough R., Jenner A., Schulze M., *Pressure dependencies of magnetostrictive strain and d coefficient in Terfenol-D after thermal or magnetic annealing*, *Journal of Applied Physics*, 76, 10, 1994, 7163–7165.
- [31] Zhao X., Wu G., Wang J., Jia K., Zhan W., *Stress dependence of magnetostrictions and strains in $\langle 111 \rangle$ -oriented single crystals of Terfenol-D*, *Journal of Applied Physics*, 79, 8, 1996, 6225–6227.
- [32] Kellogg R.A., Flatau A.B., *Blocked force investigation of a Terfenol-D transducer*, [w:] *1999 Symposium on Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 1999, 184–195.
- [33] Park W.J., Kim J.C., Ye B.J., Lee Z.H., *Macroseggregation in Bridgman growth of Terfenol-D and effects of annealing*, *Journal of Crystal Growth*, 212, 1, 2000, 283–290.
- [34] Peterson D., Verhoeven J., McMasters O., Spitzig W., *Strength of Terfenol-D*, *Journal of Applied Physics*, 65, 1989, 3712.
- [35] Snodgrass J.D., McMasters O., *Optimized Terfenol-D manufacturing processes*, *Journal of Alloys and Compounds*, 258, 1, 1997, 24–29.
- [36] Kendall D., Piercy A., *Comparison of the dynamic magnetomechanical properties of $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$ and $Tb_{0.30}Dy_{0.70}Fe_2$* , *Journal of Applied Physics*, 76, 10, 1994, 7148–7150.
- [37] Hall D.L., Flatau A.B., *Nonlinearities, harmonics, and trends in dynamic applications of Terfenol-D*, [w:] *1993 North American Conference on Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 1993, 929–939.
- [38] Flatau A., Faidley L., Calkins F., Dapino M., *Nonlinearities in magnetostrictive transducer dynamic output*, [w:] *APS March Meeting Abstracts*, 1 1997, 2204.
- [39] Faidley L.E., Lund B.J., Flatau A.B., Calkins F.T., *Terfenol-D elasto-magnetic properties under varied operating conditions using hysteresis loop analysis*, [w:] *Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering*, SPIE International Society for Optical Engineering, 1998, 856–866.
- [40] Kondo K., *Dynamic behaviour of Terfenol-D*, *Journal of Alloys and Compounds*, 258, 1, 1997, 56–60.
- [41] Ausanio G., Bonetti E., Iannotti V., Lanotte L., Luponio C., Pasquini L., *Time dependence of magnetization and strain in Terfenol*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242–245, 2002, 1453–1456.
- [42] Bent A.A., *Active fiber composites for structural actuation*, rozprawa doktorska, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [43] *Mide technology – engineering smart technologies*, <http://www.mide.com/> 2013.
- [44] Trease B.P., *A survey and comparison of smart material linear actuators* 2001, dr. Sridhar Kota, Advisor.
- [45] Bomba J., Kaleta J., *Badanie własności cyklicznych materiałów o gigantycznej magnetostrykcji. Stanowisko i metodyka badań*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz–Pieczyska 2002.

- [46] Bomba J., Kaleta J., *An initial investigation into the change in magnetomechanical properties of Terfenol-D rod due to prestress and temperature*, Issue of Material Testers, 2004.
- [47] Kaleta J., Bomba J.M., Lewandowski D., Wiewiórski P., *Smart magnetic materials and magnetoresistive sensors in controlling of mechanical structures*, [w:] *Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 2006, 61670W–61670W.
- [48] Joshi C.H., Bobrov E.S., *Compact, efficient deformable mirrors for space-borne telescopes*, Energen Inc. 2000.
- [49] Du Tremolet de Lacheisserie E., *Magnetostriction: theory and applications of magnetoelasticity*, Boca Raton, Florida: CRC, 1993, 53–55.
- [50] McMasters O.D., Clifford R.R., Weisensel G.N., *Commercial development of terbium-based giant magnetostrictive alloys for cryogenic applications*, rap. tech. 1, ETREMA Products Inc. 1997.
- [51] Bright C., *Better sonar driven by new transducer materials*, Sea Technology, 41, 6, 2000, 17–22.
- [52] *ETREMA Products, Inc.*, <http://etrema-usa.com/> 2012.
- [53] Janocha H., *Application potential of magnetic field driven new actuators*, Sensors and Actuators A: Physical, 91, 1, 2001, 126–132.
- [54] Gerver M.J., Goldie J.H., Swenbeck J.R., Shea R., Jones P., Ilmonen R.T., Dوزير D.M., Armstrong S., Roderick R., Nimblett F.E., et al., *Magnetostrictive water pump*, [w:] *5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 1998, 694–705.
- [55] Friedmann P., Carman G., Millott T., *Magnetostrictively actuated control flaps for vibration reduction in helicopter rotors – design considerations for implementation*, Mathematical and Computer Modelling, 33, 10, 2001, 1203–1217.
- [56] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., *Wpływ naprężeń wstępnych na zjawiska magnetomechaniczne w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji*, [w:] *Mat. II Symp. Mech. Zniszcz. Mat. i Konstr.*, Dział Wyd. i Poligrafii Politechniki Białostockiej, Augustów 2003.
- [57] Bomba J., Kaleta J., *The influence of prestress on magnetomechanical damping in giant magnetostrictive materials*, [w:] *20th DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Győr, Węgry 2003.
- [58] Bomba J., Kaleta J., *Sprawność przekształcania energii w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji*, [w:] *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej*, 78, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003, 47–54.
- [59] Bomba J., Kaleta J., *Giant magnetostrictive materials (GMM) – functional materials for sensors and actuators*, [w:] *AMAS Conference Proceedings*, 2003.
- [60] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., *Application of giant magnetostrictive material into construction of broad spectrum vibration generator*, Materials Science Forum, 482, 2004, 395–398.
- [61] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., *Investigation of magnetostrictive actuator*, [w:] *21st DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Brinji/Pula, Croatia 2004, 14–15.

- [62] Bomba J., Kaleta J., *Modelowanie wpływu naprężeń wstępnych na tłumienie w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji*, [w:] *Mechanika ośrodków niejednorodnych*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego 2005, 15–16.
- [63] Bomba J., Kaleta J., *Modelowanie wpływu naprężeń wstępnych na magnetostrykcję materiałów GMM*, [w:] *Materiały III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji*, Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej, Białystok 2005, 39–42.
- [64] Bomba J., Kaleta J., Lewandowski D., *Experimental methods in testing of smart magnetic materials*, [w:] *22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Monticelli Terme/Parma, Italy 2005.
- [65] Bomba J., Kaleta J., *Przekształcanie energii w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji w następstwie cyklicznego obciążania*, [w:] *Mat. XXI Symp. Zmęcz. i Mech. Pękania*, Wyd. Uczelniane Akad. Tech.-Rol., Bydgoszcz 2006, 43–50.
- [66] Bocian M., Bomba J., Gabrielski P., *Wykorzystanie aktuatora magnetostrykcyjnego do eliminacji drgań w pewnym układzie ciągłym*, [w:] *XXI Konf. Nauk. Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych* 2008.
- [67] Bomba J., Kaleta J., *Tłumienie w Terfenolu-D z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych: eksperyment, modelowanie, identyfikacja*, [w:] *VI-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Augustów–Białystok 2011, 39–40.
- [68] Bomba J., Kaleta J., *Investigation of magnetostrictive sensor in quasi-static conditions*, [w:] *22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Monticelli Terme/Parma, Italy 2005.
- [69] Jiles D., *Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials*, *Journal of Applied Physics*, 76, 10, 1994, 5849–5855.
- [70] Szczygłowski J., *Influence of eddy currents on magnetic hysteresis loops in soft magnetic materials*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 223, 1, 2001, 97–102.
- [71] Venkataraman R., *Modeling and Adaptive Control of Magnetostrictive Actuators*, rozprawa doktorska, University of Maryland 1999.
- [72] O’Handley R.C., *Modern magnetic materials: principles and applications*, 830622677, Wiley, New York 2000.
- [73] *Feonic: Invisible speakers for interactive advertising, augmented reality*, <http://www.feonic.com/> 2013.
- [74] Gabrielski P., *Tłumienie drgań układu mechanicznego za pomocą elementu o gigantycznej magnetorestrykcji*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2007.

Rozdział 4. Kompozyty z udziałem Terfenolu-D

W rozdziale podjęto zagadnienie kompozytów zawierających materiał o tzw. gigantycznej magnetostrykcji (GMM). Wykazano, iż, opisany wcześniej lity Terfenol-D, pomimo swoich zalet (duża magnetostrykcja nasycenia, dobre właściwości dynamiczne) ma wady ograniczające jego zastosowanie. Indukujące się pod wpływem pola magnetycznego prądy wirowe zawężają bowiem zakres efektywnej pracy takich materiałów do częstotliwości rzędu kilku kiloherców. Kolejnym istotnym ograniczeniem litego Terfenolu-D jest jego kruchość i niewielka wytrzymałość na rozciąganie, a także cena. Uzasadniało to potrzebę opracowania nowej grupy materiałów – kompozytów GMM.

Obiektem badań był kompozyt z osnową z żywicy epoksydowej wypełnionej materiałem magnetostrykcyjnym w postaci proszku. Spoiwo żywiczne tworzyło pomiędzy cząsteczkami elektrycznie nieprzewodzącą warstwę, która zredukowała indukowanie się prądów wirowych. Opracowano metodologię wytwarzania kompozytów na bazie proszków z Terfenolu-D. By przeciwdziałać sedymentacji, z powodu różnicy gęstości żywicy i sproszkowanego GMM, zastosowano stymulację polem magnetycznym w fazie wiązania żywicy. Uzyskano w ten sposób polaryzację materiału.

Przeprowadzono badania otrzymanych materiałów i wyznaczono moduł sprężystości wzdłużnej kompozytów o różnej zawartości sproszkowanego GMM. Wyniki porównano z rezultatami dla litego Terfenolu-D oraz samej żywicy. W kolejnym kroku zbadano magnetostrykcję liniową dla kompozytów o dwóch różnych zawartościach objętościowych proszku i porównano z wynikami dla litego Terfenolu-D. Określono ponadto magnetostrykcję objętościową. Test wymagał stworzenia stanowiska badawczego i zastosowania czujników światłowodowych do pomiaru odkształcenia.

Następnie opracowano technologię wytwarzania próbek kompozytowych o różnej polaryzacji i zwiększonej zawartości objętościowej proszku w kompozycji. Zastosowano również inne dodatki ferromagnetyczne (poza sproszkowanym Terfenolem-D). Dla wytworzonych materiałów zbadano wpływ naprężenia wstępnego na wartość magnetostrykcji oraz wyznaczono wartość sprężenia ma-

gnetomechanicznego, przyjmując za jego miarę pole pętli histerezy w układzie współrzędnych magnetostrykcja–napięcie pola magnetycznego. W kolejnym kroku porównano efekt Villariego dla kompozytów i litego Terfenolu-D.

Badania wykazały, iż magnetostrykcja w kompozytach ma mniejszą wartość od referencyjnego materiału litego, ale wciąż jest ona kilkakrotnie większa od wcześniej znanych materiałów cechujących się tym efektem (np. nikiel, kobalt). Ponadto w materiałach tych udało się wyeliminować prądy wirowe oraz zarówno małą wytrzymałość materiału na obciążenia rozciągające, jak również jego kruchość.

Otrzymane rezultaty umożliwiły skonstruowanie i zbadanie aktuatora (z rdzeniem kompozytowym) do zastosowań biomedycznych (w celu stymulacji tkanki kostnej podczas leczenia nierównomiernej długości kończyn z użyciem aparatu Lizarowa). Rozdział zakończono sugestiami w zakresie zasadności i kierunków dalszych badań.

4.1. Wprowadzenie. Kompozyty z użyciem Terfenolu-D

Opisany uprzednio lity Terfenol-D, pomimo swoich zalet (duża magnetostrykcja nasycenia, dobre właściwości dynamiczne) ma jednak pewne wady ograniczające jego zastosowanie. Indukujące się pod wpływem pola magnetycznego prądy wirowe zawężają zakres pracy materiału do częstotliwości rzędu kilku kiloherców. Przy wyższych częstotliwościach, prądy wirowe stają się tak duże, że materiał zaczyna się zbyt mocno nagrzewać, co wpływa negatywnie na magnetostrykcję [1]. Indukujące się za sprawą prądów wirowych pole magnetyczne (działające przeciwnie do pola przyłożonego) powoduje straty i zmniejsza sprawność przekształcania energii. Kolejną istotną wadą litego Terfenolu-D jest jego kruchość i niewielka wytrzymałość na rozciąganie. Stwarza to trudności w jego przemysłowym zastosowaniu, a w szczególności w urządzeniach wykorzystujących rezonans, w którym naprężenie rozciągające miałyby przekroczyć granicę wytrzymałości Terfenolu-D. Poważnym ograniczeniem jest również cena materiałów o gigantycznej magnetostrykcji, utrzymująca się na poziomie 5 \$/1 g. Wymienione wcześniej wady przyczyniły się do opracowania nowej grupy materiałów – kompozytów GMM. W kompozytach tych osnową jest najczęściej żywica epoksydowa [2, 3] (lub poliuretanowa [4, 5]) wypełniona materiałem magnetostrykcyjnym w postaci proszku, pręcików lub płatków [6]. Spoiwo żywiczne tworzy pomiędzy cząsteczkami elektrycznie nieprzewodzącą warstwę, która znacznie redukuje obszar indukowania się prądów wirowych. Umożliwia to stosowanie materiału kompozytowego do pracy w częstotliwościach znacznie przekraczających możliwości materiału litego.

Dodatkowymi zaletami kompozytów jest ich wytrzymałość na rozciąganie, a także prostota formowania dowolnych kształtów.

4.2. Przegląd literatury przedmiotu i cele badań własnych

Wskazane uprzednio mankamenty litych materiałów o gigantycznej magnetostrykcji spowodowały, że wiele ośrodków badawczych zaczęło poszukiwać rozwiązań, dzięki którym możliwe byłoby przezwyciężenie wad materiału litego, jednocześnie zachowując jak najwięcej właściwości materiału podstawowego. Takie podejście do tematu powinno umożliwić wykorzystanie tych materiałów w różnych dziedzinach nowoczesnej techniki. Do najważniejszych z oczekiwanych zalet można zaliczyć [7–10]:

- brak lub bardzo niewielki wpływ temperatury na właściwości fizyczne materiału,
- wysoką temperaturę przejścia fazowego (temperatura Curie), dzięki czemu możliwe będzie stosowanie materiału w szerokim zakresie temperatury,
- zmniejszenie kruchości materiału, co ułatwi jego kształtowanie, w tym wytwarzanie cienkich warstw,
- zapewnienie odporności na korozję materiału w różnym środowisku, zwiększając tym samym zakres aplikacyjny,
- uproszczenie techniki wytwarzania materiału, biorąc pod uwagę to, iż wytworzenie materiału litego jest zabiegiem trudnym i kosztownym.

Początkowe badania, mające doprowadzić do uzyskania opisanych właściwości, prowadzone były w głównej mierze nad modyfikacją składu materiału litego, między innymi przez domieszkowanie Terfenolu-D miedzią w różnej postaci [11]. Modyfikacje te nie przyniosły jednak oczekiwanych efektów, głównie ze względu na to, że, mimo zwiększenia wytrzymałości materiału, w znaczny sposób zmniejszała się jego magnetostrykcja, osiągając tylko do 18% wartości magnetostrykcji materiału litego. Inne prace, mające na celu zmniejszenie wcześniej opisanych wad materiału litego, skupiały się w głównej mierze na zmianie stężenia poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład Terfenolu-D oraz dodawanie innych pierwiastków $\text{Pr}_{0,15}\text{Tb}_{0,3}\text{Dy}_{0,55}\text{Fe}_2$ [12], $\text{Tb}_{0,27}\text{Dy}_{0,73}(\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x)_2$ ($x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$) [13], $\text{Tb}_{0,27}\text{Dy}_{0,73}\text{Fe}_2\text{B}_x$ ($x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$) [14], $\text{Tb}_{0,3}\text{Dy}_{0,7-x}\text{Pr}_x(\text{Fe}_{0,9}\text{Al}_{0,1})_{1,95}$ [15]. Wyniki tych badań pokazały jednak, że pomimo dużej wartości magnetostrykcji oraz ograniczenia w nich anizotropowości, wciąż były to materiały charakteryzujące się małą rezystywnością, a co za tym idzie, w trakcie pracy w zmiennym polu magnetycznym, nadal generowały się w nich duże prądy wirowe. Wada ta często uniemożliwia stosowanie tych materiałów

w urządzeniach pracujących z dużą częstotliwością powyżej 10, 20 kiloherców lub należy się liczyć, że sprawność takich urządzeń będzie mniejsza od zakładanej.

Wyjściem naprzeciw oczekiwaniom rynku było poszukiwanie nowego rodzaju materiału niekoniecznie w postaci stopu, lecz raczej w postaci kompozytu. Materiał kompozytowy zgodnie z definicją składa się przynajmniej z dwóch składników, z których każdy z osobna ma inne właściwości, a po połączeniu tworzą materiał o właściwościach lepszych lub innych od każdego ze składników z osobna. Jedne z pierwszych prac, w których autorzy zdecydowali się na wytwarzanie kompozytów dotyczyły proszku materiału magnetostrykcyjnego umieszczonego w niemagnetycznej osnowie aluminium [16], miedzi [16, 17] lub szkła [2, 18]. O ile w większości z tych prac udało się zminimalizować wadę materiału litego, jaką jest jego duża kruchość, o tyle zastosowanie matrycy przewodzącej, takiej jak aluminium oraz miedź, nie spowodowało zmniejszenia prądów wirowych. Co ważne, w każdej z tych prac osiągnięta maksymalna wartość magnetostrykcji materiału kompozytowego była drastycznie mniejsza niż magnetostrykcji materiału litego. W pracy [18] pokazano, że dobrym rozwiązaniem może być zastąpienie dotychczasowych matryc materiałem polimerowym. W tym przypadku porównano wyniki uzyskiwanej magnetostrykcji dla kompozytów o takiej samej zawartości objętościowej proszku materiału magnetostrykcyjnego, natomiast o dwóch różnych matrycach, z których jedna była szklana, druga była wykonana z żywicy epoksydowej. Wyniki pokazały, że w przypadku materiału opartego na żywicy epoksydowej uzyskana magnetostrykcja była znacznie większa w porównaniu z matrycą szklaną. Wiąże się to głównie z właściwościami materiałów polimerowych, które w dużej mierze dobrze wiążą się z powierzchniami różnego rodzaju innych materiałów, dzięki czemu są w stanie zapewnić dobre przekazywanie obciążenia mechanicznego [19, 20]. Dodatkowym atutem matrycy polimerowej jest to, że jest ona nieprzewodząca, dzięki czemu w dobry sposób oddziela od siebie poszczególne cząsteczki materiału metalicznego, a co za tym idzie, zmniejsza straty od prądów wirowych w przypadku pracy materiału w wyższych częstotliwościach. Ponadto materiały polimerowe pracują w większym obszarze sprężystym [21–23].

Prace prowadzone nad magnetostrykcyjnymi materiałami kompozytowymi na podstawie matrycy polimerowej są prowadzone od niedawna. Najwcześniejsze doniesienia na temat tego typu materiałów pochodzą z początku lat 90. XX wieku. W pracach [24] z 1994 roku oraz [25] z roku 1996 autorzy zauważyli, że warstewka polimeru, która powstała między cząsteczkami Terfenolu-D, w trakcie wytwarzania materiału kompozytowego spowodowała zmniejszenie strat od indukujących się w materiale prądów wirowych, nawet sześciokrotnie w porównaniu z materiałem litym. W dalszej kolejności prac nad rozwojem tego typu materiałów skupiono się głównie na zawartości proszku materiału magnetostrykcyjnego w kompo-

zycie; i tak w pracy [3] celem było uzyskanie możliwie dużej magnetostrykcji w przypadku zastosowania niewielkiej ilości Terfenolu-D, maksymalnie do 50% zawartości objętościowej. Do głównych zalet kompozytów należy przede wszystkim możliwość dowolnego kształtowania materiału zarówno w trakcie jego wytwarzania, jak i po zakończonym procesie wiązania matrycy. Ponadto technologia wytwarzania nie nastęrcza dużych problemów, jest stosunkowo tania i w prosty sposób może zostać zaadaptowana do warunków przemysłowych. Dodatkowo w trakcie wytwarzania materiałów kompozytowych wykorzystuje się właściwość matrycy polimerowej, jaką jest skurcz pojawiający się podczas jej wiązania. O ile w większości przypadków jest to właściwość zazwyczaj niepożądana, o tyle w przypadku materiałów magnetostrykcyjnych cecha ta powoduje, że Terfenol-D jest poddawany wstępnemu naprężeniu już na etapie wiązania materiału, co ogranicza konieczność stosowania zewnętrznego naprężenia wstępnego tak bardzo pożądanego w przypadku materiału litego, a które zapewnia odpowiednie zorientowanie domen w materiale [16, 26, 27]. Przedstawione cechy nowych, kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych były załączkiem kolejnych prac nad rozwojem i udoskonalaniem tego typu materiałów przez różne modyfikacje, m.in.:

- łączenie proszku [12, 18, 28–33] lub włókien [6] materiału magnetostrykcyjnego z materiałem polimerowym,
- łączenie proszku Terfenolu-D z materiałem polimerowym i orientowanie cząstek za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego [3, 28, 32, 34–39], wykorzystania materiałów, w których cząstki magnetostrykcyjne mają uprzywilejowany kierunek magnesowania [6, 40, 41],
- tworzenie materiałów warstwowych [42, 43], w tym cienkich warstwy z ukierunkowaniem na wytwarzanie struktur MEMS [44–47],
- wytwarzanie tzw. materiałów hybrydowych, gdzie materiał magnetostrykcyjny łączony jest z innym materiałem Smart (najczęściej piezoelektrycznym [48–52],
- wytwarzanie materiałów kompozytowych, w których stelaż wykonany z materiału magnetostrykcyjnego przesycany jest matrycą polimerową [35, 53].

Opierając się na pracach [6, 54] można stwierdzić, że magnetostrykcyjne materiały kompozytowe, w których cząsteczki Terfenolu-D zostały umieszczone losowo mają wiele zalet, do których w szczególności należy zwiększenie zakresu częstotliwości pracy materiału, zmniejszenie masy oraz kosztów samego materiału w porównaniu z materiałem litym. Ponadto materiały te mogą być stosowane w różnego rodzaju układach sterowania z tym zastrzeżeniem, że maksymalna wartość uzyskiwanej magnetostrykcji stanowi około 80% magnetostrykcji materiału litego. W celu zwiększenia uzyskiwanej magnetostrykcji w materiale kompozytowym, w trakcie procesu wiązania matrycy stosowano polaryzację w polu magnetycznym cząstek materiału magnetostrykcyjnego. Takie zabiegi powodowały, że w trakcie

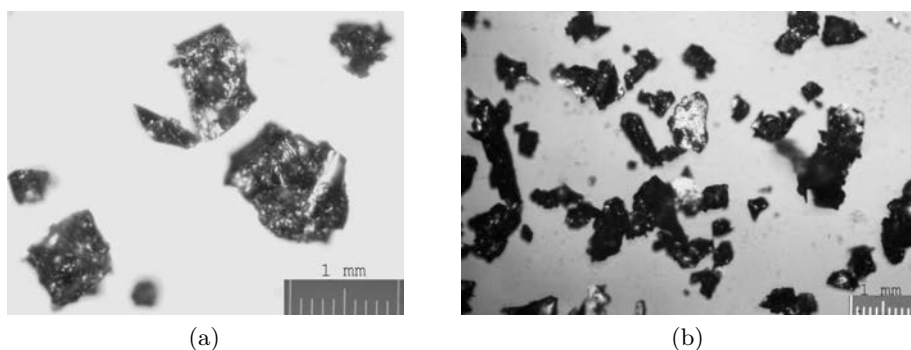
pracy materiału w zewnętrznym polu magnetycznym przekazywane odkształcenie jest efektywniejsze [34]. Na podstawie przeanalizowanych prac można stwierdzić, że na ostateczne właściwości materiału kompozytowego duży wpływ ma typ matrycy oraz sposób wytwarzania samego materiału kompozytowego. Wśród prac odnoszących się do polimerowych kompozytów magnetostrykcyjnych przeważają te, w których za matrycę stosuje się żywicę epoksydową [2, 3, 29, 32, 34, 36, 55], jednak są prowadzone prace również z innymi rodzajami matryc, w tym żywicami typu fenolowego [2, 56, 57], termoplastycznymi elastomerami [23, 31, 58] czy żywicami winylowo-estrowymi [40, 59]. Obecnie prowadzone prace badawcze skupiają się głównie nad badaniem właściwości magnetomechanicznych magnetostrykcyjnych materiałów kompozytowych, do najważniejszych z nich należą:

- wielkość uzyskiwanej magnetostrykcji w funkcji natężenia przyłożonego pola magnetycznego [60],
 - wpływ zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D w matrycy na magnetostrykcję kompozytu [61, 62],
 - wpływ naprężenia wstępnego σ_0 na magnetostrykcję [3, 34, 36, 37, 56],
 - wpływ kąta polaryzacji cząsteczek w trakcie wiązania matrycy polimerowej na wielkość magnetostrykcji [63],
 - wielkość strat w wyniku indukowania się prądów wirowych w materiale [8, 64].
- Mając na uwadze rezultaty analizy literatury przedmiotu przyjęto następujące cele badań własnych, a mianowicie:
- opracowanie procedury wytwarzania wybranego typu kompozytów magnetostrykcyjnych na bazie proszków Terfenolu-D,
 - wytworzenie próbek kompozytowych, w tym o różnej polaryzacji oraz zróżnicowanej zawartości objętościowej Terfenolu-D w matrycy,
 - stworzenie stanowiska i opracowanie metodyki badania kompozytów,
 - opracowanie technologii i wytwarzanie próbek kompozytowych zawierających inne dodatki, poza proszkiem Terfenolu-D,
 - przeprowadzenie badań magnetostrykcji,
 - zbadanie właściwości magnetycznych.

4.3. Metodologia wytwarzania kompozytów z zastosowaniem proszków z Terfenolu-D

4.3.1. Wstępne opracowanie procedury wytwarzania kompozytów

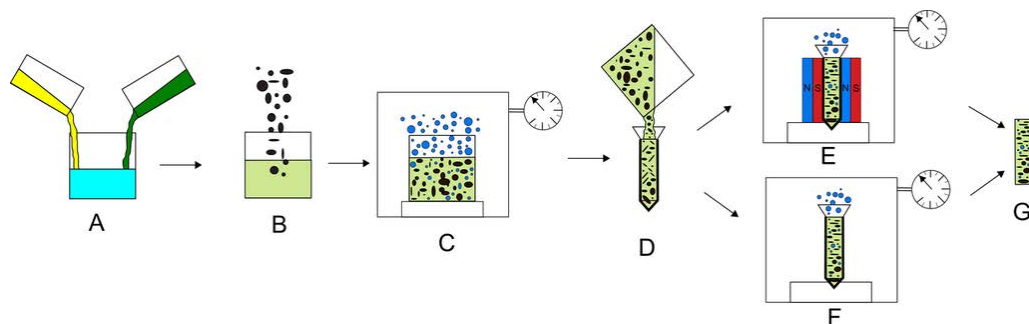
Ze względu na to, iż w przeważającej liczbie prac dotyczących wytwarzania i badań kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych stosowano za matrycę żywicę epoksydową, zdecydowano, że w przypadku prac własnych również ten



Rys. 4.1. Proszek Terfenolu-D – zdjęcia z mikroskopu świetlnego [65]

rodzaj żywicy posłuży jako baza do produkcji materiałów kompozytowych. Należy jednak nadmienić, że w pracach tych zazwyczaj nie opisywano szczegółowo metodologii wytwarzania kompozytów magnetostrykcyjnych oraz nazw stosownych żywic. Ze względu na to założono przede wszystkim opracowanie metodologii wytwarzania kompozytów na bazie materiału o gigantycznej magnetostrykcji. Materiały bazowe, które były niezbędne do wykonania pierwszych prób wytworzenia kompozytu, takie jak żywica epoksydowa oraz proszek magnetostrykcyjny, zostały zakupione. Kompozyt magnetostrykcyjny wykonano przez połączenie ze sobą dwóch podstawowych składników: żywicy epoksydowej oraz proszku z materiału magnetostrykcyjnego. W pierwszym etapie wytwarzania przygotowano żywicę epoksydową, która służyła jako osnowa dla całego kompozytu, a następnie do przygotowanej cieczy dosypano odmierzoną wcześniej ilość proszku z materiału magnetostrykcyjnego. Za materiał matrycy posłużyła żywica epoksydowa L-1000 produkowana przez firmę R & G Faserverbundwerkstoffe GmbH. Do wypełnienia ferromagnetycznego zastosowano proszek Terfenolu-D zakupiony w Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co., Ltd. Wielkość ziaren, zgodnie z danymi producenta, wynosiła 0–300 μm . Kształt i wielkość ziaren pokazano na rysunku 4.1. Na załączonych zdjęciach widać, że drobin proszku mają zróżnicowaną wielkość oraz że ich kształt jest nieregularny, a krawędzie są ostre i poszarpane, a także, nie mają właściwie wyróżnionego żadnego z kierunków, co może świadczyć o tym, że proszek został wytworzony z litego kawałka Terfenolu-D przez jego kruszenie lub inny rodzaj obróbki mechanicznej (np. skrawanie).

Żywica i utwardzacze zostały zmieszane w stosunku wagowym 100:30. Zastosowano dwa typy utwardzaczy. Wydłużenie czasu wstępnego wiązania do około 40 minut umożliwiło poprawne wykonanie wszystkich operacji wytwarzania kompozytu. Masę wstawiono do komory próżniowej, aby odessać powietrze wprowadzone do żywicy w trakcie jej mieszania. Odpowietrzoną mieszaninę przelano do wcze-



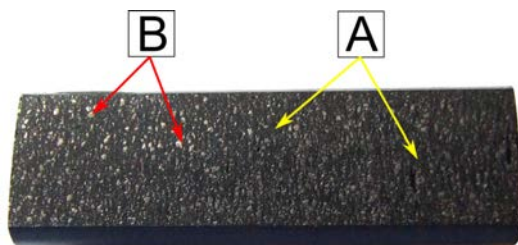
Rys. 4.2. Schemat procedury wytwarzania kompozytów: A – mieszanie składników bazowych matrycy, B – dodawanie proszku Terfenolu-D, C – odgazowywanie, D – formowanie kształtów próbek, E i F – końcowe odgazowywanie oraz ewentualna obróbka magnetyzująca wiązanie matrycy, G – gotowa próbka materiału



Rys. 4.3. Forma zastosowana do wytwarzania kompozytu: 1 – tuleja z PVC (część uszczelniająca), 2 – obudowa kompozytowa (część wytrzymałościowa) [66]

śniej przygotowanych form pokazanych na rysunku 4.3. Kształt form dobrano w taki sposób, aby uzyskać próbki walcowe o średnicy $\phi = 10$ mm i długości 70 mm. Następnie formy wraz z mieszaniną po raz kolejny wstawiono do szczelnie zamkniętej komory w celu odessania powietrza, które mogło zostać na dnie formy lub mogło się dostać do żywicy w trakcie zalewania. Ze względu na dużą różnicę w gęstości matrycy oraz proszku Terfenolu-D, zdecydowano, że celowe będzie umieszczenie materiału w niewielkim polu magnetycznym, co miało za zadanie zapobiegać sedymentacji materiału w trakcie wiązania żywicy, a co za tym idzie nierównomiernemu rozłożeniu proszku materiału magnetostrykcyjnego wzdłuż długości próbki kompozytowej. Schemat procesu pokazano na rysunku 4.2.

Po zestaleniu się żywicy przygotowane próbki zostały wyjęte z pojemników i poddane wstępnym oględzinom, dzięki którym można było odpowiedzieć na pytanie, czy opracowana procedura wytwarzania kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych jest prawidłowa, to znaczy czy na zewnętrznych powierzchniach



Rys. 4.4. Zgląd próbki testowej wzdłuż jej głównej osi: A – matryca, B – cząstki proszku Terfenolu-D [66]

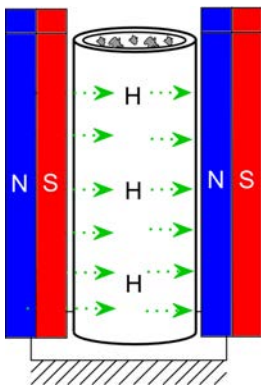
próbki nie widać żadnych nieciągłości, widocznych wtrąceń w postaci pęcherzyków powietrza, które mogły pozostać wewnątrz materiału ze względu na zbyt krótki czas wiązania żywicy. Ponadto należało sprawdzić, czy zastosowana metoda „podtrzymania magnetycznego” cząsteczek Terfenolu-D była odpowiednia i nie nastąpiła aglomeracja cząsteczek w okolicach części końcowych próbki. W celu przeprowadzenia tego badania wytworzone próbki zostały wyrównane na obu powierzchniach czołowych, a po wstępnych pozytywnych wynikach oględzin (na powierzchniach czołowych rozłożenie cząsteczek proszku Terfenolu-D było równomierne) przecięte wzdłuż głównej osi. Na rysunku 4.4 pokazano zdjęcie zglądu wzdłużnego jednej z wykonanych próbek. Zaobserwować można na nim wyraźnie, że cząsteczki proszku są równomiernie rozłożone wzdłuż całej długości próbki kompozytowej. Z jednej i drugiej strony próbki widoczny jest brak dużych aglomeracji drobinek proszku GMM, czego można się było obawiać biorąc pod uwagę czas pełnego wiązania żywicy, wynoszący 24 h. Poza tym zastosowane pole magnetyczne sprawiło, że widoczne są na przekroju linie utworzone przez cząsteczki proszku. Badania potwierdziły ponadto, iż na całej długości zglądu nie występują duże wtrącenia lub otwory.

4.3.2. Kompozyty do badań właściwości magnetomechanicznych

Po wykonanych badaniach zarówno zewnętrznej, jak i wewnętrznej struktury wytworzonych próbek testowych uznano, że opracowana metodologia wytwarzania magnetostrykcyjnych próbek kompozytowych jest prawidłowa i przystąpiono do wytworzenia właściwych próbek, które w kolejnym kroku miały zostać poddane badaniom ich właściwości magnetomechanicznych. Ze względów praktycznych zdecydowano jednak na zmianę typu żywicy epoksydowej. Zastosowano nowy typ żywicy o oznaczeniu Epolam 2015, produkowanej przez firmę Axson Technologies. Żywica ta ma podobne właściwości mechaniczne do wcześniej użytej żywicy L-1000, natomiast kluczowymi parametrami, które miały znaczenie podczas wyboru nowej osnowy, były:

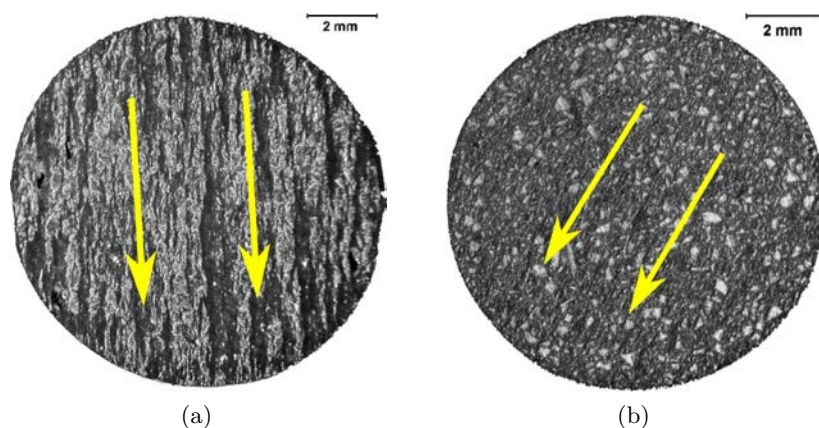
- mniejsza lepkość, co umożliwiło dokładniejsze wymieszanie wszystkich składników w trakcie produkcji oraz łatwiejsze przelanie wytworzonej mieszaniny do przygotowanych form,
- większa zwilżalność, co ułatwiło lepsze połączenie osnowy z proszkiem oraz dało podstawy do uzyskania kompozytów ze zwiększoną zawartością proszku GMM, co z kolei zostało szczegółowo opisane w dalszej części rozdziału,
- ograniczenie liczby utwardzaczy do jednego, co ułatwiło dobór parametrów mieszaniny w trakcie procesu wytwórczego,
- redukcja czasu potrzebnego na całkowite związanie żywicy z jednoczesnym utrzymaniem czasu wiązania wstępnego,
- odporność żywicy na wilgoć, co stanowiło ochronę dla drobin proszku materiału GMM, łatwo korodującego pod wpływem wody.

Nowe próbki kompozytowe zostały wytworzone zgodnie z opisanym uprzednio procesem wytwarzania. Podobnie jak podczas wytwarzania wcześniejszych próbek testowych, również w tym przypadku zdecydowano, że zostanie zastosowane wstępne podtrzymanie cząsteczek (polaryzacja) za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego, głównie ze względu na fakt, iż nowy typ żywicy miał małą lepkość. Schemat polaryzacji zaprezentowano na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Schemat polaryzacji wytworzonych próbek kompozytowych. Zielone strzałki pokazują kierunek działania pola magnetycznego oznaczonego jako H [66]

Ponadto zdecydowano się na wytworzenie dwóch rodzajów próbek kompozytowych różniących się między sobą zawartością objętościową proszku Terfenolu-D. W rezultacie otrzymano próbki kompozytowe zawierające objętościowo w swoim składzie odpowiednio 35% i 46% proszku materiału GMM. Otrzymane próbki zostały poddane badaniom mikroskopowym w celu określenia ich struktury wewnętrznej. Mikroskopowe zdjęcia zglądów poprzecznych próbek zostały przedstawione na rysunku 4.6a i 4.6b, odpowiednio dla próbek zawierających 35% i 46% proszku Terfenolu-D. W przypadku kompozytów zawierających w swoim



Rys. 4.6. Zgłady poprzeczne wykonanych próbek kompozytowych zawierających objętościowo: a) 35% proszku Terfenolu-D, b) 46% proszku Terfenolu-D. Żółte strzałki wskazują kierunek, w jakim nastąpiła polaryzacja magnetyczna w trakcie procesu wiązania żywicy [67]

składzie mniejszą ilość proszku GMM (rys. 4.6a) wyraźnie widoczne są linie, jakie zostały utworzone przez drobiny proszku w trakcie procesu wiązania żywicy, gdy zastosowano polaryzację polem magnetycznym, prostopadle do głównej osi próbki. Obraz ten jest bardzo zbliżony do widoku pokazanego dla próbki testowej na rysunku 4.4. Dla próbki o zawartości objętościowej proszku GMM wynoszącej 46% – linie polaryzacji, utworzone przez drobiny proszku, są bardzo trudno zauważalne (określa je kierunek strzałki na rysunku 4.2B). Brak wyraźnych linii polaryzacji jest spowodowany mniejszą możliwością ruchu drobin proszku w wytworzonym kompozycie w trakcie procesu wiązania żywicy. Natomiast, co ważne, zastosowane pole magnetyczne było wystarczająco silne, aby, podobnie jak w przypadku próbki o mniejszej zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D, podtrzymać proszek zapobiegając jego sedymentacji i nierównomiernemu rozłożeniu wzdłuż długości próbki.

4.4. Właściwości magnetomechaniczne

4.4.1. Moduł sprężystości wzdłużnej

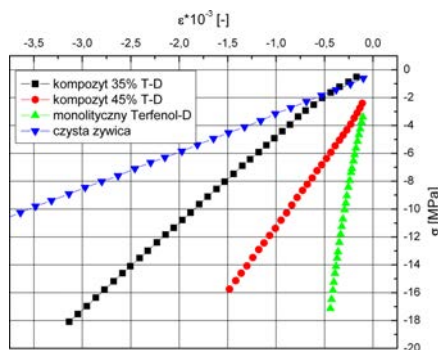
Jako pierwsze przeprowadzono badania właściwości mechanicznych wytworzonych próbek kompozytowych, a także, dla porównania, czystej próbki wykonanej z żywicy epoksydowej i referencyjnej próbki pomiarowej wykonanej z litego materiału Terfenolu-D. Moduł Younga wyznaczono w trakcie statycznej próby

ściskania. Uzyskane wyniki zaprezentowane zostały na rysunku 4.7. Na podstawie przedstawionych rezultatów można stwierdzić, że moduł Younga materiałów kompozytowych w głównej mierze zależy od zawartości objętościowej proszku materiału GMM w próbce i wraz ze wzrostem fazy twardej w kompozycie zwiększa się jego wartość.

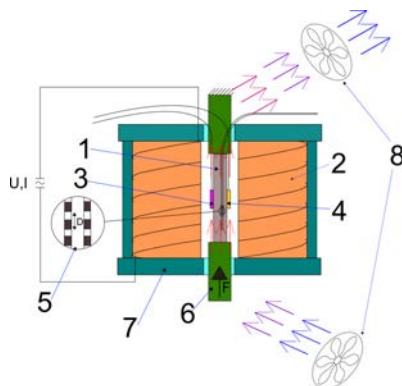
Po wykonanym badaniu modułu Younga, wytworzone próbki kompozytowe przygotowane zostały do pomiarów magnetostrykcji oznaczanej w dalszej części jako $\Delta\lambda$ lub w przypadku maksymalnych uzyskiwanych wartości magnetostrykcji $\Delta\lambda_{\max}$.

4.4.2. Stanowisko badawcze

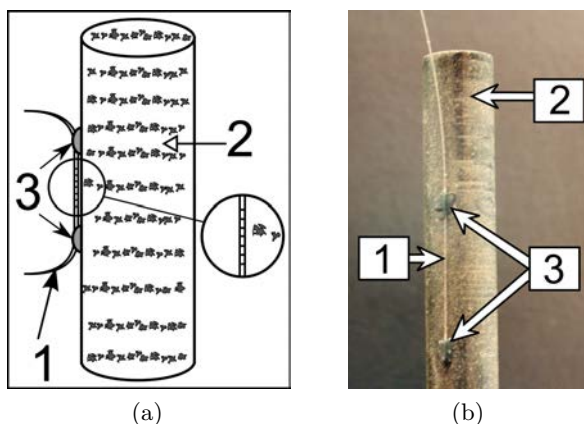
W celu określenia wartości uzyskiwanej magnetostrykcji w wytworzonym materiale kompozytowym konieczne było zestawienie odpowiedniego stanowiska badawczego. Stanowisko miało zapewnić możliwość wyznaczenia magnetostrykcji materiałów kompozytowych, a także materiału referencyjnego, jakim był lity Terfenol-D w zależności od przyłożonego pola magnetycznego. Główną częścią stanowiska był obwód elektromagnetyczny, w którego skład wchodziła cewka zamknięta w specjalnie przygotowanej do tego celu stalowej obudowie. Całość była zasilana za pomocą stabilizowanego zasilacza prądu stałego. Prąd płynący przez cewkę powodował generowanie się w jej wnętrzu pola magnetycznego o stałej wartości, natomiast równocześnie zewnętrzna obudowa służyła jako magnetowód i miała za zadanie zmniejszyć rozptył strumienia magnetycznego na zewnątrz oraz zwiększyć natężenie pola magnetycznego H wewnątrz cewki. Średnica otworu w cewce wynosiła $\varnothing = 13$ mm i została tak dobrana, aby można w niej było umieścić wytworzone próbki kompozytowe oraz niezbędne czujniki w postaci światłowodowego czujnika odkształcenia z siatką Bragga, czujnika temperatury i czujnika natężenia pola magnetycznego. Jednocześnie zapewniono, że wytwor-



Rys. 4.7. Wyniki statycznej próby ściskania w celu wyznaczenia modułu Younga [67]



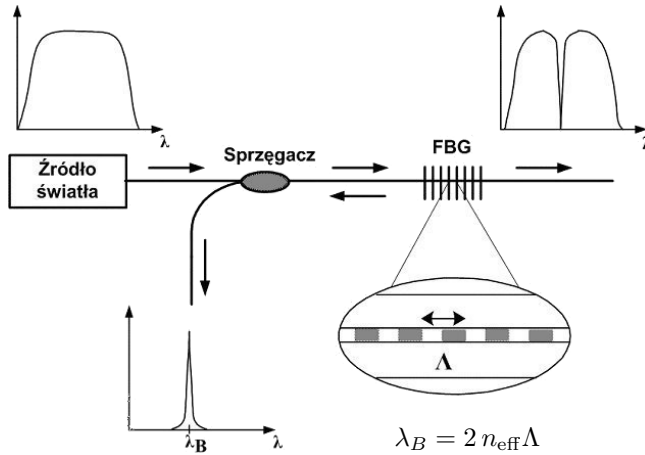
Rys. 4.8. Schemat pomiarowy stanowiska, gdzie: 1 – badana próbka kompozytu magnetostrykcyjnego, 2 – cewka, 3 – czujnik pola magnetycznego (hallotron), 4 – czujnik temperatury DS18B20, 5 – czujnik odkształcenia (siatki Bragga), standardowa siatka pracująca w pierwszym oknie telekomunikacyjnym (ok. $850\ \mu\text{m}$ w pokryciu ORMOCER), 6 – MTS, 7 – stalowa obudowa, 8 – układ chłodzenia [68]



Rys. 4.9. Sposób rozmieszczenia czujników odkształcenia na próbce: a) schemat: 1 – czujnik, 2 – kompozyt, 3 – klej; b) zdjęcie obiektu rzeczywistego [65]

rzne pole magnetyczne w maksymalnym stopniu oddziaływało na umieszczoną wewnątrz próbkę. Schemat stanowiska badawczego w jego części pomiarowej przedstawiono na rysunku 4.8; umiejscowienie czujników odkształcenia na próbce zostało przedstawione na rysunku 4.9a i 4.9b.

Powodem użycia czujników FBG (ang.: *Fiber Bragg Grating*) do pomiaru odkształcenia były ich niewielkie wymiary geometryczne oraz odporność na zakłócenie elektromagnetyczne. Ma to kluczowe znaczenie w przypadku badań



Rys. 4.10. Zasada działania siatki Bragga [70]

w warunkach stymulacji silnym polem magnetycznym (wyniki z innych czujników, takich jak np. tensometry, w których rejestruje się zmianę wielkości elektrycznej mogą być niewiarygodne ze względu na pojawiające się duże zakłócenia). FBG to struktura wytworzona w rdzeniu jednomodowego włókna światłowodowego, charakteryzująca się periodycznymi zmianami wartości współczynnika załamania [69]. Zasadę działania siatki Bragga przedstawiono na rysunku 4.10.

Zmiany współczynnika załamania powstają na skutek naświetlania domieszkowanego germanem włókna światłowodowego promieniowaniem UV. Periodyczne zaburzenia rozkładu współczynnika załamania światła, występujące wzdłuż osi światłowodu, powodują, iż część transmitowanego światłowodem promieniowania optycznego jest odbijana od struktury siatki, a pozostała jego część jest propagowana wzdłuż rdzenia światłowodu. Długość fali odbitej od siatki Bragga, tzw. fala Bragga (λ_B) jest opisana zależnością [70]:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (4.1)$$

gdzie:

λ_B – długość fali Bragga,

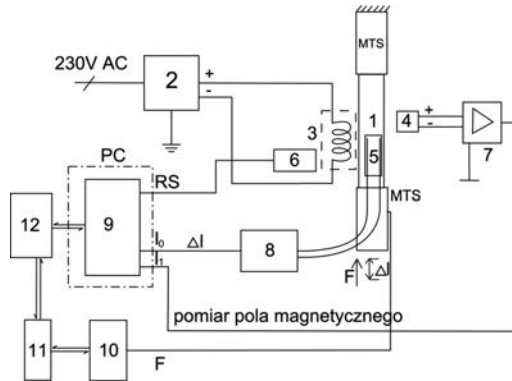
n_{eff} – efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu,

Λ – stała siatki Bragga.

Długość odbijanej od siatki fali Bragga zależy od efektywnego współczynnika załamania rdzenia światłowodu oraz od stałej siatki. Przesunięcie długości fali może być efektem wpływu temperatury oraz wydłużenia względnego jednocześnie:

$$\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \quad (4.2)$$

gdzie:



Rys. 4.11. Schemat ideowy układu akwizycji i przetwarzania danych: 1 – badana próbka, 2 – zasilacz stabilizowany (DF1730SL20A), 3 – obwód magnetyczny, 4 – czujnik hallotronowy ($H = 1 \text{ mV}/10 \text{ kA/m}$), 5 – czujnik odkształcenia (siatka Bragga), 6 – czujnik temperatury (DS12B20), 7 – wzmacniacz pomiarowy (AD624BD G500), 8 – SPU (*signal processing unit*), 9 – karta MeasurementBoards PCI-DAS1602/16, 10 – kontroler MTS FlexTest GT, 11 – panel kontrolny MTS, 12 – Agilent VEE v 5.0 panel użytkownika [67]

$K_\varepsilon = \delta\lambda/\delta\varepsilon$ – czułość odkształceniowa; związana ze zmianą współczynnika załamania pod wpływem naprężeń (efekt fotoelastyczny) oraz okresu siatki wynikającą ze zmian rozmiarów włókna (ściskanie, rozciąganie),

$K_T = \delta\lambda/\delta T$ – czułość temperaturowa; związana ze zmianą okresu siatki wynikającą z rozszerzalności cieplnej materiału oraz efektu termooptycznego, czyli zmianie współczynnika załamania pod wpływem temperatury.

Szerzej metodę pomiaru z użyciem FBG zaprezentowano w pracy [71]. Wpływ temperatury na pomiar odkształcenia skompensowano przez zastosowanie drugiej siatki Bragga oraz mechanicznej wentylacji. Schemat stanowiska badawczego, jego części pomiarowej i układ akwizycji przedstawiono na rysunku 4.11.

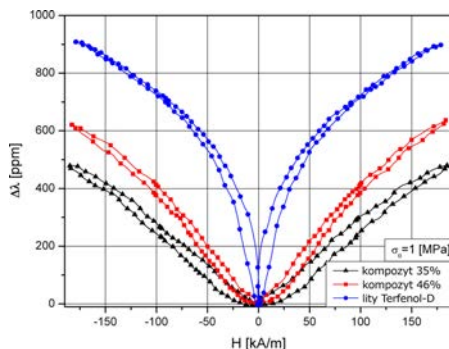
4.4.3. Pomiar magnetostrykcji

Ze względu na to, iż zdecydowano się na pomiar magnetostrykcji w zależności od kilku parametrów jednocześnie, m.in.: od wartości natężenia pola magnetycznego, jak i naprężenia wstępnego zadawanego w materiale kompozytowym, wymagał on użycia i koordynacji wielu elementów, a jego realizacja przebiegała w następujący sposób. Do każdej z próbek zamocowany został światłowodowy czujnik odkształcenia z siatką Bragga. Czujnik naklejano na zewnętrzną powierzchnię próbki walcowej, wzdłuż głównej osi i poddawano odkształceniu wstępnemu wynoszącemu $1000 \mu\text{str}$ (ang.: *microstrain*, $\varepsilon = 1 \mu\text{str} = 1 \times 10^{-6}$), zabieg ten był konieczny ze względu na to, że naprężenie wstępne było zadawane

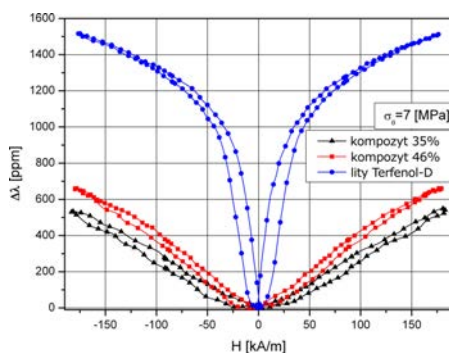
w materiale przez przyłożenie do niego siły ściskającej i nienapreżony wstępnie czujnik mógłby w najgorszym przypadku poluzować się, co byłoby równoznaczne z brakiem możliwości pomiaru odkształcenia. Dodatkowo równolegle zamocowano czujnik zmiany temperatury oraz natężenia pola magnetycznego, który mierzył wartość pola magnetycznego wzdłuż głównej osi próbki, zgodnie z teoretyczną linią rozptyłu pola magnetycznego wewnątrz cewki. Tak przygotowaną próbkę umieszczono w cewce i obciążono napreżeniem wstępnym σ_0 wynoszącym 1 MPa. Obciążenie zadawane było za pomocą dwóch walców wykonanych z aluminium, które były zamocowane w szczękach maszyny wytrzymałościowej MTS. Maszynę sterowano numerycznie, dzięki czemu możliwe było utrzymanie stałego obciążenia próbki przez cały czas trwania pomiarów. Ułatwiło to wykonanie pomiaru odkształcenia próbki, niezależnie od zamontowanego czujnika światłowodowego z siatką Bragga. Sterowanie jedynie obciążeniem próbki ułatwiało jej swobodne odkształcanie pod wpływem zmian pola magnetycznego, a zwłaszcza zmiany pola magnetycznego nie mogły być ani szybkie, ani gwałtowne, co było związane z układem sprzężenia zwrotnego, w jakim pracuje maszyna wytrzymałościowa, i parametrami sterowania PID. Po zbyt szybkich zmianach pola magnetycznego odkształcenie próbki następowałoby bowiem szybciej od zmiany obciążenia na maszynie wytrzymałościowej, powodując zaburzenie pomiaru dla stałej wartości napreżenia wstępnego. Za pomocą stabilizowanego zasilacza obciążano cewkę natężeniem prądu w przedziale natężenia $I = 0-9$ A. Zmianę w natężeniu pola magnetycznego uzyskiwano przez ręczne sterowanie natężeniem prądu z zasilacza. Zmiany w natężeniu pola magnetycznego wokół próbki były rejestrowane przez umieszczony w szczelinie, pomiędzy cewką a próbką, czujnik pola magnetycznego.

Uzyskane rezultaty dla próbek kompozytowych, zawierających objętościowo odpowiednio 35% i 46% materiału GMM oraz litego Terfenolu-D, przedstawiono na rysunkach 4.12 i 4.13. Ponadto wykonano badania mające na celu sprawdzenie wpływu różnej wartości obciążenia wstępnego na wartość uzyskiwanej magnetostrykcji, co zostało zaprezentowane na rysunku 4.14a i b. Na rysunku 4.14a przedstawiono zestawione rezultaty $\Delta\lambda_{\max}$ dla wytworzonych próbek kompozytowych zawierających objętościowo odpowiednio 35% i 46% proszku materiału GMM oraz litej próbki referencyjnej Terfenolu-D. Pomiary zostały przeprowadzone dla napreżenia wstępnego z przedziału 0,1–9 MPa, przy czym skok zmiany napreżenia wynosił 1 MPa, co można zauważyć na wykresie.

Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że w przypadku wytworzonych kompozytów, wpływ napreżenia wstępnego na uzyskiwaną magnetostrykcję ($\Delta\lambda_{\max}$) jest znacznie mniejszy (ok. 3-krotnie) w porównaniu do materiału litego (rys. 4.14a). Z kolei analiza danych z rysunku 4.14b, a dotyczących tylko kompozytu, wpływu napreżenia wstępnego na wartość magnetostrykcji nie wyklucza i sugeruje

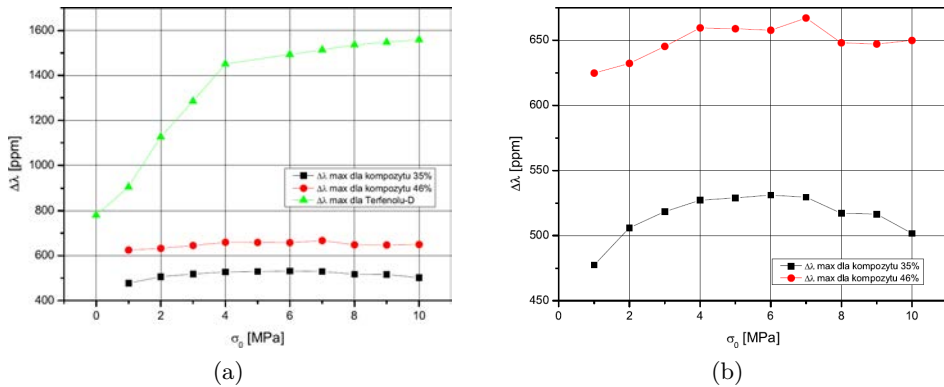


Rys. 4.12. Zmiana magnetostrykcji $\Delta\lambda$ w funkcji natężenia pola magnetycznego H , po naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 1$ MPa, dla kompozytu zawierającego objętościowo 35% i 46% proszku materiału GMM oraz monolitycznego Terfenolu-D [66]



Rys. 4.13. Zmiana magnetostrykcji $\Delta\lambda$ w funkcji natężenia pola magnetycznego H , po naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 7$ MPa, dla kompozytu zawierającego objętościowo 35% i 46% proszku materiału GMM oraz monolitycznego Terfenolu-D [66]

szersze badania w tym zakresie. Na zmniejszenie wpływu naprężenia wstępnego na uzyskiwaną magnetostrykcję w przypadku materiałów kompozytowych może mieć wpływ wiele czynników, z których właściwości matrycy oraz kształt samego proszku materiału GMM mogą być najważniejsze. Dalsza analiza otrzymanych wyników pokazuje, że co prawda zmalała magnetostrykcja kompozytu w stosunku do litego Terfenolu-D, ale jej wartość jest nadal znaczna i umożliwia różnorodne zastosowania tej klasy materiałów. Kluczowym natomiast zyskiem jest eliminacja prądów wirowych oraz możliwość obciążania próbki naprężeniami rozciągającymi, co było wykluczone w przypadku litego Terfenolu-D.

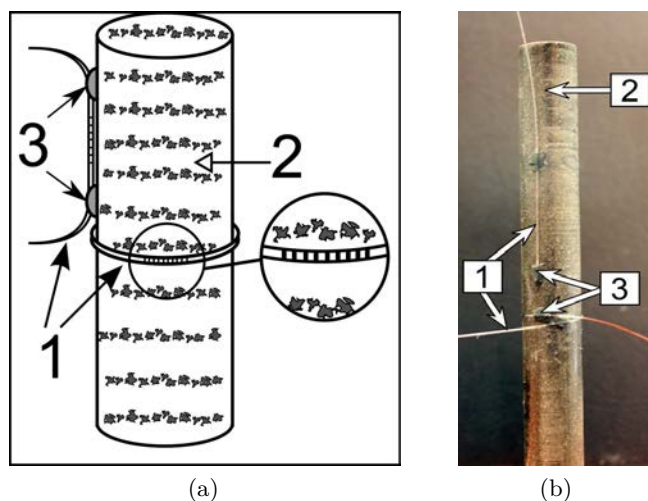


Rys. 4.14. Maksymalne wartości magnetostrykcji $\Delta\lambda$, dla wartości naprężenia wstępnego w zakresie 1–10 MPa: a) dla wytworzonych kompozytów oraz litej próbki Terfenolu-D, b) tylko dla wytworzonych kompozytów [66]

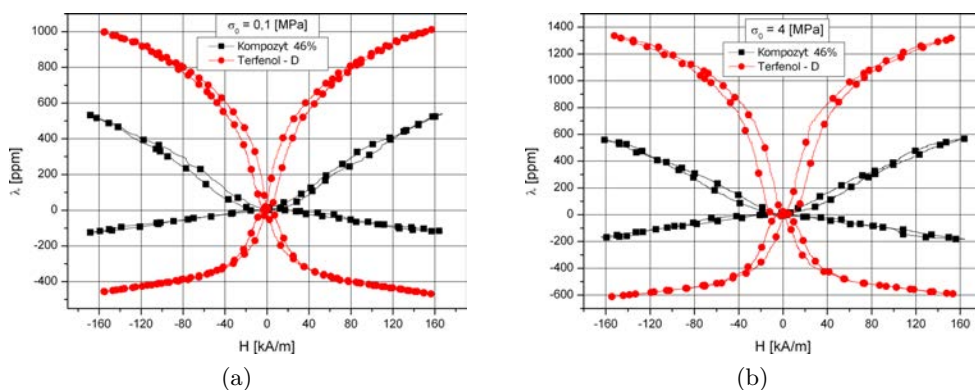
4.4.4. Magnetostrykcja objętościowa

Biorąc pod uwagę fakt, iż w przypadku materiałów magnetostrykcyjnych jednocześnie mogą występować różne efekty magnetomechaniczne, podjęto działania mające na celu określenie czy w przypadku wytworzonych materiałów kompozytowych zachodzi również zjawisko Barnettta, czyli magnetostrykcji objętościowej. Na podstawie danych literaturowych oraz informacji dostarczonych od producenta litego Terfenolu-D wiadomo było, że efekt magnetostrykcji w materiale litym zachodzi w jednym ściśle określonym kierunku. Należy jednak zauważyć, że w przypadku materiałów kompozytowych takie stwierdzenie może już nie być prawdziwe, co może mieć wpływ na ich odkształcanie się, a tym samym na odkształcanie się całego materiału kompozytowego.

W celu wykonania badań magnetostrykcji objętościowej wykorzystano podobną metodologię jak w przypadku pomiarów magnetostrykcji liniowej (jednokierunkowej) opisaną wcześniej. Za czujnik odkształcenia użyto, podobnie jak w tamtym przypadku, światłowodowy czujnik odkształcenia, z tą zasadniczą różnicą, że umieszczone zostały dwa czujniki pomiarowe. Jeden mierzył zmianę odkształcenia wzdłuż głównej osi próbki, natomiast drugi czujnik został umieszczony obwodowo na próbce, co zostało pokazane na rysunku 4.15. Takie ułożenie czujników umożliwiało jednoczesne mierzenie odkształcenia próbki wzdłużnie i obwodowo, dzięki czemu, znając konkretne wartości zmian tych parametrów, można było potwierdzić istnienie w próbkach kompozytowych zjawiska Barrenta lub go wykluczyć. Dodatkowo, w celu weryfikacji otrzymanych wyników oraz informacji otrzymanych od producenta materiału litego, podobne badanie zostało przeprowadzone właśnie na tym materiale.



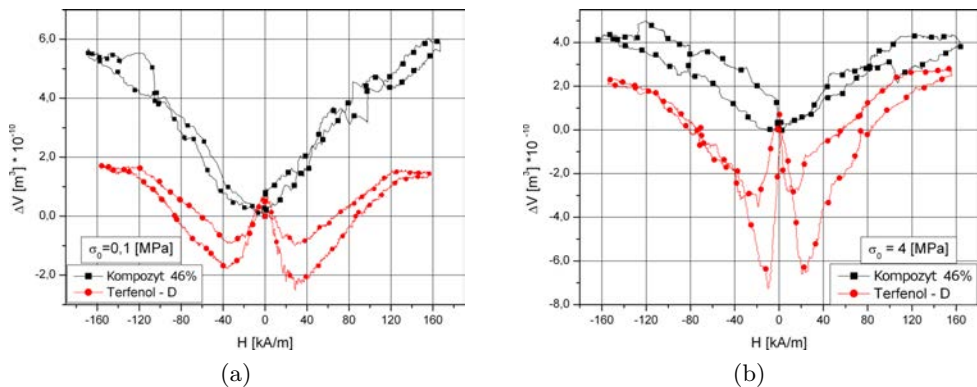
Rys. 4.15. Sposób rozmieszczenia czujników w celu zbadania magnetostrykcji objętościowej próbki kompozytowej: a) schemat: 1 – czujnik, 2 – kompozyt, 3 – klej; b) zdjęcie obiektu rzeczywistego [65]



Rys. 4.16. Zmiana magnetostrykcji $\Delta\lambda$ w funkcji natężenia pola magnetycznego H dla czujników odkształcenia umieszczonego wzdłuż oraz na obwodzie próbek: a) dla kompozytu zawierającego objętościowo 46% proszku Terfenolu-D oraz litej próbki Terfenolu-D po naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 1$ MPa, b) dla kompozytu zawierającego objętościowo 46% proszku Terfenolu-D oraz litej próbki Terfenolu-D po naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 4$ MPa [68]

Na rysunku 4.16 zaprezentowano wyniki z obu czujników odkształcenia dla materiału litego oraz materiału kompozytowego zawierającego 46% objętościowo proszku materiału GMM. Ponadto w trakcie pomiarów zdecydowano sprawdzić, czy na otrzymywane rezultaty, podobnie jak w przypadku poprzednich badań, jakkolwiek wpływ ma zastosowanie różnych wartości naprężenia wstępnego. Widać wyraźnie, że zmiana odkształcenia zarówno dla czujnika umieszczonego wzdłuż próbki, jak i dla umieszczonego obwodowo jest podobna do obu rodzajów materiałów, oczywiście biorąc pod uwagę to, że w przypadku materiału kompozytowego zmiany te były mniejsze. Najważniejszą informacją jest to, że w przypadku czujnika umieszczonego wzdłuż próbki, odkształcenie zmieniało się ze znakiem dodatnim (próbka się wydłużała), natomiast w przypadku czujnika umieszczonego obwodowo, odkształcenie zmieniało się ze znakiem ujemnym (próbka się kurczyła). Dodatkową informacją było otrzymanie odpowiedzi na pytanie, czy w przypadku zmiany naprężenia wstępnego następowała zmiana w charakterze odkształcania się próbki. Jak widać na załączonych wykresach (rys. 4.16a i b), zmiana naprężenia wstępnego nie wpłynęła w żaden sposób na charakter zmian w przypadku obu czujników odkształcenia. Jedyne wpłynęło w naprężeniu wstępnym uwidocznił się podobnie jak na przykład w przypadku wcześniej przedstawionych rezultatów (rys. 4.14b) na uzyskiwaną magnetostrykcję.

Na podstawie uzyskanych w trakcie pomiarów rezultatów wykonano obliczenia zmiany objętości każdego z materiałów pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego. Wyniki zamieszczone zostały na rysunku 4.17; można zauważyć, że



Rys. 4.17. Zmiana objętości próbek ΔV w funkcji natężenia pola magnetycznego H :
 a) dla kompozytu zawierającego objętościowo 46% proszku Terfenolu-D
 oraz litej próbki Terfenolu-D po naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 1$ MPa b) dla kompozytu
 zawierającego objętościowo 46% proszku Terfenolu-D oraz litej próbki Terfenolu-D
 po naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 4$ MPa [68]

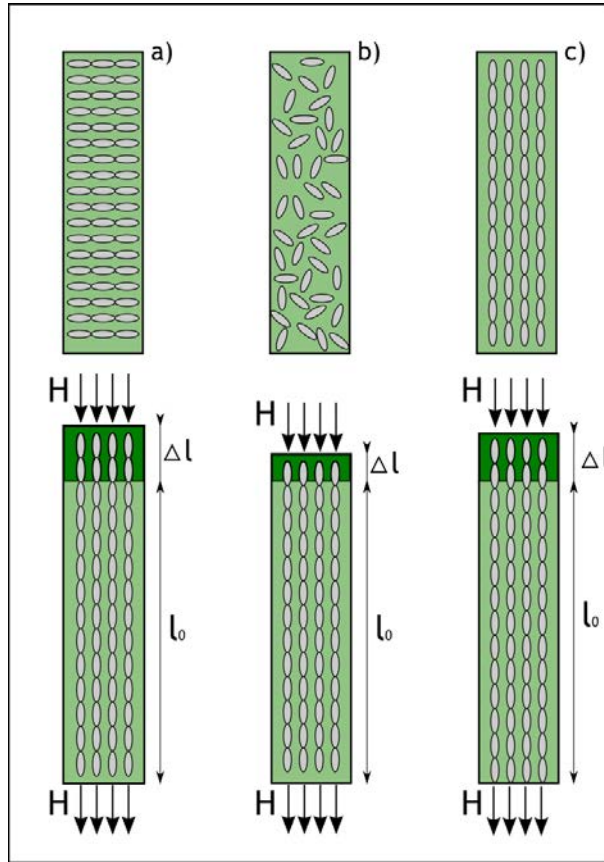
pojawia się pewna niewielka zmiana objętości wraz ze zwiększeniem natężenia pola magnetycznego wokół każdej z badanych próbek. Należy jednak zwrócić uwagę na wielkość zmiany, która wyniosła maksymalnie $5,8 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ w przypadku materiału kompozytowego i $2 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ dla litego Terfenolu-D. Ze względu na tak niewielką zmianę objętości obu materiałów stwierdzono, iż zarówno w materiale litym Terfenolu-D, jak i wytworzonych materiałach kompozytowych nie zachodzi zjawisko Barnettta lub jest ono pomijalnie małe i nie ma wpływu na inne ich właściwości magnetomechaniczne.

4.5. Opracowanie technologii wytwarzania próbek kompozytowych o różnej polaryzacji

4.5.1. Teoretyczne podstawy wprowadzenia anizotropii do materiału oraz zwiększenia zawartości objętościowej proszku z materiału GMM

Zgodnie z danymi literaturowymi i założeniami teoretycznymi, poddanie próbek wstępnej polaryzacji powinno wpłynąć na magnetostrykcję materiału. Na rysunku 4.18 przedstawiono schematycznie wpływ wstępnej polaryzacji zastosowanej w kompozytach na wyniki uzyskiwanej magnetostrykcji.

Na rysunku tym przedstawiono trzy typy próbek, które zostały poddane odpowiedniej obróbce podczas procesu produkcyjnego (co opisano w dalszej części), odpowiednio: a) próbka polaryzowana polem magnetycznym działającym prostopadłe do głównej osi, b) bez polaryzacji, c) poddana polaryzacji polem magnetycznym działającym równoległe do głównej osi. Zakłada się, że poddanie próbek odpowiedniej polaryzacji (pod odpowiednim kątem) zwiększy magnetostrykcję materiału kompozytowego. Przyjmuje się, iż w przypadku tych, które nie zostały poddane wcześniej polaryzacji, a rozłożenie cząsteczek wewnątrz matrycy jest przypadkowe, jedynym powodem odkształcenia próbki są siły wewnętrzne wywołane oddziaływaniem na cząsteczki materiału GMM zewnętrznego pola magnetycznego. Jak widać na rysunku 4.18b, w przypadku tego typu próbki niektóre cząsteczki są od razu ułożone w kierunku pola magnetycznego wymuszającego odkształcenie. Ułożenie tych cząsteczek powoduje, że magnetostrykcja takiego materiału powinna być teoretycznie mniejsza, niż w przypadku materiału poddanego modyfikacji. W przypadku próbek przedstawionych na rysunku 4.18a i c zostały one poddane odpowiednio polaryzacji prostopadłej do głównej osi próbki oraz równoległej. Ze względu na to, że cząsteczki materiału magnetostrykcyjnego powinny teoretycznie ułożyć się w jednym kierunku, magnetostrykcja takiego materiału powinna być większa, niż występuje to w przypadku materiału, który



Rys. 4.18. Schemat teoretycznego wpływu zastosowanej polaryzacji wytworzonych próbek kompozytowych: a) próbka polaryzowana prostopadłe do kierunku głównej osi próbki, b) bez polaryzacji, c) polaryzowana równoległe do kierunku jej głównej osi. Strzałki pokazują kierunek pola magnetycznego wymuszającego magnetostrykcję [67]

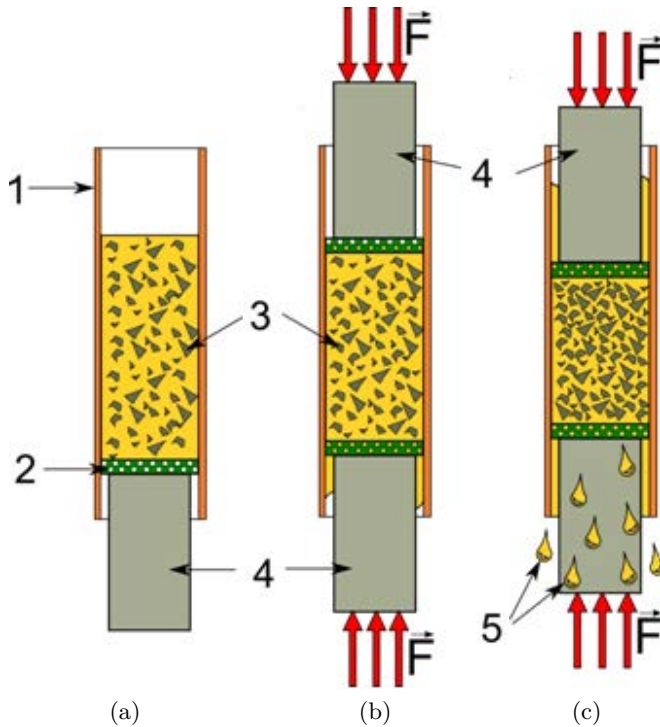
nie został poddany żadnej modyfikacji. W dolnej części rysunku 4.18 przedstawiono zmianę w długości (odkształcenie) każdego typu próbek pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Za l_0 przyjęto początkową długość próbki, natomiast za Δl przyjęto odkształcenie pod wpływem pola magnetycznego H , którego kierunek oznaczono na rysunku strzałkami. Należy jednak podkreślić, że magnetostrykcja materiału nie zależy tylko od pola magnetycznego przyłożonego do danego materiału, ale również, co zostało już pokazane wcześniej, od naprężenia wstępnego (ang.: *prestress*) oraz wewnętrznych sił magnetycznych w cząsteczkach materiału magnetostrykcyjnego. Dlatego również magnetostrykcja materiału, polaryzowanego równoległe do głównej osi próbki, teoretycznie może być większa niż w przypadku takiej, w której rozmieszczenie cząsteczek jest nieuporządkowane.

4.5.2. Procedura wytwarzania próbek kompozytowych o różnej polaryzacji i zwiększonej zawartości objętościowej proszku

Jednocześnie z modyfikacjami struktury wewnętrznej materiałów kompozytowych zdecydowano, że podjęta zostanie próba zwiększenia zawartości objętościowej proszku materiału GMM w ich wewnętrznej strukturze. Zgodnie z danymi literaturowymi i założeniami teoretycznymi, zastosowanie większej ilości objętościowej proszku materiału o gigantycznej magnetostrykcji w kompozycie powinno podnieść jej wartość maksymalnie uzyskiwanej, w zależności od natężenia pola magnetycznego. Związane jest to z silniejszym oddziaływaniem drobinek proszku na siebie, przez co odkształcenie pojedynczych cząsteczek przekłada się na odkształcenie całego kompozytu. Należy przy tym zauważyć, że, mimo zmniejszenia zawartości objętościowej żywicy, każda cząsteczka proszku jest dostatecznie dobrze zwilżona na całej swojej powierzchni. Ponadto, dzięki takiemu rozwiązaniu, wpływ hipotetycznych ruchów cząsteczek wewnątrz żywicy pod wpływem pola magnetycznego będzie mniejszy lub wręcz niemożliwy. Stąd wytrzymałość tak wytworzonego kompozytu i jego żywotność również powinny się zwiększyć. Jednocześnie trzeba zaznaczyć, iż wytworzenie kompozytów o zwiększonej zawartości proszku wymagało zastosowania nowej procedury, ponieważ dotychczas stosowana metoda uniemożliwia przekroczenie progu 47% udziału objętościowego.

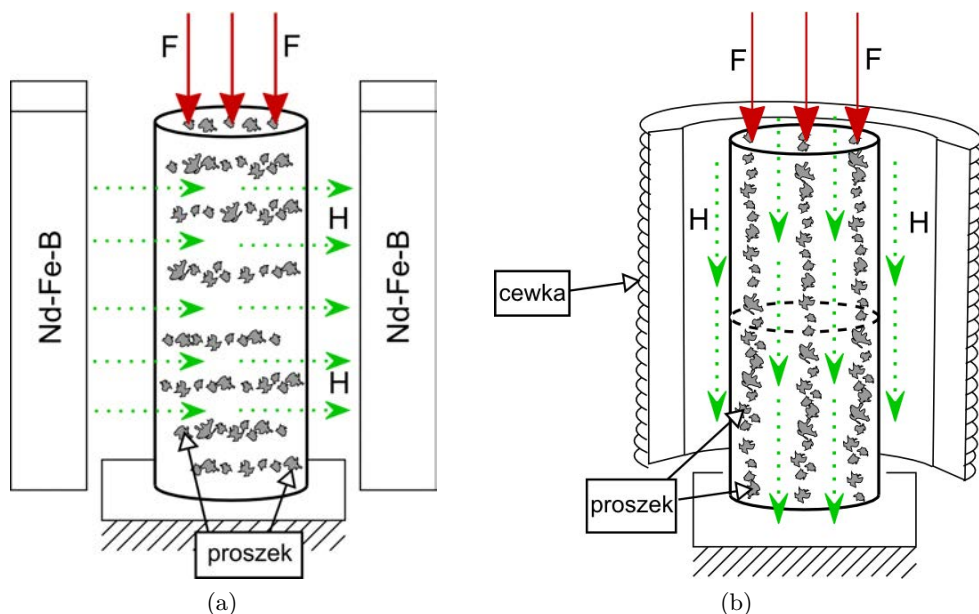
Możliwość zwiększenia ilości proszku w czystej mieszaninie jest od pewnego momentu niemożliwa ze względu na nasycenie mieszaniny, co wiąże się z późniejszymi trudnościami z mieszaniem wszystkich składników, tworzeniem konglomeratów proszku bez odpowiedniego zwilżenia ziaren oraz umieszczeniem mieszaniny w odpowiednich pojemnikach, w celu ostatecznego związania żywicy. Ze względu na podane trudności konieczne było opracowanie nowej metodyki wytwarzania próbek kompozytowych, której schemat musiał różnić się od przedstawionej wcześniej. Końcowe stadium zmodyfikowanego procesu produkcyjnego zostało przedstawione na rysunku 4.19.

Ze względu na to, że w przypadku wytwarzania próbek o zwiększonej zawartości objętościowej, początkowe etapy ich przygotowania były identyczne z wcześniej zaprezentowaną metodyką, przedstawione zostały tylko trzy ostatnie etapy wytwarzania nowego rodzaju próbek kompozytowych. W przypadku wytwarzania próbek o zwiększonej zawartości proszku konieczne było usunięcie nadmiernej ilości żywicy, jaka znajdowała się w mieszaninie po wykonaniu procedury wstępnej. W tym celu wcześniej przygotowana mieszanina została przelana do pojemników, których jeden koniec został zabezpieczony przez filtr oraz aluminiowy trzpień (rys. 4.19a). Tak przygotowane pojemniki zostały umieszczone pomiędzy szczękami hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej MTS, gdzie drugi koniec pojemnika zabezpieczono w podobny sposób do pierwszego (rys. 4.19b). Następnie zawartą



Rys. 4.19. Metodologia wytwarzania próbek o zwiększonej zawartości objętościowej proszku materiału o gigantycznej magnetostrykcji jakim jest Terfenol-D, gdzie: 1 – pojemnik, 2 – filtr, 3 – cząsteczki mieszanina, 4 – trzpienie aluminiowe, 5 – nadmiar żywicy [72]

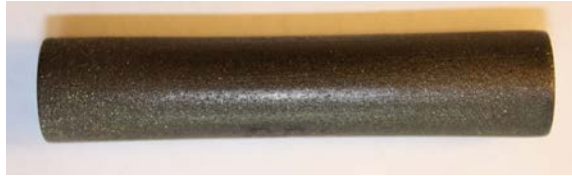
w pojemniku mieszaninę poddano ściśnięciu za pomocą wcześniej umieszczonych aluminiowych trzpieni. Ściśnięcie mieszaniny miało na celu opróżnienie pojemników z nadmiaru żywicy, co było możliwe dzięki zastosowaniu gęstych przepuszczalnych filtrów, które umożliwiły swobodny przepływ żywicy, natomiast zablokowały wydostanie się drobin proszku z pojemników (rys. 4.19c). W celu zapewnienia ujednoczonych zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D w kompozycie, każda próbka była poddana takiemu samemu ciśnieniu. Dodatkowo w trakcie procesu wytwarzania próbek o zwiększonej zawartości objętościowej proszku materiału GMM zdecydowano, że zrealizowana zostanie również modyfikacja mająca na celu otrzymanie próbek o określonej polaryzacji. Modyfikacja ta wymagała również dodatkowych zmian w końcowym procesie wytwórczym. Na rysunkach 4.20a i 4.20b przedstawiono proces polaryzacji próbek, odpowiednio w kierunku prostopadłym i równoległym do jej głównej osi. Zmiana w procesie wytwarzania próbek polaryzowanych, w stosunku do pierwotnej procedury, dotyczyła etapu



Rys. 4.20. Schemat polaryzacji: a) prostopadłej do głównej osi próbki, b) równoległej do głównej osi próbki. Zielone strzałki pokazują kierunek pola magnetycznego H wymuszającego magnetostrykcję, czerwone strzałki pokazują naprężenie wstępne wywołane siłą F [73]

końcowego. Po zmieszaniu wszystkich składników i umieszczeniu we wcześniej przygotowanym pojemniku był on – w przypadku otrzymywania polaryzacji prostopadłej – umieszczany między dwoma silnymi magnesami neodymowymi (rys. 4.2A).

W przypadku otrzymywania polaryzacji równoległej do głównej osi próbki wcześniej przygotowany pojemnik był umieszczany w cewce, która generowała pole magnetyczne o natężeniu 100 kA. Tak przygotowane próbki były pozostawione na maszynie wytrzymałościowej przez 8 godzin, aż do wstępnego związania żywicy w pojemnikach. Następnie przygotowana próbka była zdejmowana z maszyny wytrzymałościowej i umieszczana na 24 godziny w piecu, w celu osiągnięcia pełnego związania matrycy, po czym była wyjmowana z pojemnika. Poza próbkami poddanymi polaryzacji przygotowano również taką, która nie była poddana żadnej wstępnej stymulacji polem magnetycznym. Należy zauważyć, że ze względu na to, iż próbka była poddana mechanicznemu ścisnaniu, nie było obawy pojawienia się zjawiska sedymentacji w trakcie wiązania żywicy epoksydowej. Na rysunku 4.21 przedstawiono zdjęcie jednej z wytworzonych w taki sposób próbek kompozytowych.

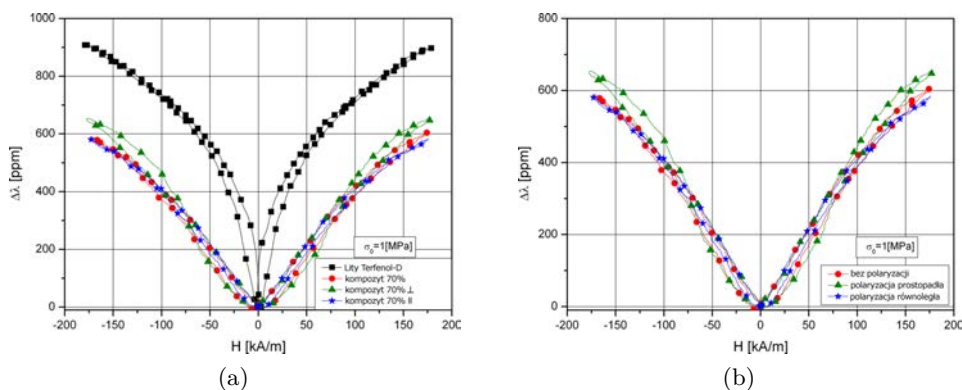


Rys. 4.21. Próbką kompozytu magnetostrykcyjnego o zwiększonej zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D (zdjęcie własne)

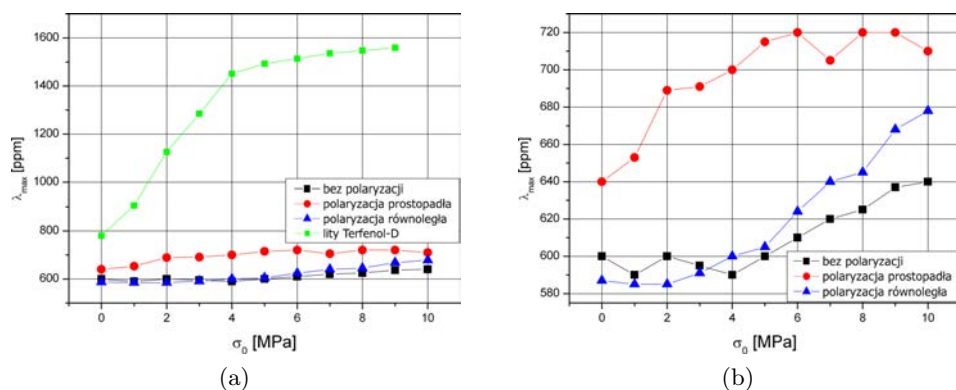
4.5.3. Badania polaryzowanych próbek kompozytowych o zwiększonej zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D

W następnym etapie przeprowadzone zostały pomiary magnetostrykcji $\Delta\lambda$ wytworzonych próbek kompozytowych o zwiększonej zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D, polaryzowanych prostopadłe i równoległe do głównej osi próbki oraz niepolaryzowanej. Pomiary zostały przeprowadzone podobnie jak w przypadku opisanych uprzednio testów próbek bez polaryzacji. Na rysunkach 4.22a i 4.22a przedstawiono rezultaty pomiaru magnetostrykcji dla próbek polaryzowanych oraz próbki niepolaryzowanej, o naprężeniu wstępnym wynoszącym $\sigma_0 = 1$ MPa. Na podstawie otrzymanych wyników, uzyskanych dla tych trzech rodzajów próbek, można stwierdzić, że niezależnie od zastosowanego obciążenia wstępnego, największą magnetostrycją spośród wytworzonych materiałów charakteryzują się kompozyty, które w trakcie procesu wytwarzania zostały poddane polaryzacji w kierunku prostopadłym do głównej osi próbki, co można zauważyć na rysunkach 4.23a i 4.23b. Ponadto, w przypadku próbek polaryzowanych równoległe, wynik magnetostrykcji dla małych wartości naprężenia wstępnego był mniejszy niż w przypadku próbek nie poddanych polaryzacji (rys. 4.23b. Można przypuszczać, że jest to związane ze wstępnym „ustawieniem” cząsteczek wewnątrz kompozytu, które teoretycznie również powinny być ułożone wzdłuż głównej osi, a co za tym idzie, dla małych wartości naprężenia wstępnego ulec mniejszemu wstępnemu odkształceniu.

W przypadku większego naprężenia wstępnego, jak to zostało pokazane na rysunku 4.23b, magnetostrykcja kompozytu polaryzowanego równoległe do głównej osi jest nieznacznie większa niż w kompozycie niepolaryzowanym, co wiąże się z tym, że następuje większe odkształcenie cząsteczek Terfenolu-D, które, będąc ułożone jedna nad drugą wewnątrz kompozytu, oddziałują na siebie z większą siłą niż w przypadku cząsteczek rozłożonych w sposób nieuporządkowany. Należy podkreślić, że w przypadku kompozytów magnetostrykcyjnych, które zostały poddane w trakcie wytwarzania polaryzacji zewnętrznym polem magnetycznym w kierunku prostopadłym do głównej osi próbki, udało się uzyskać większe wstępne wyniki magnetostrykcji, niż w przypadku próbki polaryzowanej w kierunku równoległym

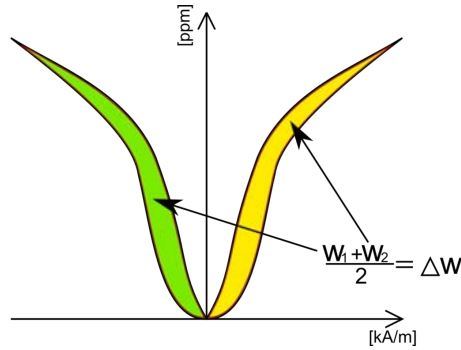


Rys. 4.22. Zmiana magnetostrykcji $\Delta\lambda$ dla litego materiału Terfenolu-D oraz kompozytów o zwiększonej zawartości objętościowej proszku materiału o gigantycznej magnetostrykcji, w funkcji natężenia pola magnetycznego H , o naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 1$ MPa [66]



Rys. 4.23. Maksymalne wartości magnetostrykcji $\Delta\lambda$, dla naprężenia wstępnego w zakresie 1–10 MPa: a) dla litego Terfenolu-D, kompozytów poddanych polaryzacji prostopadłej i równoległej względem osi głównej próbki oraz kompozytu niepolaryzowanego, b) dla kompozytów poddanych polaryzacji prostopadłej i równoległej względem osi głównej próbki oraz kompozytu niepolaryzowanego [66]

oraz niepolaryzowanej. Na podstawie otrzymanych rezultatów można stwierdzić, że różnice w uzyskanych wynikach magnetostrykcji dla materiału litego oraz materiałów kompozytowych o zwiększonej zawartości objętościowej proszku GMM nie jest duża, a nawet w przypadku kompozytu polaryzowanego prostopadle do głównej osi próbki jest mniejsza tylko o 27% od materiału litego w przypadku braku obciążenia materiału w trakcie jego badania.

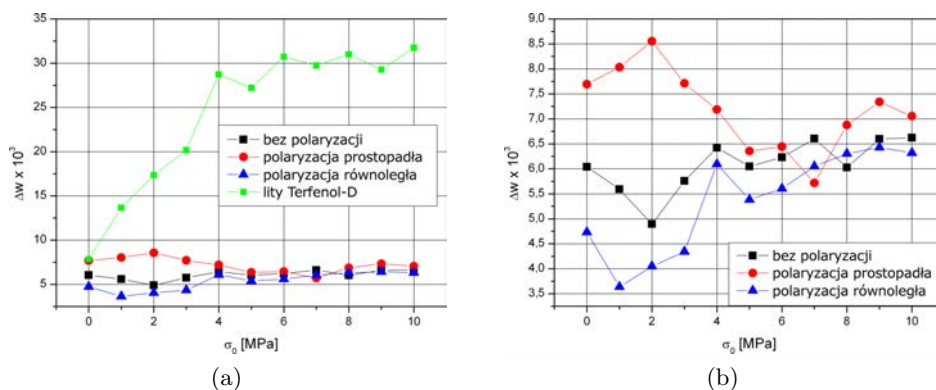


Rys. 4.24. Pole pętli histerezy sprzężenia magnetycznego ΔW określone na podstawie jednego cyklu pomiarowego [66]

Przeprowadzona została również analiza sprzężenia magnetomechanicznego w przypadku badanych materiałów kompozytowych. Za miarę wielkości tego sprzężenia uznano wielkość pola pętli histerezy powstającej w trakcie jednego cyklu roboczego materiału, na rysunku 4.24 oznaczonego jako ΔW . Przyjmuje się, że im mniejsza jest wielkość ΔW , tym lepsza jest sprawność zamiany pola magnetycznego na odkształcenia mechaniczne, a tym samym lepsze sprzężenie magnetomechaniczne.

Wyniki wielkości ΔW zostały przedstawione na rysunkach 4.25a i 4.25b. Pomiary zostały wykonane dla wszystkich badanych próbek, w tym dla litego Terfenolu-D. Na rysunku 4.25a widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem naprężenia wstępnego, podczas pomiaru w przypadku materiału litego, najszybciej rosło pole pętli histerezy. Ciekawszymi wydają się wyniki otrzymane dla materiałów kompozytowych, co nie jest tak widoczne dla materiału litego, jednak na rysunku 4.25b można zauważyć, że w przypadku materiału polaryzowanego prostopadłe w stosunku do głównej osi i późniejszego działania pola magnetycznego, wartość pola pętli histerezy zmniejsza się po przekroczeniu naprężenia wstępnego o wartości 2 MPa. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że w przypadku materiału kompozytowego o zwiększonej zawartości objętościowej proszku materiału GMM i odpowiednim kącie polaryzacji wstępnej wraz ze zwiększeniem naprężenia wstępnego uzyskuje się lepszy wynik sprzężenia magnetomechanicznego, a co za tym idzie większą sprawność zamiany przyłożonego pola magnetycznego na uzyskiwaną wielkość magnetostrykcji. W trakcie rozważań istotne jest to, aby porównywać jednocześnie wykresy sprzężenia magnetomechanicznego i wielkości uzyskiwanej magnetostrykcji dla takich samych wartości naprężenia wstępnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych rezultatów stwierdzono, iż zwiększenie zawartości proszku Terfenolu-D nie zwiększa zdecydowanie magnetostrykcji, natomiast znaczącą zmianę uzyskuje się, stosując polaryzację magnetyczną

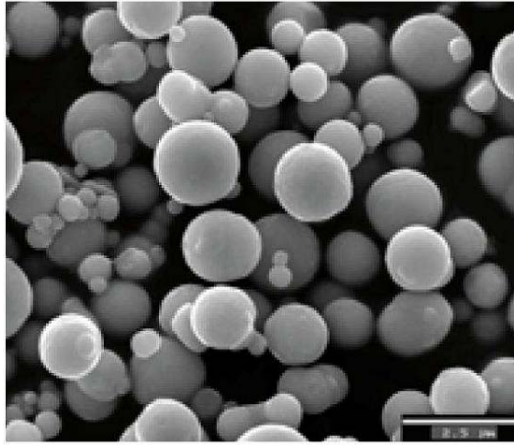


Rys. 4.25. Wielkość pola pętli histerezy ΔW dla wartości naprężenia wstępnego w zakresie 1–10 MPa: a) dla litego Terfenolu-D, kompozytów poddanych polaryzacji prostopadłej i równoległej względem osi głównej próbki oraz kompozytu niepolaryzowanego, b) dla kompozytów poddanych polaryzacji prostopadłej i równoległej względem osi głównej próbki oraz kompozytu niepolaryzowanego [66]

pod odpowiednim kątem. W przypadku wytworzonych materiałów zastosowano dwa różne kąty polaryzacji, z których każdy był przesunięty względem siebie o 90° i tak najlepsze rezultaty, tj. największe wartości maksymalnej magnetostrykcji z jednoczesnym najlepszym sprzężeniem magnetomechanicznym, udało się osiągnąć dla próbki, w której cząsteczki zostały spolaryzowane prostopadłe do przyłożonego później pola magnetycznego.

4.5.4. Kompozyty magnetostrykcyjne zawierające inne dodatki, poza proszkiem Terfenolu-D

Jak wynika z założeń teoretycznych, domieszkowanie kompozytów magnetostrykcyjnych innymi materiałami powinno zwiększyć magnetostrykcję. Na tej podstawie zdecydowano się na wykonanie i przebadanie próbek kompozytowych zawierających poza cząsteczkami materiału GMM inne dodatki w postaci materiałów magnetycznych. Zgodnie z danymi zaczerpniętymi z literatury, materiał, który powinien posłużyć jako dodatek, powinien wykazywać cechy materiału magnetycznie miękkiego, dzięki czemu pole magnetyczne, którym próbka kompozytowa będzie poddawana, powinno skuteczniej oddziaływać na cząsteczki materiału o gigantycznej magnetostrykcji. Należy jednocześnie zaznaczyć, iż wytworzenie kompozytów zawierających w składzie inne dodatki, poza proszkiem Terfenolu-D, wymaga zastosowania zmodyfikowanej procedury, ponieważ dotychczasowe nie uwzględniały takiego zabiegu.



Rys. 4.26. Obraz z mikroskopu elektronowego cząsteczek żelaza karbonylkowego [74]

Kompozyty zostały przygotowane na podstawie matrycy z żywicy epoksydowej EPOLAM 5015, produkowanej przez Axson Technologies. Za wypełnienie posłużył proszek Terfenolu-D oraz dodatkowo materiał magnetycznie miękki, jakim jest proszek żelaza karbonylkowego (CIP) wytwarzany przez firmę BASF. Do wytwarzania kompozytów zastosowany został proszek o wielkości ziaren z przedziału 1–5 μm . Obraz mikroskopowy żelaza karbonylkowego przedstawiony został na rysunku 4.26. Proszek żelaza karbonylkowego wytworzony został przez termiczny rozkład pentakarbonylku żelaza ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) i ma kształt zbliżony do kulistego.

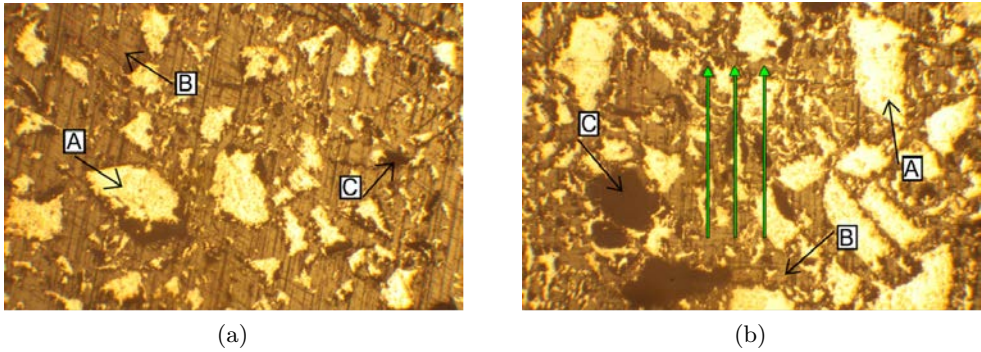
W wyniku prowadzonych prac badawczych zdecydowano się na wytworzenie sześciu próbek różniących się między sobą składem i strukturą. Były to odpowiednio:

- kompozyt bez polaryzacji, zawartość objętościowa Terfenolu-D T–D = 45% i zawartość objętościowa żelaza karbonylkowego CIP = 0%, (w tab. 4.1 oznaczono jako AK–0),
- kompozyt bez polaryzacji, zawartość objętościowa Terfenolu-D T–D = 45% i zawartość objętościowa żelaza karbonylkowego CIP = 10%, (AK-10),
- kompozyt bez polaryzacji, zawartość objętościowa Terfenolu-D T–D = 45% i zawartość objętościowa żelaza karbonylkowego CIP = 20%, (AK-20),
- kompozyt polaryzowany równolegle do głównej osi próbki, zawartość objętościowa Terfenolu-D T–D = 45% i żelaza karbonylkowego CIP = 0%, (AK-0P),
- kompozyt polaryzowany równolegle do głównej osi próbki, zawartość objętościowa Terfenolu-D T–D = 45% i żelaza karbonylkowego CIP = 10%, (AK-10P),
- kompozyt polaryzowany równolegle do głównej osi próbki, zawartość objętościowa Terfenolu-D T–D = 45% i żelaza karbonylkowego V CIP = 20%, (AK-20P).

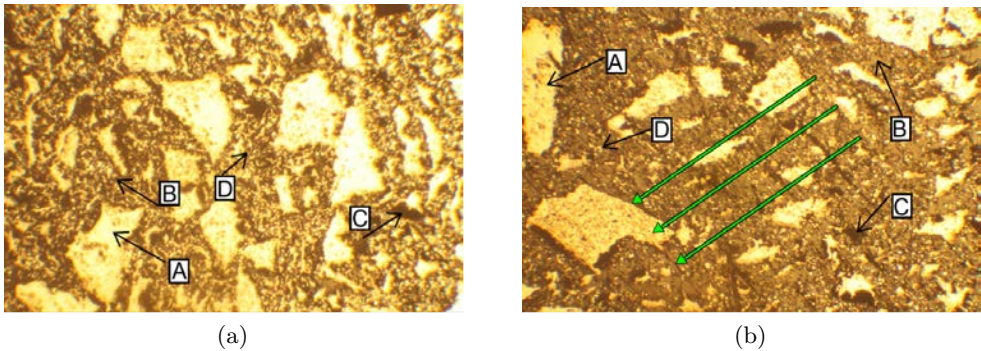
Proces wytwarzania kompozytu, zawierającego dodatek żelaza karbonylkowego, składał się z dwóch etapów.

W pierwszej kolejności mieszana była żywica z utwardzaczem w stosunku wagowym 100:36, dzięki czemu uzyskano czas wiązania na poziomie 8 h, co umożliwiło wykonanie wszystkich kolejnych kroków wytwarzania. Do mieszaniny żywicy i utwardzacza dodawane były kolejno odpowiednie ilości proszku żelaza karbonylkowego oraz Terfenolu-D. Całość mieszana była aż do uzyskania jednolitej masy, która była następnie odgazowana w komorze próżniowej w celu usunięcia pęcherzyków powietrza wprowadzonego podczas mieszania. Mieszanina po odpowietrzeniu była przelewana do uprzednio przygotowanych form, gdzie była ponownie odgazowana.

Następnie forma była umieszczana w dodatkowej osłonie wykonanej z włókna szklanego, co miało na celu zapobieżenie odkształcaniu się formy lub jej rozerwaniu podczas kolejnego etapu, jakim było wyciskanie nadmiaru żywicy, oraz uzyskanie odpowiedniej zawartości objętościowej obu proszków. Wykorzystano w tym celu – jak poprzednio – hydrauliczną maszynę wytrzymałościową MTS. Pomimo że wcześniejsze badania wykonane na wytworzonych próbkach kompozytowych wykazały, iż w przypadku próbek o określonej polaryzacji lepsze rezultaty uzyskuje się dla próbek polaryzowanych prostopadle do ich głównej osi, w przypadku kompozytów domieszkowanych proszkiem żelaza karbonylkowego zdecydowano się na zastosowanie polaryzacji równoległej. Trzy z sześciu próbek zostały już podczas procesu wyciskania umieszczone wewnątrz cewki elektromagnesu, w celu uzyskania odpowiedniej polaryzacji i struktury. Takie działanie spowodowane było chęcią uzyskania w materiale łańcuchów z materiału magnetycznie miękkiego, za pośrednictwem których pole magnetyczne lepiej działałoby na cząsteczki materiału GMM umieszczone wewnątrz matrycy z żywicy epoksydowej. Na rysunkach 4.27–4.29 przedstawione zostały zdjęcia zglądów wzdlużnych kompozytów o zawartości objętościowej proszku żelaza karbonylkowego odpowiednio: 0%, 10% i 20%. Zdjęcia po lewej stronie odnoszą się do kompozytów niepolaryzowanych, natomiast po prawej – do polaryzowanych. Ze względu na dużą zawartość objętościową proszków, trudno zaobserwować łańcuchy cząsteczek utworzone w wyniku polaryzacji (kierunek polaryzacji oznaczony został na rysunku przez zielone strzałki). Jak można zauważyć, w kompozytach nie udało się uniknąć porów, ze względu na trudności z dostatecznym odpowietrzeniem kompozytu w trakcie jego wytwarzania (zagęszczenie cząsteczek proszku żelaza karbonylkowego mogło wpłynąć na szybkość oraz możliwość uwalniania powietrza z mieszaniny). Wprowadzenie do kompozytów różnej zawartości proszku CIP miało na celu sprawdzenie wpływu tego proszku na zmniejszenie pól demagnetyzacji, a tym samym zwiększeniu magnetostrykcji.



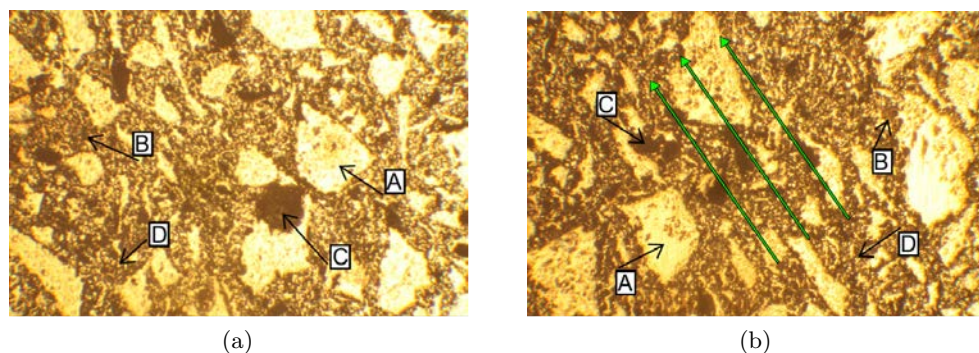
Rys. 4.27. Zdjęcia zglądu wzdłużnego kompozytu o zawartości objętościowej Terfenolu-D $V_{T-D} = 45\%$ i $V_{CIP} = 0\%$ żelaza karbonyłowego: a) niepolaryzowanego; b) polaryzowanego; gdzie: A – cząsteczka Terfenolu-D, B – żywica, C – pory, zielone strzałki wskazują kierunek polaryzacji [74]



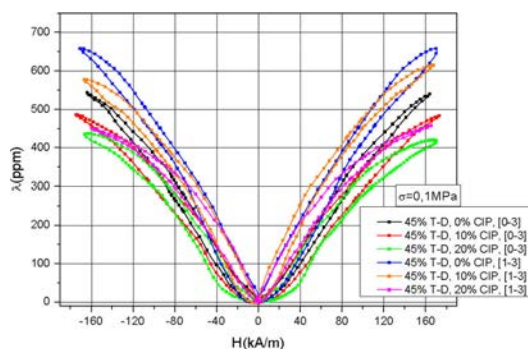
Rys. 4.28. Zdjęcia zglądu wzdłużnego kompozytu o zawartości objętościowej Terfenolu-D $V_{T-D} = 45\%$ i $V_{CIP} = 10\%$ żelaza karbonyłowego: a) niepolaryzowanego; b) polaryzowanego; gdzie: A – cząsteczka Terfenolu-D, B – żywica, C – pory, D – cząsteczki CIP, zielone strzałki wskazują kierunek polaryzacji [74]

4.5.5. Badania próbek kompozytowych zawierających Terfenol-D i żelazo karbonyłowe

Przeprowadzono pomiary magnetostrykcji $\Delta\lambda$ wytworzonych próbek kompozytowych zawierających dodatkowo żelazo karbonyłowe, poza proszkiem GMM, a otrzymane wyniki porównano z rezultatami otrzymanymi dla litego Terfenolu-D. Pomiary zostały przeprowadzone w sposób opisany uprzednio dla próbek o zawartości objętościowej wynoszącej odpowiednio 35% i 46% oraz o zwiększonej zawartości objętościowej proszku GMM. Na rysunku 4.30 przedstawiono rezultaty uzyskanych



Rys. 4.29. Zdjęcia zglądu wzdłużnego kompozytu o zawartości objętościowej Terfenolu-D $V_{T-D} = 45\%$ i $V_{CIP} = 20\%$ żelaza karbonyłkowego: a) niepolaryzowanego; b) polaryzowanego; gdzie: A – cząsteczka Terfenolu-D, B – żywica, C – pory, D – cząsteczki CIP, zielone strzałki wskazują kierunek polaryzacji [74]



Rys. 4.30. Porównanie zmiany wartości magnetostrykcji $\Delta\lambda$ dla kompozytów zawierających dodatek w postaci żelaza karbonyłkowego w funkcji natężenia pola magnetycznego H , o naprężeniu wstępnym $\sigma_0 = 0,1$ MPa. Oznaczenia próbek zostały opisane w części dotyczącej ich wytwarzania [74]

wartości magnetostrykcji dla próbek zawierających żelazo karbonyłkowe, poza proszkiem Terfenolu-D, oraz dla próbki litego materiału. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że różnice w pomiarach magnetostrykcji dla materiału litego oraz materiałów kompozytowych są stosunkowo duże, a nawet wraz ze wzrostem zawartości objętościowej cząsteczek żelaza karbonyłkowego powiększają się.

Ponadto, w przeciwieństwie do poprzednio uzyskanych wyników, dla materiałów kompozytowych, zawierających wyłącznie proszki materiału o gigantycznej magnetostrykcji, wpływ polaryzacji równoległej jest mocno zauważalny również w przypadku kompozytów zawierających cząsteczki żelaza karbonyłkowego.

4.5.6. Podsumowanie w zakresie wytwarzania kompozytów z udziałem proszków GMM

Główne rezultaty osiągnięte w zakresie wytwarzania kompozytów z udziałem proszków GMM:

- Wytworzono kompozyty magnetostrykcyjne z uwzględnieniem różnej struktury oraz dodatków zmieniających ich właściwości. Zestawienie wytworzonych kompozytów przedstawiono w tabeli 4.1
- Zestawiono oryginalne stanowisko badawcze służące do wstępnych pomiarów podstawowej wielkości magnetomechanicznej wytworzonych kompozytów, jaką jest magnetostrykcja. W przypadku pomiarów zastosowano światłowodową technikę pomiaru wielkości odkształcenia wytworzonych próbek kompozytowych pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego.
- Kompozyty poddano badaniom wykazującym ich reakcję na zewnętrzne pole magnetyczne. Wyraźnie zaobserwowano zmiany naprężenia w badanych kompozytach, w następstwie przykładanego zewnętrznego pola magnetycznego. Wykazano w ten sposób, iż uzyskano pożądane cechy materiału.

Reasumując, uzyskano kompozyty magnetostrykcyjne o zróżnicowanej budowie i właściwościach o zaletach zbliżonych do litego Terfenolu-D z jednoczesnym wyeliminowaniem jego wad.

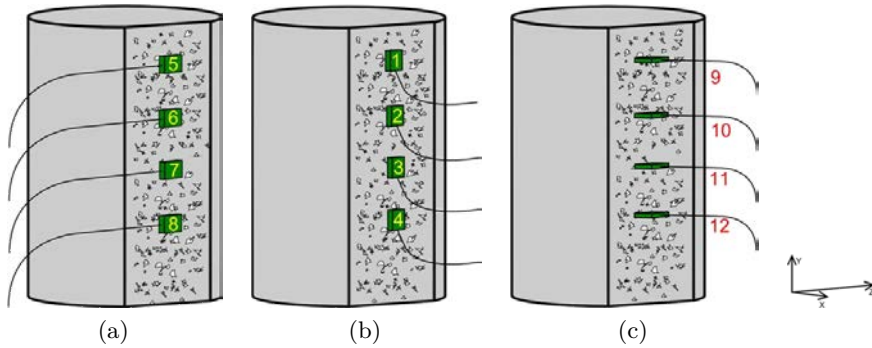
4.6. Odwrotna magnetostrykcja (efekt Villariego)

Materiały magnetostrykcyjne, a w szczególności materiały o gigantycznej magnetostrykcji, takie jak Terfenol-D, charakteryzują się tym, że wykazują również zjawisko odwrotnej magnetostrykcji, czyli tzw. efekt Villariego. Zjawisko to polega na tym, że pod wpływem przyłożonego do materiału zewnętrznego obciążenia w postaci siły, ciśnienia itp. w materiale następuje nagła zmiana orientacji domen magnetycznych, co przejawia się zmianą magnetyzacji wokół materiału. Z względu na występowanie wymienionego efektu pojawiły się nowe możliwości zastosowań materiałów magnetostrykcyjnych, w tym między innymi w czujnikach siły. W przypadku odpowiedniego wyskalowania takich czujników można na podstawie wartości uzyskanej zmiany w polu magnetycznym określić z dużą dokładnością wartość obciążenia, jakiemu został poddany materiał.

W celu przeprowadzania badań konieczne było opracowanie odpowiedniej metodyki pomiaru, zdecydowano, że niezbędne będzie prawidłowe przygotowanie powierzchni próbki. Próbka została zeszlifowana wzdłuż jej głównej osi, w celu uzyskania odpowiedniej równej, gładkiej i stosunkowo dużej powierzchni, która umożliwiała pomiar zmiany w polu magnetycznym wokół próbki za pomocą magnetorezystora KMZ-10. Ze względu na specyfikę rozkładu linii pola magnetycznego

Tabela 4.1. Zestawienie wytworzonych kompozytów z proszkami materiału GMM

Lp.	Na- zwa	Postać	Skład	Przeprowadzone badania	Właściwości fizyczne	Proponowane dalsze działania	Zastosowania
1	Kom- pozyt 35% T-D Kom- pozyt 46% T-D	Kompozyty magnetostrykcyjne na bazie żywicy epoksydowej Epolam 2025 i proszku materiału o gigantycznej magnetostrykcji (Terfenol-D)	Terfenol-D objętościowo odpowiednio: 36% i 45%	Wstępne badania magnetomechaniczne – wzrost magnetostrykcji w zależności od wartości pola magnetycznego	Efekt magnetostrykcji, zredukowanie kruchości materiału litego	Dalsze badania właściwości magnetomechanicznych, w tym wpływ różnych wartości naprężenia wstępnego	W składnikach urządzeń częstotliwościowych, w tym wzbudnikach
2	Kom- pozyt 70%	Kompozyty magnetostrykcyjne na bazie żywicy epoksydowej Epolam 2025 i proszku materiału o gigantycznej magnetostrykcji (Terfenol-D)	Terfenol-D, objętościowo dla wszystkich kompozytów: 70%	Wstępne badania magnetomechaniczne – wzrost magnetostrykcji w zależności od wartości pola magnetycznego, wpływ polaryzacji na uzyskiwaną wartość magnetostrykcji i zwiększenia zawartości objętościowej Terfenolu-D	Efekt magnetostrykcji, zredukowanie kruchości materiału litego, zwiększenie uzyskiwanego efektu magnetostrykcji	Dalsze badania właściwości magnetomechanicznych, w tym wpływ różnych wartości naprężenia wstępnego, szersze badania nad wpływem zwiększonej zawartości objętościowej proszku GMM	Aktuatory i semiaktywne tłumiki drgań w układach sprzężenia zwrotnego
3	AK-0 AK-10 AK-20 AK-0P AK-10P AK-20P	Kompozyty magnetostrykcyjne na bazie żywicy epoksydowej Epolam 2025 i proszku materiału o gigantycznej magnetostrykcji (Terfenol-D), domieszkowanego żelazem karbonylkowym CIP	Terfenol-D objętościowo dla wszystkich kompozytów: 45%, CIP objętościowo odpowiednio: 0%, 10% i 20%	Wstępne badania magnetomechaniczne – wzrost magnetostrykcji w zależności od wartości pola magnetycznego, wpływ polaryzacji na uzyskiwaną wartość magnetostrykcji, wpływ dodatku miękkiego magnetyka na odształcenie materiału	Efekt magnetostrykcji, zredukowanie kruchości materiału litego, zmniejszenie magnetostrykcji w przypadku domieszkowania żelaza karbonylkowego	Dalsze badania właściwości magnetomechanicznych, w tym wpływ różnych wartości naprężenia wstępnego, analiza wpływu dodatków materiału miękkiego magnetycznie na uzyskiwane wartości magnetostrykcji	Aktuatory wysokoczęstotliwościowe z małymi polami magnetycznymi i liniową charakterystyką pracy

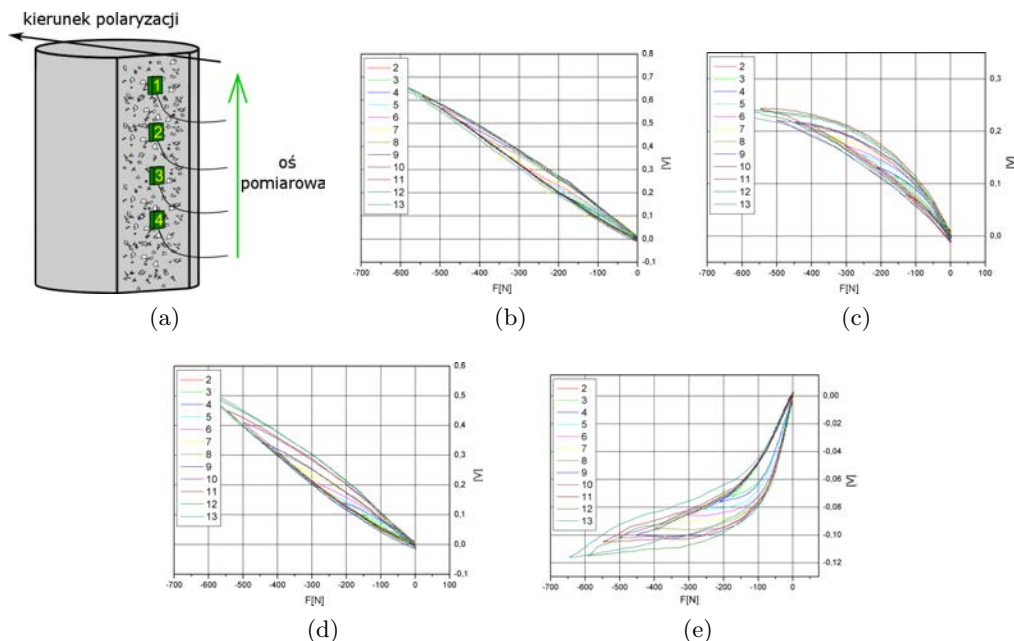


Rys. 4.31. Sposób ustawienia czujnika w trakcie pomiaru zmiany magnetyzacji wokół próbki kompozytowej pod wpływem zmiennego obciążenia, gdzie a) składowa Z , b) składowa Y , c) składowa X pola magnetycznego [66]

wokół próbki oraz dużą dokładność czujnika, każda zmiana odległości od powierzchni próbki powodowała, że odczytywany rezultat był inny. W związku z tym należało zapewnić stałą odległość czujnika pola magnetycznego od powierzchni badanej próbki, co byłoby niemożliwe do zrealizowania w przypadku próbki okrągłej. Ze względu na to, że powierzchnia robocza czujnika była stosunkowo duża, zdecydowano, że pomiary zostaną wykonane tylko za pomocą jednego czujnika, a nie głowicy trójosiowej. W przypadku większej liczby czujników nie byłoby fizycznej możliwości, aby każdy z czujników czytywał dane dokładnie z tego samego miejsca, stąd pomiar mógłby nie być miarodajny.

Pomiar został zrealizowany w sposób przedstawiony na rysunku 4.31. Za pomocą jednoosiowego czujnika pola magnetycznego odczytywano wskazania zmian w polu magnetycznym pod wpływem przyłożonego zewnętrznego obciążenia, które było realizowane za pomocą hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej MTS. Czujnik został umieszczony względem próbki w taki sposób, że było możliwe odczytywanie jednej ze składowych wektora pola magnetycznego, a następnie po wykonaniu pomiaru został przesunięty w dół próbki do kolejnego punktu pomiarowego. Po wykonanych czterech pomiarach nastąpiło obrócenie czujnika tak, by można było zebrać dane względem drugiej osi składowej wektora pola magnetycznego itd. W przypadku każdego punktu próbka była poddawana obciążeniu sinusoidalnemu o różnej wielkości amplitudy, krok zmiany amplitudy wynosił 50 N.

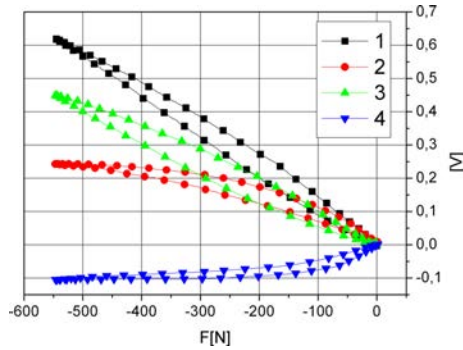
Na rysunku 4.32 przedstawione zostały rezultaty otrzymane dla ustawienia czujnika w pozycji pokazanej na rysunku 4.31b. Rezultaty pokazują zmianę pola magnetycznego w zależności od umiejscowienia czujnika wzdłuż próbki, odpowiednio rysunki 4.32b–e, gdzie każdy kolejny numer określa inne położenie



Rys. 4.32. Zmiana magnetyzacji wokół próbki kompozytowej, wywołana zmiennym obciążeniem, w zależności od położenia czujnika wzdłuż głównej osi próbki, odpowiednio położenie 1, 2, 3, 4 [65, 66]

czujnika. Ponadto na każdym z wykresów pokazano zmianę wartości magnetyzacji w zależności od amplitudy przyłożonego obciążenia. Widać wyraźnie, że wraz ze zwiększeniem amplitudy wartość zmiany magnetyzacji wokół próbki także się zwiększała. Ponadto należy podkreślić, że kształt otrzymywanej pętli histerezy był w każdym charakterystycznym położeniu czujnika taki sam, niezależnie od wartości przyłożonego obciążenia, natomiast zmieniał się wraz z przemieszczaniem czujnika wzdłuż próbki.

Dodatkowo na rysunku 4.33 pokazana została zależność zmiany w magnetyzacji wokół badanej próbki, w zależności od położenia czujnika wzdłuż jej głównej osi. Wyniki te zostały wykonane dla takiego samego położenia czujnika jak wcześniej przedstawiono (rys. 4.31b). Każda z przedstawionych na rysunku 4.33 krzywych odpowiada innemu położeniu czujnika, odpowiednio od położenia 1 do 4 na rysunku 4.31b. Można zauważyć, że w zależności od położenia czujnika kształt otrzymanej pętli histerezy oraz jej wartość zmienia się. Świadczy to o tym, że zmiana magnetyzacji wokół próbki pod wpływem przyłożonego obciążenia jest bardzo zróżnicowana, a rozpył pola nie jest jednorodny. Taki rezultat pokazuje, iż faktycznie materiał taki jak lity Terfenol-D oraz jego kompozyty może być wykorzystywany do budowy czujnika, jednak konieczne jest skonstruowanie odpo-



Rys. 4.33. Zmiany magnetyzacji wokół próbki kompozytowej, wywołane zmiennym obciążeniem o tej samej wartości, w zależności od położenia czujnika [65, 66]

wiedniego układu pomiarowego. Układ taki działałby na podstawie charakterystyki podobnej do przedstawionej na rysunku 4.32.

4.7. Aplikacja kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych na przykładzie aktuatora

Po przeprowadzeniu badań na wytworzonych próbkach kompozytowych zawierających proszek o gigantycznej magnetostrykcji, jakim jest Terfenol-D, stwierdzono, iż magnetostrykcja w tych próbkach ma mniejszą wartość od referencyjnego materiału litego, ale wciąż jest ona wielokrotnie większa od uzyskiwanych, np. dla kobaltu czy niklu. Ponadto udało się wyeliminować wady typowe dla materiału litego, m.in.: prądy wirowe oraz słabą odporność na obciążenia rozciągające, jak również kruchość. Na podstawie otrzymanych rezultatów zdecydowano się na wykonanie urządzenia, którego zasada działania opierałaby się na wykorzystaniu efektu magnetostrykcji. Koncepcja urządzenia przewiduje zastosowanie go w celu stymulacji tkanki kostnej w trakcie leczenia niepełnosprawności, takich jak np.: nierównomierna długość kończyn. Wykorzystuje się w tym celu aparaty Lizarowa. Proces taki zwykle trwa wiele miesięcy i zależy w dużej mierze od predyspozycji pacjenta, regeneracji jego tkanek oraz rozbudowy tkanek kostnych. Na podstawie dostępnej literatury można stwierdzić, że tkanka kostna poddana stymulacji odpowiednio dobranym obciążeniem regeneruje się w dużo szybszym tempie niż tkanka kostna bez takiego obciążenia. W przypadku prezentowanej koncepcji, zdecydowano, że stymulacja tkanki kostnej byłaby wykonywana za pomocą urządzenia zamontowanego w aparacie Lizarowa. Urządzenie to zawierać będzie rdzeń z materiału o gigantycznej magnetostrykcji i miałoby za zadanie wprowadzać do leczonej tkanki kostnej, z odpowiednio dobraną częstotliwością, pewną wartość

obciążenia. Obciążenie byłoby przekazywane dalej za pośrednictwem elementów aparatu Lizarowa bezpośrednio na układ kostny.

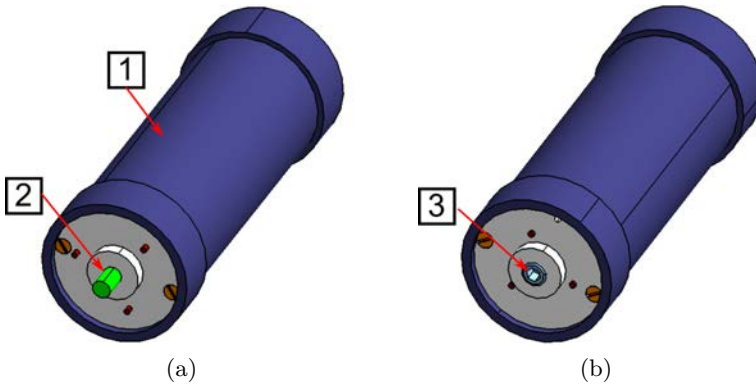
4.7.1. Model parametryczny aktuatora

Podobnie jak w przypadku każdego nowego urządzenia, tak i tutaj konieczne było przeanalizowanie dostępnej literatury z zakresu istniejących już lub prototypowych urządzeń wykorzystujących rdzenie z materiału magnetostrykcyjnego oraz zapoznanie się z ich konstrukcjami. Na tej podstawie zdecydowano, że projekt budowy aktuatora należy rozpocząć od przygotowania zarysu budowy urządzenia. Najważniejsze było stworzenie modelu parametrycznego, który zawierałby wszelkie elementy mogące wpływać na otrzymywane rezultaty magnetostrykcji, a co za tym idzie odkształcenia.

Na podstawie literatury oraz informacji na temat możliwego umiejscowienia urządzenia przyjęte zostały następujące parametry jego konstrukcji, a mianowicie: zakres przemieszczeń będzie wynosił maksymalnie 0,2 mm, a częstotliwość pracy około 1 Hz. Przyjęto również, że główny element wykonawczy będzie stanowił rdzeń kompozytowy zawierający cząsteczki materiału GMM. Ponadto, ze względu na ograniczenia geometryczne, założono, że konstrukcja całego urządzenia musi być jak najbardziej kompaktowa oraz mieć jak najmniej zewnętrznych elementów. Na rysunku 4.34 przedstawiono wizualizację modelu takiego aktuatora. Jego zewnętrzną część stanowi cylindryczna obudowa spełniająca kilka bardzo ważnych funkcji jednocześnie. Jedną z najważniejszych jest zapewnienie jak największej wartości natężenia pola magnetycznego wewnątrz urządzenia przez zamykanie jego obwodu magnetycznego. Innym nie mniej istotnym zadaniem jest zapewnienie sterowania wartością naprężenia wstępnego, dzięki czemu możliwe będzie dostrojenie parametrów urządzenia do różnych sytuacji (tzw. *tuning*). W przypadku współdziałania aktuatora z aparatem Lizarowa konieczne będzie dobranie parametrów w zależności od osoby, która takiemu leczeniu zostałaby poddana. Gdy nie ma możliwości sterowania parametrami urządzenia, w tym wielkością magnetostrykcji, nie można by mówić o urządzeniu uniwersalnym, a jedynie o takim, które mogłoby być stosowane tylko w wąskim zakresie. Ponadto konieczne było zaprojektowanie odpowiedniego układu mocowania urządzenia, który ułatwiałby swobodne manipulowanie aktuatorem oraz jego mocowanie do różnych elementów konstrukcyjnych.

W trakcie procesu projektowania aktuatora uznano, że najważniejszymi jego cechami, poza wymienionymi wcześniej, powinny być:

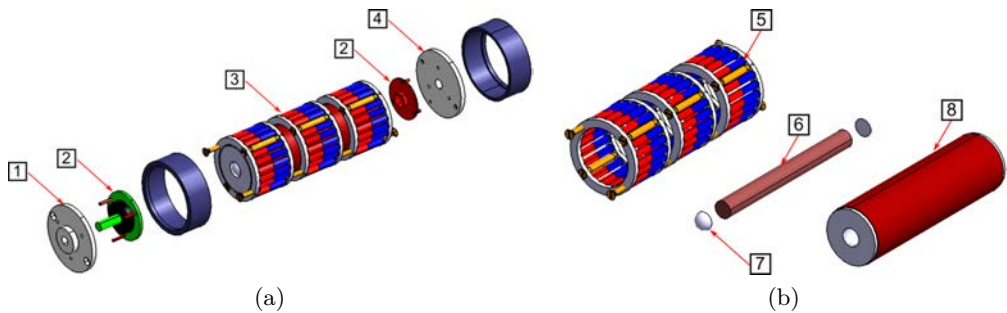
- małe wymiary zewnętrzne konstrukcji oraz stosunkowo niewielka masa,
- zabezpieczenie użytkownika przed działaniem pola magnetycznego oraz możliwością porażenia prądem elektrycznym,



Rys. 4.34. Model elementu wykonawczego: a) widok z przodu, b) widok z tyłu; 1 – obudowa, 2 – element przenoszący przemieszczenie, 3 – system naprężenia wstępnego [66]

- prosta budowa, realizowana przez minimalizację liczby elementów pośredniczących i dająca możliwość łatwej wymiany materiału aktywnego,
- zagwarantowanie osiowania pręta magnetostrykcyjnego, zapewniające tym samym maksymalne wykorzystanie jego właściwości,
- zapewnienie prostego montażu zarówno na stanowisku pomiarowym, jak i w późniejszym czasie w przypadku realnej konstrukcji.

Za źródło pola magnetycznego wybrano cewkę, którą zaprojektowano uwzględniając geometrię i parametry aktuatora. Ze względu na charakterystykę zastosowanego materiału GMM, wymagana wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła 120 kA/m. W celu ograniczenia wzrostu temperatury całego układu, w trakcie pracy urządzenia, zaprojektowano i zamodelowano numerycznie tzw. pierścienie magnetyczne, których zadaniem jest wprowadzenie do układu wstępnego pola magnetycznego (czyli tzw. podmagnesowania) o wartości 60 kA/m. Wartość tę w trakcie pracy traktowano jako poziom odniesienia, co umożliwiłoby sterowanie wydłużeniem aktuatora. Odpowiednie sterowanie kierunkiem przepływu prądu przez uzwojenie cewki generującej pole $H = 60$ kA/m umożliwia redukcję wartości pola magnetycznego oddziałującego na rdzeń materiału magnetostrykcyjnego bądź do zera, bądź podwyższenie go do wartości $H = 120$ kA/m. Dzięki takiemu rozwiązaniu rdzeń urządzenia w pozycji zerowej miałby pewną wartość magnetostrykcji, dzięki zmianom w przepływie prądu przez cewkę można by redukować wydłużenie materiału lub stymulować go w celu zwiększenia jego rozmiaru. Taki sposób sterowania urządzeniem zapewnia zwiększenie możliwości aplikacyjnych oraz ogranicza niestabilność termiczną.



Rys. 4.35. a) Budowa proponowanego modelu aktuatora: 1 – przednia pokrywa, 2 – układ osiowania pręta z materiału GMM, 3 – układ magnetyczny, 4 – tylna pokrywa;
 b) układ magnetyczny prototypu aktuatora: 5 – pierścienie magnetyczne, 6 – pręt z materiału GMM, 7 – końcówki osiujące, 8 – cewka magnetyczna [66]

W celu realizacji podanych założeń, wykonany został model aktuatora, którego poszczególne części składowe zaprezentowane zostały na rysunkach 4.35a i 4.35b.

W pomysłu przyjęto, że masa całego urządzenia nie będzie przekraczała 1,3 kg, natomiast jego długość 130 mm. Dodatkowo, chcąc zminimalizować wielkość aktuatora przyjęto, że średnica zewnętrzna nie przekroczy 60 mm. Takie wymiary umożliwiły zastosowanie w urządzeniu rdzenia magnetostrykcyjnego długości 100 mm i średnicy 10 mm, dzięki czemu zakłada się, że urządzenie będzie mogło działać ze stosunkowo dużą siłą przy niedużych zmianach w polu magnetycznym. Model stworzono z użyciem tzw. programu parametrycznego, co w dalszym procesie umożliwi szybkie zmiany jego wymiarów zewnętrznych. W dalszym etapie w celu weryfikacji ułożenia magnesów stałych oraz rozplywu pola magnetycznego w urządzeniu przeprowadzone zostały symulacje za pomocą programu do modelowania metodą elementów skończonych.

4.7.2. Model numeryczny (MES) rozkładu pola magnetycznego aktuatora

Obliczenia numeryczne rozkładu pola magnetycznego wokół urządzenia, opartego na rdzeniu magnetostrykcyjnym, wykonano z użyciem programu opartego na metodzie elementów skończonych – o nazwie Vizimag 3.18. Dzięki temu, że oprogramowanie to umożliwia obliczenia zarówno dla przypadków dwuwymiarowych, jak i elementów osiowo-symetrycznych, możliwe było przeprowadzenie symulacji dla projektowanego urządzenia.

Dane materiałowe aktuatora

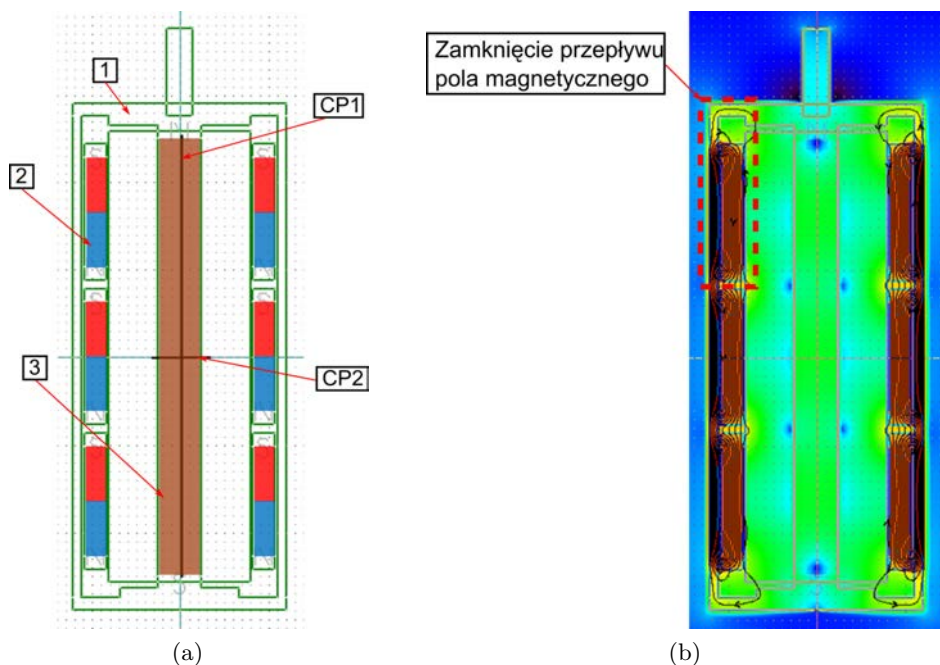
W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych zachowania się urządzenia niezbędne było określenie parametrów magnetycznych materiałów użytych w konstrukcji aktuatora magnetostrykcyjnego. Przyjęto, iż cylindryczna obudowa aktuatora, podobnie jak i elementy osiujące rdzeń magnetostrykcyjny w cewce, wykonane będą ze stali o względnej przenikalności magnetycznej $\mu_r = 1000$. Przyjęto też, iż rdzeń wykonany będzie z kompozytu zawierającego sproszkowany GMM o przenikalności magnetycznej $\mu_r = 10$. Ponadto założono, że wszystkie zastosowane w układzie aktuatora magnesy stałe wykonane zostaną z materiału NdFeB (klasy N38), których wartość indukcji remanencji wynosi $B_r = 1,25$ T.

Model aktuatora z pierścieniami magnetycznymi

W pierwszym kroku przeprowadzono symulację układu zawierającego trzy komplety pierścieni magnetycznych niezbędnych do wstępnego namagnesowania rdzenia magnetostrykcyjnego. Nie uwzględniono też początkowo przepływu prądu elektrycznego przez solenoid. Model aktuatora, dla którego została przeprowadzona taka symulacja, został zaprezentowany na rysunku 4.36a.

Rezultatem symulacji rozplywu pola magnetycznego w układzie była mapa rozkładu wektorów pola magnetycznego wewnątrz aktuatora. Na jej podstawie stwierdzono, że pole magnetyczne generowane przez każdy układ pierścieni magnetycznych tworzy zamknięte pętle tylko w pobliżu obudowy urządzenia. Miejsce skupienia linii pola magnetycznego od magnesów neodymowych zaprezentowano z kolei na rysunku 4.36b, gdzie obszar ten został zaznaczony czerwoną przerywaną ramką. Należy też zaznaczyć, co jest widoczne na wynikach modelowania, że pole magnetyczne o największej wartości występuje wokół zestawu pierścieni, a rozproszenie pola w całym urządzeniu jest niewielkie. W rezultacie rdzeń z materiału magnetostrykcyjnego nie mógł zostać poddany przewidywanemu wcześniej wstępnemu namagnesowaniu, co było głównym celem zastosowania magnesów stałych.

W celu potwierdzenia braku wstępnego namagnesowania rdzenia GMM, przedstawione zostały wyniki natężenia pola magnetycznego H , w przypadku dwóch przekrojów tego rdzenia, tj. wzdłuż jego głównej osi oznaczonej na rysunku 4.36a jako CP1, oraz poprzecznie do niej w połowie jej długości w miejscu oznaczonym jako CP2. Zmiana wartości wektora stycznego do głównej osi próbki, wzdłuż całej jej długości, została przedstawiona na rysunku 4.37a. Ponadto na rysunku 4.37b zaprezentowano wyniki dla przekroju poprzecznego rdzenia w połowie jego długości. Na podstawie analizy otrzymanych wyników potwierdzono niską wartość natężenia pola magnetycznego H we wnętrzu materiału magnetostrykcyjnego. Wpływ zastosowanego rozmieszczenia pierścieni magnetycznych na pręt mate-

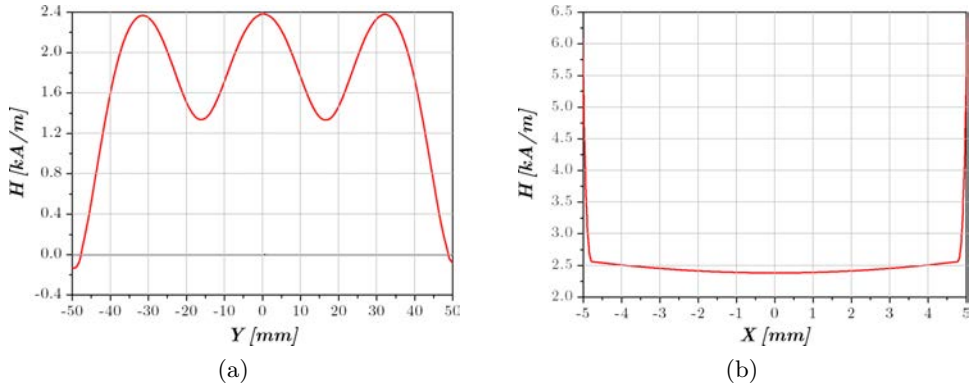


Rys. 4.36. Model numeryczny aktuatora: a) układ magnetyczny, 1 – obudowa jako ekran magnetyczny, 2 – pierścień magnetyczny, 3 – pręt GMM, CP1 – prosta pomiaru wartości wektora pola magnetycznego stycznego do niej, CP2 – prosta pomiaru wartości wektora pola magnetycznego prostopadłego do niej; b) rozkład wektorów pola magnetycznego, generowanego przez pierścienie magnetyczne [66]

riału z proszkiem GMM był znikomy; w połowie próbki osiągnięto wartość H wynoszącą zaledwie 2,874 kA/m. Dodatkowo, można zauważyć, że rozpył pola magnetycznego wzdłuż próbki (rys. 4.37a) jest niejednorodny, co może mieć wpływ na późniejsze sterowanie odkształceniem materiału. Ze względu na konieczność zapewnienia namagnesowania próbki polem o natężeniu przynajmniej $H = 60$ kA/m, zdecydowano przekonstruować budowę wewnętrzną aktuatora, w tym przede wszystkim rozmieszczenia magnesów stałych. Ze względu na to, należało wykonać ponownie obliczenia dla nowego rozwiązania konstrukcyjnego.

Model aktuatora z dwoma magnesami neodymowymi $10 \times 10 / N38$

W kolejnym kroku zmieniano rozmieszczenia zastosowanych magnesów neodymowych we wnętrzu aktuatora. Zdecydowano, że konieczna będzie modyfikacja sposobu wprowadzenia zewnętrznego pola magnetycznego do rdzenia aktuatora. Budowa cewki oraz aktuatora uniemożliwiała zastosowanie innego rozmieszczenia magnesów w przypadku próby umieszczenia ich na zewnętrznym obwodzie

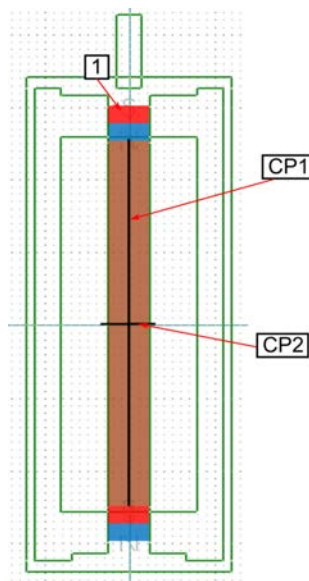


Rys. 4.37. Rozkład pola magnetycznego H [A/m] wzbudzonego w materiale GMM przez pierścienie magnetyczne. Wyniki numeryczne natężenia pola otrzymane: a) w osi – CP 1, b) w przekroju poprzecznym – CP 2, rdzenia [66]

cewki. Dodatkowo stwierdzono, że im bliżej rdzenia magnetostrykcyjnego będą się znajdowały magnesy stałe, tym większy wpływ będą wywierały na rdzeń, a co za tym idzie będzie można osiągnąć większą wartość wstępnego namagnesowania. Zdecydowano, że najlepszym rozwiązaniem będzie umieszczenie dwóch magnesów neodymowych na końcach rdzenia z materiału GMM. Dalej (rys. 4.38) zaprezentowano model urządzenia z dwoma walcowymi magnesami neodymowymi o wymiarach 10×10 mm, które zostały umieszczone na obu końcach pręta GMM. Widać wyraźnie, że magnesy zostały tak ustawione, aby strumień magnetyczny mógł swobodnie przez nie przepływać, a przy okazji miał możliwość penetracji rdzenia aktuatora.

Otrzymane wyniki z modelu numerycznego przeanalizowano, podobnie jak w poprzednim przypadku, pod kątem zarówno równomierności rozptywu pola magnetycznego wzdłuż próbki, jak i równomierności oddziaływania pola magnetycznego w przekroju poprzecznym. Ponadto zaprezentowano sposób ułożenia linii pola magnetycznego wewnątrz aktuatora, co zostało pokazane na rysunku 4.39a–c.

Można zauważyć, że w porównaniu z poprzednim modelem osiągnane wartości pola magnetycznego w rdzeniu aktuatora są kilkakrotnie większe. Nadal jednak pole nie rozkłada się w sposób równomierny wzdłuż długości rdzenia, co można zauważyć na rysunku 4.40a (linia czerwona). Widać wyraźnie, że wraz z oddaleniem się od czoła rdzenia i zbliżaniem do jego środka, (niezależnie od strony) wartość natężenia pola magnetycznego maleje, osiągając w środku wartość minimalną na poziomie 22 kA/m, dla maksymalnej wartości wynoszącej 72 kA/m dla magnesów neodymowych. Taka charakterystyka rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu magnetostrykcyjnym świadczy o tym, że bardzo ważnym parametrem

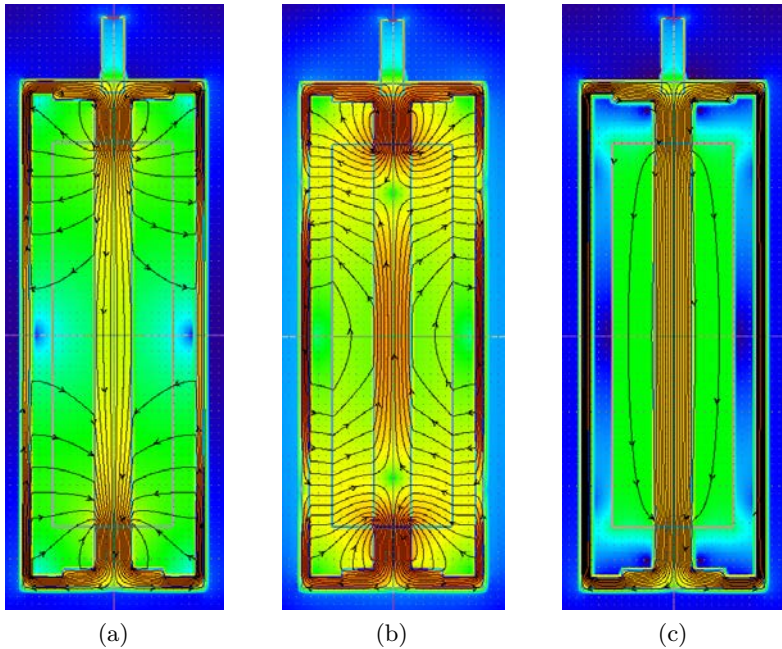


Rys. 4.38. Model numeryczny układ magnetycznego: 1 – magnes neodymowy 10×10 mm (N38); CP 1 – prosta pomiaru wartości wektora pola magnetycznego stycznego do niej; CP 2 – prosta pomiaru wartości wektora pola magnetycznego prostopadłego do niej [66]

w rozważaniach nad budową aktuatora powinna być odległość między źródłem pola magnetycznego a elementem aktywnym.

Można zatem stwierdzić, że możliwe jest sterowanie namagnesowaniem wstępnym rdzenia GMM za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego.

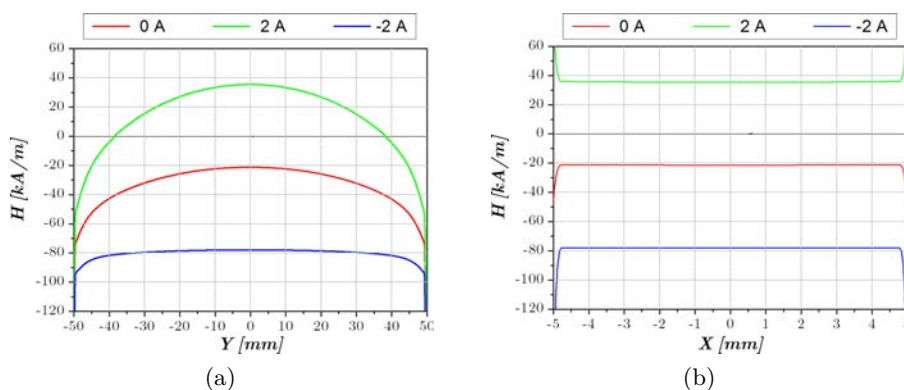
Celem kolejnego kroku było sprawdzenie, czy odpowiednio zasilany solenoid jest w stanie bądź zredukować, bądź wzmocnić wartość wprowadzonego do rdzenia z materiału GMM pola magnetycznego. Do obliczeń numerycznych przyjęto, że cewka będzie zasilana prądem stałym o natężeniu $I = 2$ A. Taka wartość prądu wygeneruje we wnętrzu cewki pole magnetyczne o wartości 60 kA/m. Przyjęto ponadto, iż solenoid może być zasilany przez prąd płynący w dwóch różnych kierunkach, wobec tego konieczne było przeprowadzenie dwóch symulacji, które uwzględniłyby ten fakt. Jako pierwszą przeprowadzono symulację dla stanu, w którym pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę zredukuje się do zera (lub o pewną znaczną wartość) w rdzeniu magnetostrykcyjnym. Rozkład wektorów pola magnetycznego dla tej sytuacji we wnętrzu urządzenia przedstawiono na rysunku 4.39b. Jak na nim widać, w poszczególnych częściach rdzenia z materiału GMM kierunki wektorów pola magnetycznego są bardzo zróżnicowane. Świadczy o tym również wynik przedstawiony na rysunku 4.40a (zielona linia). Na podstawie otrzymanych wyników symulacji stwierdzono, że wytworzone przez cewkę pole magnetyczne



Rys. 4.39. Rozkłady wektorów pola magnetycznego: a) generowanego przez magnesy neodymowe, b) przy dodatkowym przepływie prądu o natężeniu $I = 2$ A przez uzwojenie cewki magnetycznej, c) przy przepływie prądu w kierunku przeciwnym [66]

rzeczywiście powinno wpływać na wartość pola wytwarzanego przez magnesy stałe wewnątrz rdzenia magnetostrykcyjnego. W rezultacie, w porównaniu do wartości wstępnego namagnesowania, otrzymano zmianę pola magnetycznego w rdzeniu urządzenia ΔH na poziomie 53,5 kA/m. Jednocześnie trzeba zwrócić uwagę, że w obszarach kontaktu rdzenia z magnesami nastąpiło zmniejszenie H do 46 kA/m ($\Delta H = 24$ kA/m).

Kolejnym etapem analizy było wykonanie obliczeń dla odwróconego kierunku przepływu prądu przez uzwojenie cewki, gdy zwrot wektorów generowanego przez nią pola magnetycznego zgadzał się ze zwrotem wektorów pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy neodymowe. Wyniki symulacji przedstawione zostały na rysunku 4.39c, gdzie widać, iż ułożenie oraz kierunek wektorów wzbudzonego pola są jednakowe na całej długości rdzenia magnetostrykcyjnego, co zostało pokazane na rysunku 4.40a (niebieska linia). Podobnie jak poprzednio, również w tym przypadku zauważono, że zmiana wartości pola magnetycznego wzdłuż rdzenia jest nierównomierna i silnie uzależniona od jego odległości od źródła stałego. Należy przy tym zauważyć, że różnica wartości nie była już tak duża jak poprzednio. Maksymalna wartość pola magnetycznego wyniosła $H = 96$ kA/m



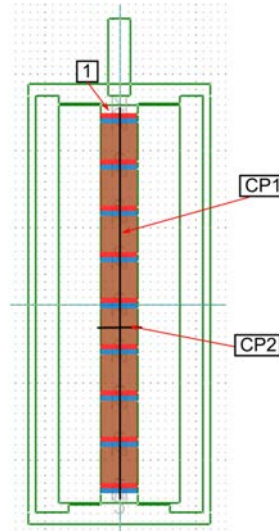
Rys. 4.40. Wartość natężenia pola magnetycznego H [A/m]: a) wzbudzonego wzdłuż osi pręta GMM – CP1, b) wzbudzonego w przekroju poprzecznym pręta GMM – CP2, dla trzech kolejnych przypadków: linia czerwona – przez magnesy neodymowe, linia zielona – przy dodatkowym przepływie prądu o natężeniu $I = 2$ A przez uzwojenie cewki magnetycznej, linia niebieska – przy przepływie prądu w kierunku przeciwnym [66]

($\Delta H = 24$ kA/m) i została zarejestrowana na końcach rdzenia magnetostrykcyjnego, natomiast najniższą zarejestrowaną wartość pola stwierdzono w środkowej części rdzenia, gdzie $H = 76$ kA/m ($\Delta H = 53,5$ kA/m). Na podstawie omówionej fluktuacji wartości natężenia ΔH wykazano jej zależność od odległości od źródła stałego pola magnetycznego. Co ważne, im bliżej rdzenia było źródło stałego pola magnetycznego, tym zmiana wartości była mniejsza, co jest związane z jego rozplywem wokół magnesu stałego i zaburzeniem wpływu generowanego przez cewkę pola.

Na podstawie otrzymanych z modelu wyników stwierdzono, że zmodyfikowana koncepcja budowy wewnętrznej aktuatora – mimo poprawy rozkładu natężenia pola magnetycznego wzdłuż przekroju poprzecznego rdzenia, jak to zostało przedstawione na rysunku 4.40b – nie spełnia oczekiwań. Dlatego zdecydowano, iż konieczne będą kolejne modyfikacje.

Model aktuatora z rdzeniami krótkimi i magnesami neodymowymi 10×2/N38

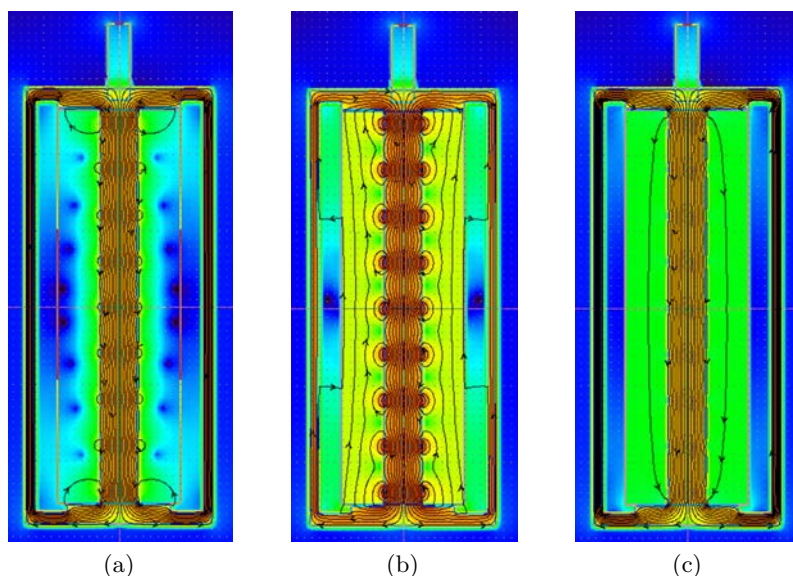
Zmodyfikowano po raz kolejny urządzenie, pamiętając o tym, że rozkład pola magnetycznego wzdłuż rdzenia magnetostrykcyjnego był nierównomierny i zmniejszał się wraz z oddalaniem od źródła stałego pola magnetycznego. Zdecydowano, że niezbędne będzie wprowadzenie do budowy aktuatora dodatkowych elementów mogących wzmocnić to pole. Przedstawiony dlatego został model, w którym rdzeń magnetostrykcyjny został podzielony na mniejsze elementy, między którymi



Rys. 4.41. Model numeryczny układu magnetycznego: 1 – magnesy neodymowe 10×2 mm (N38); CP1 – prosta pomiaru wartości wektora pola magnetycznego stycznego do niej; CP2 – prosta pomiaru wartości wektora pola magnetycznego prostopadłego do niej [66, 75]

wstawiono magnesy neodymowe. Ostatecznie model aktuatora uwzględnił rdzeń złożony z ośmiu jednakowej długości elementów z materiału GMM oraz dziewięciu magnesów neodymowych o wymiarach 10×2 mm, które zostały ułożone naprzemiennie, jak to zostało zaprezentowane na rysunku 4.41.

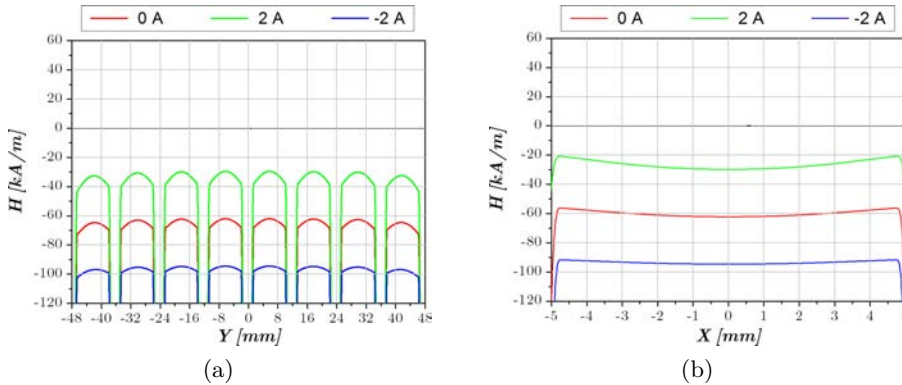
Na tak wykonanym modelu przeprowadzono po raz kolejny analizę numeryczną rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu urządzenia, oczywiście mając na uwadze, że w tym przypadku za rdzeń rozumie się układ magnesów neodymowych i elementów wykonanych z materiału magnetostrykcyjnego. W wyniku przeprowadzonej symulacji stwierdzono, że w elementach z materiału GMM występuje wstępne namagnesowanie, a jego wartość waha się w przedziale 65–74 kA/m (rys. 4.43a) (czerwona linia). Podobnie jak w modelu z dwoma magnesami neodymowymi 10×10 mm, najmniejszą wartość natężenia pola odnotowywano w środkowych przekrojach każdego z elementów GMM. Jednak w przeciwieństwie do poprzedniego przypadku, rozkład pola wzdłuż rdzenia urządzenia jest zdecydowanie bardziej równomierny, co można zauważyć na rysunku 4.42a. Ponadto uzyskana wartość wstępnego namagnesowania jest zbliżona do założonej na początku procesu projektowania aktuatora. Na tej podstawie postanowiono przeprowadzić kolejne dwa testy, dające odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest sterowanie długością rdzenia za pomocą pola magnetycznego generowanego przez cewkę.



Rys. 4.42. Rozkłady wektorów pola magnetycznego: a) generowanego przez magnesy neodymowe, b) przy dodatkowym przepływie prądu o natężeniu $I = 2$ A przez uzwojenie cewki magnetycznej, c) przy przepływie prądu w kierunku przeciwnym [66]

W pierwszym kroku, podobnie jak poprzednio, sprawdzono, czy wygenerowanie pola magnetycznego o przeciwnym zwrocie do pola generowanego przez magnesy neodymowe zmniejszy wartość namagnesowania rdzeni magnetostrykcyjnych, a tym samym spowoduje zmniejszenie ich długości. Analiza otrzymanych wyników pokazała, że w przeciwieństwie do poprzedniego rozwiązania, rozkład linii pola magnetycznego wzdłuż rdzenia GMM jest znacznie bardziej równomierny, co zostało pokazane na rysunku 4.42b. Ponadto wyniki liczbowe wykazały, że w każdym z elementów magnetostrykcyjnych rdzenia udało się zmniejszyć wartość pola magnetycznego, a kształt jego rozkładu pozostał praktycznie niezmienny, jak to zostało zaprezentowane na rysunkach 4.43a i 4.43b (linia niebieska).

Mimo iż wciąż istniała nierównomierność w zmianie wartości pola po długości każdego z rdzeni, to i tak w części środkowej poszczególnych rdzeni wartość pola została zredukowana do poziomu 27 kA/m ($\Delta H = 38 \text{ kA/m}$), a przy magnesach neodymowych do wartości 45 kA/m ($\Delta H = 29 \text{ kA/m}$), to różnica w tych wartościach nie była już tak duża jak w przypadku poprzedniego modelu. Ponadto wykazano, że za pomocą takiego sterowania polem magnetycznym możliwe będzie zmniejszenie długości każdego z prętów magnetostrykcyjnych, a zredukowana wartość pola magnetycznego zachowa znak. W następnym kroku podjęto działania



Rys. 4.43. Wartość natężenia pola magnetycznego H [kA/m]: a) wzbudzonego wzdłuż osi pręta GMM – CP1, b) wzbudzonego w przekroju poprzecznym prętów GMM – CP2, dla trzech kolejnych przypadków: linia czerwona – przez magnesy neodymowe, linia zielona – przy dodatkowym przepływie prądu o natężeniu $I = 2$ A przez uzwojenie cewki magnetycznej, linia niebieska – przy przepływie prądu w kierunku przeciwnym [66, 75]

mające za zadanie odpowiedzieć na pytanie, czy zastosowanie pola magnetycznego zgodnie ze zwrotem pola generowanego przez magnesy stałe umożliwi zwiększenie jego wartości. Wyniki otrzymanej symulacji zaprezentowano na rysunku 4.42c, widać wyraźnie, że linie pola magnetycznego są równomierne, a ich kierunek jest praktycznie równoległy do głównej osi urządzenia. Otrzymane wyniki liczbowe pokazały jednak, że pomimo tak równomiernego rozłożenia pola magnetycznego w akuatorze, wartość natężenia pola magnetycznego, podobnie jak w poprzedniej symulacji, jest nierównomierna wzdłuż każdego z rdzeni, jak to zostało zaprezentowane na rysunkach 4.43a i 4.43b (linia zielona). Ważne natomiast jest to, że charakter tych zmian (kształt oraz zmiana wartości) jest bardzo podobny do uprzednio wspomnianego i wynosi odpowiednio dla środkowych części rdzeni GMM 95 kA/m ($\Delta H = 30$ kA/m) oraz dla części położonych najbliżej magnesów neodymowych 100 kA/m ($\Delta H = 26$ kA/m). Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że w przypadku każdej z symulacji zmiana namagnesowania rdzeni magnetostrykcyjnych w ich przekroju poprzecznym była niewielka, jak to zostało zaprezentowane na rysunku 4.43b, i nie będzie miała wpływu na działanie całego urządzenia.

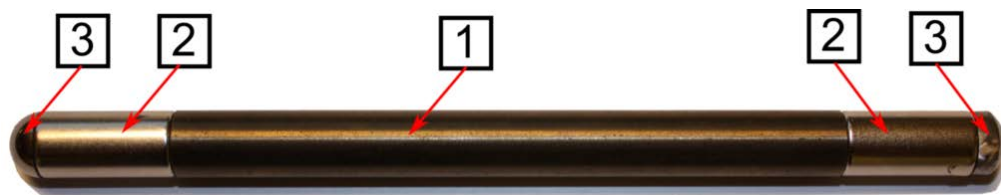
Otrzymane w wyniku przeprowadzonych symulacji wyniki pokazały, że koncepcja zakładająca wykorzystanie wielu krótkich elementów magnetostrykcyjnych poprzedzielanych magnesami stałymi ułatwia znacznie bardziej równomierny rozkład wartości pola magnetycznego wzdłuż całego urządzenia. Trzeba jednak zwrócić uwagę na fakt, że otrzymane wartości ΔH są znacznie mniejsze niż

w przypadku koncepcji z jednym długim rdzeniem GMM i dwoma magnesami neodymowymi na jego końcach. Wiąże się to z koniecznością stosowania znacznie większych wartości pola magnetycznego generowanego przez cewkę w celu uzyskania podobnych wyników, a co za tym idzie większym prądem zasilania oraz grzaniem się całego układu.

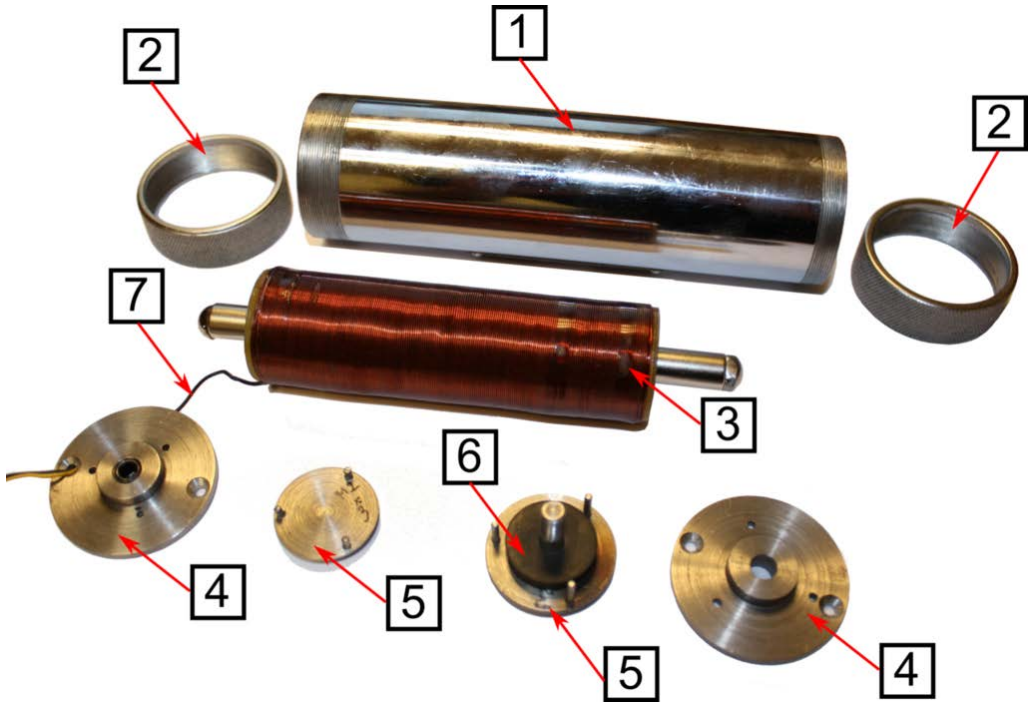
4.7.3. Prototyp aktuatora

Na podstawie wyników numerycznej symulacji rozkładu pola magnetycznego we wnętrzu aktuatora stwierdzono, że założony cel będzie możliwy do zrealizowania. Zdecydowano się więc na wykonanie rzeczywistego urządzenia z rdzeniem wykonanym z materiału kompozytowego o gigantycznej magnetostrykcji.

Do realizacji wybrano konstrukcję, która opierała się na rdzeniu GMM wykonanym z jednego kawałka materiału, z zamocowanymi na jego końcach magnesami neodymowymi. Powodem, dla którego zdecydowano się na realizację tej konstrukcji, była przede wszystkim wielkość ΔH , która dla tego rozwiązania zgodnie z przeprowadzonymi symulacjami miała największą wartość. Mimo że konstrukcja taka nie zapewniała odpowiedniego rozkładu natężenia pola magnetycznego na całej długości rdzenia magnetostrykcyjnego oraz istniejącego ryzyka przesterowania urządzenia (otrzymanie wartości pola magnetycznego o przeciwnym znaku), to zalety płynące z uzyskania dużo większej możliwości regulacji odkształceniem urządzenia były kluczowe. Na rysunkach 4.44 i 4.45 zaprezentowane zostały najważniejsze elementy aktuatora. Za rdzeń posłużył kompozyt zawierający cząsteczki proszku Terfenolu-D, do którego zostały zamocowane dwa magnesy neodymowe klasy N38 z elementami mającymi zapewnić utrzymanie rdzenia w osi cewki sterującej. Tak przygotowany rdzeń został umieszczony w specjalnie do tego celu przygotowanej cewce, a następnie wszystkie elementy zostały wprowadzone do cylindrycznej obudowy i szczelnie zamknięte z jednoczesnym wprowadzeniem do materiału odpowiedniej wartości naprężenia wstępnego.



Rys. 4.44. Układ wstępnego namagnesowania: 1 – rdzeń z materiału wykazującego efekt magnetostrykcyjny; 2 – magnesy neodymowe; 3 – elementy osiujące [66]

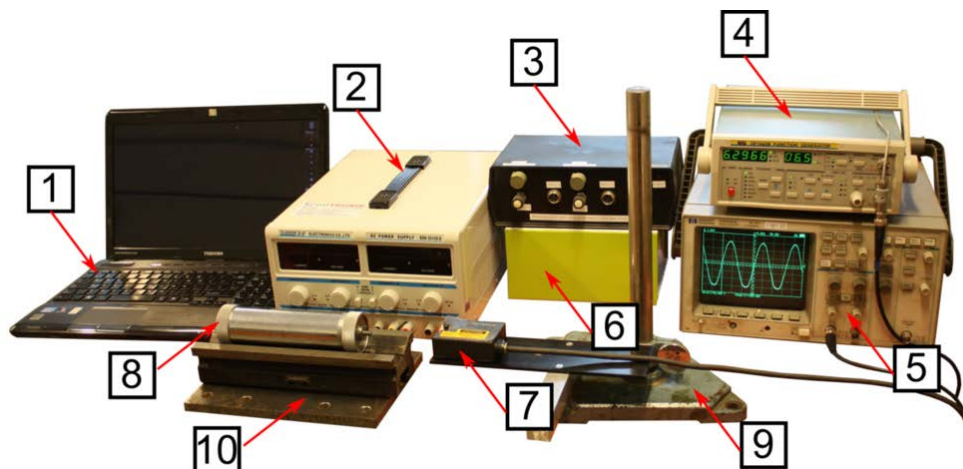


Rys. 4.45. Komponenty aktuatora GMM: 1 – obudowa, 2 – nakrętki, 3 – zaprojektowana cewka magnetyczna z zamocowanym układem wstępnego namagnesowania, 4 – pokrywy, 5 – talerze osiujące, 6 – gumowy krążek wprowadzający naprężenie wstępne w rdzeniu, 7 – przewody zasilające cewkę [66]

Przygotowany w ten sposób układ został następnie przetestowany na stworzonym specjalnie do tego celu stanowisku badawczym, którego opis znajduje się w dalszej części.

4.7.4. Stanowisko pomiarowe

W celu sprawdzenia czy rzeczywista konstrukcja urządzenia jest w stanie sprostać założeniom, konieczne było przeprowadzenie wielu testów, z których najważniejsze było sprawdzenie czy zmiana pola magnetycznego generowanego przez cewkę jest w stanie spowodować zmianę w magnetostrykcji materiału aktywnego. Ze względu na to, że w założeniu urządzenie miało pracować w układzie niskoczęstotliwościowym, stanowisko pomiarowe oraz parametry pracy aktuatora należało dobrać tak, by spełniało wcześniej założony cel. Za wielkość krytyczną uznano różnicę między skrajnymi położeniami elementu ruchomego. W celu realizacji zaplanowanych działań, wykonane zostało dedykowane stanowisko eksperymen-

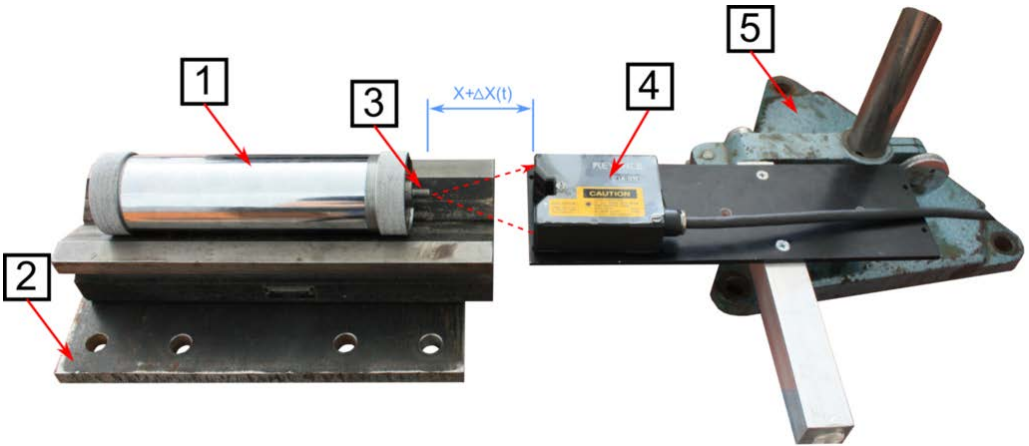


Rys. 4.46. Stanowisko do prowadzenia testów na aktuatorze GMM:
 1 – jednostka sterująca PC wyposażona w kartę pomiarową, 2 – zasilacz prądu stałego,
 3 – wzmacniacz, 4 – generator sygnału wymuszającego, 5 – oscyloskop,
 6 – regulator układu zasilającego, 7 – system pomiaru wychylenia aktuatora (głowica laserowa), 8 – aktuator GMM, 9 – stojan głowicy laserowej, 10 – łożo pomiarowe [76]

talne, które zaprezentowano na rysunku 4.46. Jego budowę można podzielić na następujące części, przyjmując za kryterium pełnione przez nie funkcje:

- MECHANICZNA – łożo pomiarowe mające za zadanie zapewnić niezmienną pozycję badanego obiektu oraz stojak ułatwiający odpowiednie zamocowanie laserowej głowicy pomiarowej,
- MAGNETYCZNA – układ zasilający cewkę aktuatora z możliwością regulacji płynącego prądu,
- POMIAROWA – system z głowicą laserową służący do pomiaru wychylenia ruchomego końca aktuatora $\Delta X(t) = L$ (rys. 4.47). Ponadto układy umożliwiające rejestrację zmiany wartości prądu oraz napięcia na cewce aktuatora,
- STERUJĄCA – regulator układu zasilającego podłączony do generatora sygnału sterującego, którego zadaniem była kontrola prądu na cewce (zmiana wartości z określoną częstotliwością),
- AKWIZYCYJNA – komputer wyposażony w kartę pomiarową z możliwością rejestracji wybranych sygnałów oraz ich zapisu na dysku z użyciem autorskiego programu komputerowego opracowanego w środowisku Agilent VEE.

Tak przygotowane stanowisko ułatwia jednoczesne zasilanie prądem zmiennym o określonej stałej częstotliwości cewki badanego urządzenia oraz rejestrację zachowania się urządzenia pod wpływem zmiennego pola magnetycznego generowanego przez cewkę. Całość kontrolowana była przez komputer z użyciem dedykowanego oprogramowania opracowanego w środowisku Agilent VEE. W celu zobrazowania



Rys. 4.47. Układ pomiaru wartości wychylenia (przemieszczenia) końca aktuatora: 1 – badany obiekt, 2 – łożo pomiarowe, 3 – końcówka montażowa aktuatora GMM, 4 – system pomiaru wychylenia (głowica laserowa), 5 – stojan głowicy laserowej.

X – wstępna odległość końcówki montażowej od głowicy pomiarowej;

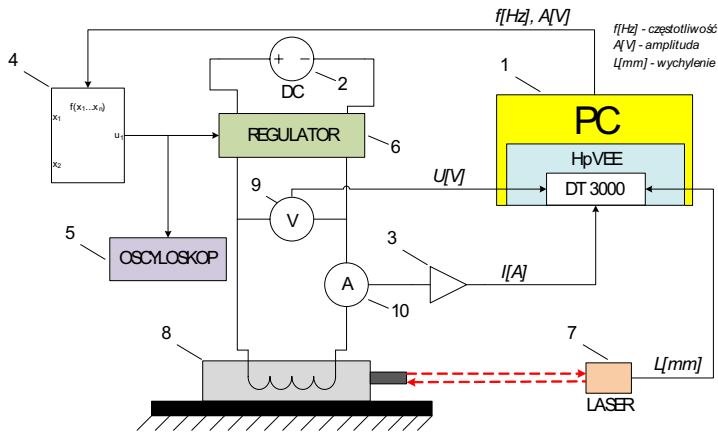
$\Delta X(t)$ – aktualna wartość wychylenia.

Na czerwono zaznaczono drogę wiązki laserowej [76]

zasady działania stanowiska, na rysunku 4.48 zaprezentowano jego schemat wraz z zaznaczonymi kanałami przepływu informacji i rejestracji sygnałów pomiarowych.

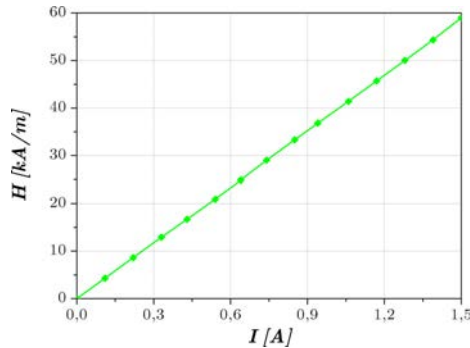
4.7.5. Charakterystyka układu magnetycznego

Zgodnie z przyjętą koncepcją działania aktuatora, kompozytowy rdzeń magnetostrykcyjny powinien zostać na wstępie poddany działaniu pola magnetycznego o natężeniu wynoszącym $H = 60$ kA/m. Wspomniana wielkość stanowiła wartość odniesienia, swoisty punkt zerowy, od którego urządzenie powinno zaczynać pracę. Uzyskanie tego efektu miały zapewniać magnesy stałe umieszczone we wnętrzu aktuatora. Zasada działania urządzenia polegała na sterowaniu prądem płynącym przez uzwojenie cewki w odpowiednim kierunku. Wartość prądu sterowania powinna być tak dobrana, aby zapewnić generowanie za pomocą cewki pola magnetycznego o wartości również 60 kA/m. Sterowanie kierunkiem przepływu prądu przez uzwojenie zastosowanego solenoidu miało umożliwić redukcję pola magnetycznego, działającego na rdzeń magnetostrykcyjny do zera lub zwiększenie jego natężenia do $H = 120$ kA/m. Testy przeprowadzone na przygotowanej cewce wykazały, iż w celu wytworzenia w jej wnętrzu pola o wymaganym natężeniu należy zasilic ją prądem o natężeniu $I = 1,5$ A. Na rysunku 4.49 zaprezentowany został wynik przeprowadzonych testów dla cewki zasilanej prądem stałym.



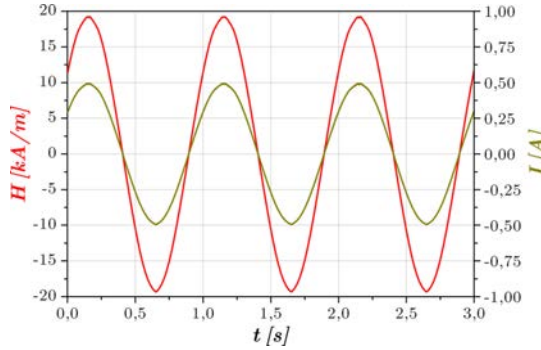
Rys. 4.48. Schemat działania stanowiska do testowania aktuatorów GMM:

1 – jednostka sterująca PC wyposażona w kartę pomiarową DT 3000, 2 – zasilacz prądu stałego, 3 – wzmacniacz, 4 – generator sygnału wymuszającego, 5 – oscyloskop, 6 – regulator układu zasilającego, 7 – system pomiaru wychylenia aktuatora (głowica laserowa), 8 – aktuator GMM, 9 – układ pomiaru napięcia na cewce, 10 – układ pomiaru prądu na cewce [66]

Rys. 4.49. Zależność rzeczywistego natężenia pola magnetycznego (H) generowanego przez cewkę od wartości prądu (I) płynącego przez jej uzwojenie [76]

Ze względu na to, że aktuator miał pracować ze zmienną częstotliwością, należało sprawdzić, w jaki sposób zmieniać się będzie natężenie pola magnetycznego dla takiego układu. Przyjęto, że prąd będzie się zmieniał z częstotliwością 1 Hz, a sygnał będzie miał charakter sinusoidalny. W ten sposób zarejestrowano zmianę wartości natężenia pola magnetycznego w czasie dla badanej cewki. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 4.50.

Na podstawie zebranych danych stwierdzono, że w przypadku zasilania zastosowanej cewki zmiennym prądem o wartości powyżej $\pm 0,5$ następowała degeneracja

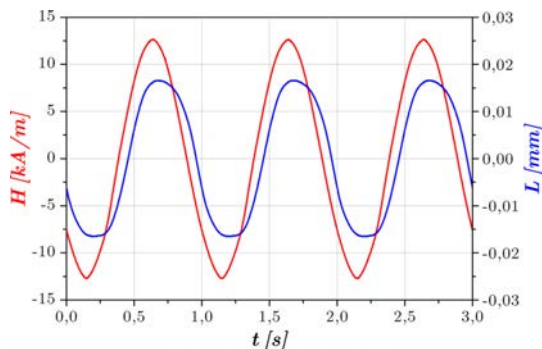


Rys. 4.50. Przebieg natężenia pola magnetycznego (H) generowanego przez cewkę, wywołany zmianami wartości płynącego prądu (I) z częstotliwością $f = 1$ Hz [76]

sinusoidalnego charakteru zmian generowanego przez cewkę pola magnetycznego. Zauważono, że w przypadku zastosowania prądu zmiennego o określonej częstotliwości zmniejsza się radykalnie użyteczny zakres prądu zasilania. W przypadku częstotliwości pracy urządzenia wynoszącej 1 Hz, użyteczny prąd zasilania wynosił w sumie 1 A. Dlatego w przypadku kolejnych testów konieczna wydaje się zmiana parametrów cewki w taki sposób, aby możliwe było osiągnięcie większych częstotliwości pracy, zachowując przy tym amplitudę zmian pola magnetycznego we wnętrzu cewki na poziomie 60 kA/m.

4.7.6. Testowanie aktuatora GMM

Po ostatecznym zestawieniu wszystkich elementów oraz wstępnych testach stanowiska pomiarowego przeprowadzono badania na przygotowanej prototypowej konstrukcji aktuatora. Eksperyment polegał na zwiększaniu wartości prądu płynącego przez uzwojenie cewki, w celu wprowadzenia zmian w polu magnetycznym oddziałującym na rdzeń magnetostrykcyjny, a tym samym na jego odkształcenie. Wartość prądu była dobierana w taki sposób, aby charakter zmian generowanego przez cewkę pola magnetycznego był sinusoidalny. Ze względu na to, że wraz ze zmianą naprężenia wstępnego zmieniała się charakterystyka magnetomechaniczna rdzenia magnetostrykcyjnego, konieczne było dobranie takiej wartości naprężenia, aby dla zadanego pola magnetycznego uzyskać jak największe odkształcenie materiału. Na rysunku 4.51 zaprezentowano wynik wychylenia końcówki aktuatora (L) w funkcji zmiany przyłożonego natężenia pola magnetycznego działającego na rdzeń z materiału GMM. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem wymuszenia, tj. natężeniem pola magnetycznego, a odpowiedzią aktuatora w postaci odkształcenia rdzenia. Jednocześnie zauważono, iż maksymalna wartość generowanego pola magnetycznego, zachowując



Rys. 4.51. Wpływ generowanego przez cewkę pola magnetycznego (H) na przemieszczenie (L) końca aktuatora GMM. Badanie wykonane przy częstotliwości zmian wartości płynącego prądu równej $f = 1$ Hz [76]

sinusoidalny charakter, wynosiła zaledwie 12,7 kA/m. Zmniejszenie wartości H w porównaniu z wynikiem uzyskanym dla samej cewki (rys. 4.50) tłumaczy się obecnością rdzenia magnetostrykcyjnego we wnętrzu cewki, a także pewnym rozplywem pola magnetycznego na pozostałe części urządzenia, w tym na obudowę magnetyczną. Elementy te charakteryzują się dużymi współczynnikami względnej przenikalności magnetycznej, a tym samym umożliwiają domykanie obwodu magnetycznego urządzenia, jednak jednocześnie wpływają istotnie na parametry pracy cewki. Stwierdzono, iż fakt ten powinien być przeanalizowany w przypadku kolejnych testów aktuatora, co w rezultacie powinno poprawić konstrukcję urządzenia. W rezultacie prac badawczych wykazano, że stymulacja polem magnetycznym (12,7 kA/m) rdzenia magnetostrykcyjnego w urządzeniu wywołała przemieszczanie końcówki aktuatora $\Delta l \pm 0,017$ mm, co daje 0,034 mm wartości międzyszczytowej wychylenia (L).

Na podstawie przeprowadzonych testów wykazano, iż zasada działania zaprojektowanego aktuatora jest zgodna ze wstępnie zaproponowaną koncepcją, która zakładała wprowadzenie wstępnego pola magnetycznego o określonym natężeniu do rdzenia magnetostrykcyjnego, a następnie zmianę natężenia tego pola przez poddanie go cyklicznemu zwiększaniu i zmniejszaniu za pomocą cewki magnetycznej. Rezultatem tego działania było wydłużanie się oraz skracanie rdzenia wykonanego z kompozytowego materiału magnetostrykcyjnego. Przypuszcza się, iż odpowiednia zmiana parametrów cewki magnetycznej umożliwi zwiększenie dopuszczalnej wartości płynącego przez nią prądu, a w rezultacie realne będzie uzyskanie przemieszczenia aktuatora powyżej 0,1 mm.

4.8. Zasadność i kierunki dalszych badań

Znaczące zalety kompozytów zawierających sproszkowany GMM (eliminacja prądów wirowych, wzrost wytrzymałości na rozciąganie), mimo mniejszych wartości uzyskiwanej magnetostrykcji i efektu Villariego (w porównaniu do litych materiałów GMM typu Terfenol-D), ułatwiają zastosowanie ich w wielu różnych aplikacjach oraz uzasadniają potrzebę dalszych badań.

Za szczególnie zasadne uznać należy podjęcie następujących zagadnień:

- Zbadanie w jaki sposób na magnetostrykcję wpływa zmiana frakcji proszku, tzn. zastosowanie ziaren o różnej wielkości w ściśle określonych przedziałach, np. cząsteczek o wielkości w zakresie do 100 μm . Dodatkowym parametrem powinna być postać proszku (płatki, pręciki, czy proszek o obłych kształtach). Literatura przedmiotu z tego zakresu jest niezbyt obszerna, a dotychczasowe rezultaty dyskusyjne.
- Oszacowanie wpływu matrycy kompozytu i sprawdzenie czy między matrycą a wypełniaczem zachodzą interakcje. Sprawdzenie, jaki wpływ zarówno na wielkość uzyskiwanej magnetostrykcji, jak i inne właściwości ma rodzaj zastosowanej matrycy (np. matryce z różnych grup polimerowych czy też matryce ceramiczne).
- Sprawdzenie, w jaki sposób zachowuje się wytworzony kompozyt podczas cyklicznych, losowych i impulsowych zmian natężenia pola magnetycznego. Zasadne jest ponadto zbadanie, czy wykorzystanie silniejszego natężenia pola magnetycznego o wartości powyżej 1 T spowoduje nasycenie się materiału oraz bardziej nieliniowy rozkład pola pętli histerezy.
- Sprawdzenie, czy zmiana ułożenia wektora pola magnetycznego polaryzacji, w stosunku do osi głównej próbki, wpływa na magnetostrykcję kompozytu, a jeżeli wpływa, to jak duży jest ten wpływ. Umożliwiłoby to uzyskanie optymalnego kąta polaryzacji próbki w celu osiągnięcia jak największych wartości magnetostrykcji.
- Zbadanie magnetostrykcji kompozytów GMM dla przypadku statycznego rozciągania, co umożliwi lepszą charakterystykę materiału i poszerzyłoby zakres jego aplikacji.
- Zbadanie, w jaki sposób zmieniają się właściwości nowo wytworzonych materiałów kompozytowych w przypadku pracy w różnym środowisku – badania fizykochemiczne.
- Wykonanie badań mających na celu wytworzenie hybrydowych materiałów Smart, przez łączenie materiałów wykazujących różne efekty krzyżowe, np. materiał magnetostrykcyjny–materiał piezoelektryczny.
- Kontynuację prac na rzecz wykorzystania tej klasy kompozytów w zakresie odzyskiwania energii (ang. *energy harvesting*).

- Znalezienie nowych obszarów aplikacji dla nowo wytworzonych materiałów kompozytowych.

Bibliografia

- [1] Liang Y., Zheng X., *Experimental researches on magneto-thermo-mechanical characterization of Terfenol-D*, Acta Mechanica Solida Sinica, 20, 4, 2007.
- [2] Busbridge S.C., Kurdiyeh N., Guo Z.J., Wang B.W., Piercy A.R., *Effect of the elastic modulus of the matrix on the coupling of magnetostrictive composites*, IEEE Transactions on Magnetics, 36, 5, 2000, 3235–3237.
- [3] Duenas T.A., Carman G.P., *Large magnetostrictive response of Terfenol-D resin composites*, Journal of Applied Physics, 87, 9, 2000, 4696–4701.
- [4] Dobrzański L.A., Tomiczek A.E., Szweczyk A., Piotrowski K., Gutowska M.U., Więckowski J., *Physical properties of magnetostrictive composite materials with the polyurethane matrix*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 57, 1, 2012, 21–27.
- [5] Vilas J.L., Laza J.M., Rodriguez C.N.D., Rodriguez V., Leon L.M., *New polyurethane-based magnetostrictive composites: Dynamical mechanical properties*, Polymer Engineering and Science, 53, 4, 2013, 744–751.
- [6] Lo C.Y., Or S.W., Wa C.H.L., *Large magnetostriction in epoxy-bonded Terfenol-D continuous – fiber composite with [112] crystallographic orientation*, IEEE Transactions on Magnetics, 10, 42, 2006, 3111–3131.
- [7] Stabik J., Chrobak A., Haneczok G., Dybowska A., *Magnetic properties of polymer matrix composites filled with ferrite powders*, Archives of Materials Science and Engineering, 48, 2, 2011, 97–102.
- [8] Tian J., Zuo Z., Pan D., Zhang S., *Bonded Terfenol-D composites with low eddy current loss and high magnetostriction*, Rare Metals, 29, 6, 2010, 579–582.
- [9] Węgliński B., *Soft magnetic powder composites – dielectromagnetics and magneto-dielectrics*, Reviews on P/M and Physical Ceramics, 4, 2, 1990, 79–154.
- [10] Ziębowicz B., Szewieczek D., Dobrzański L.A., Wysłocki J.J., Przybył A., *Structure and properties of the composite materials consisting of the nanocrystalline $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ alloy powders and polyethylene*, Journal of Materials Processing Technology, 175, 2005, 457–462.
- [11] Guruswamy S., Loveless M.R., Srisukhumbowornchai N., McCarter M.K., Teter J.P., *Processing of Terfenol-D alloy based magnetostrictive composites by dynamic compaction*, IEEE Transactions on Magnetics, 36, 5, 2000, 3219–3222.
- [12] Liu H.Y., Li Y.X., Qu J.P., Liu B.D., Guo H.Y., Meng F.B., Hu L., Li S.Y., Zhang Z.X., Qin H., Chen J.L., Zhao H.W., Wu G.H., *Study on the preparation techniques and properties of bonded magnetostrictive materials*, Journal of Applied Physics, 91, 10, 2002, 8213–8215.
- [13] Bodnar W., Stoch P., Chmista J., Pszczoła J., Zachariasz P., Suwalski J., *Electrical resistivity and mössbauer effect investigations on $Tb_{0.27}Dy_{0.73}(Mn_{1-x}Fe_x)_2$ intermetallics*, Journal of Alloys and Compounds, 505, 2, 2010, 393–399.

- [14] Wu L., Zhan W., Chen X., Chen X., *The effects of boron on Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe₂ compound*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 139, 3, 1995, 335–338.
- [15] Zheng X., Zhang P., Li F., Cheng Z., Shen B., *A magnetic, magnetostrictive and Mössbauer study of Tb_{0.3}Dy_{0.7-x}Pr_x(Fe_{0.9}Al_{0.1})_{1.95} alloys*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321, 2009, 3842–3846.
- [16] Chen Y., Snyder J.E., Schwichtenberg C.R., Dennis K.W., Falzgraf D.K., McCullum W., Jiles D.C., *Effect of the elastic modulus of the matrix on magnetostrictive strain in composites*, Journal of Applied Physics, 74, 8, 1999, 1159–1161.
- [17] Guo Z.J., Busbridge S.C., Zhang Z.D., Wang B.W., Piercy A.R., *Dynamic magnetic and magnetoelastic properties of epoxy-TbFe₂ composites*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 239, 2002, 554–556.
- [18] Guo Z.J., Busbridge S.C., Piercy A.R., Zhang Z.D., G. Z.X., Wang B.W., *Effective magnetostriction and magnetomechanical coupling of Terfenol-D composites*, Applied Physics Letters, 78, 22, 2001, 3490–3492.
- [19] Bajorek R., Bajorek J., Węgliński B., *Właściwości magnetyczne dielektromagnetyków w polach przemiennych i wirujących*, Przegląd Elektrotechniczny, 80, 2, 2004, 172–175.
- [20] Srinivasan K., *Composite Materials. Production, Properties, Testing and Application*, Alpha Science International, Ltd., Oxford 2009.
- [21] Bednarek S., *The giant linear magnetostriction in elastic ferromagnetic composites within a porous matrix*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 301, 2006, 200–207.
- [22] Jia A., Zhang T., Meng H., Jiang C., *Magnetostriction and eddy current loss of bonded giant magnetostrictive particle composites*, Acta Metallurgica Sinica, 45, 12, 2009, 1473–1478.
- [23] Rodríguez C., Rodríguez M., Orue I., Vilas J.L., Barandiarán J.M., Gubieda M.L.F., León L.M., *New elastomer – Terfenol-D magnetostrictive composite*, Sensors and Actuators A: Physical, 149, 2009, 252–254.
- [24] Sandlund L., Fahlander M., Cedell T., Clark A.E., Restorff J.B., Wun-Fogle M., *Magnetostriction, elastic moduli, and coupling factors of composite Terfenol-D*, Journal of Applied Physics, 75, 10, 1994, 5656–5658.
- [25] Ruiz de Angulo L., Abell J.S., Harris I.R., *Magnetostrictive properties of polymer-bonded Terfenol-D composites*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 157/158, 1996, 508–509.
- [26] Flatau A.B., Dapino M.J., Calkins F.T., *Magnetostrictive composites*, Comprehensive Composite Materials, 5, 2003, 563–574.
- [27] Nan C.W., *Effective magnetostriction of magnetostrictive composites*, Applied Physics Letters, 72, 22, 1998, 2897–2900.
- [28] Dong X., Qi M., Guan X., Ou J., *Fabrication of Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂/epoxy composites: Enhanced uniform magnetostrictive and mechanical properties using a dry process*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 323, 2011, 351–355.
- [29] Hudson J., Busbridge S.C., Piercy A.R., *Magnetomechanical coupling and elastic moduli of polymer-bonded Terfenol composites*, Journal of Applied Physics, 83, 11, 1998, 7255–7257.
- [30] Pasquale M., Lim S.H., *High frequency magnetic properties of polymer-bonded Terfenol-D composites*, Journal of Applied Physics, 85, 8, 1999.

- [31] Quintero S.M.M., Braga A.M.B., Weber H.I., Bruno A.C., Araújo J.F.D.F., *A magnetostrictive composite-fiber bragg grating sensor*, *Sensors*, 10, 2010, 8119–8128.
- [32] Shanmugham M., Bailey H., Armstrong W.D., *Performance loss of Terfenol-D particle epoxy composites under cyclic magneto-mechanical loading at the matrix glass transition start and finish temperature*, *Materials Science and Engineering: A*, 369, 1–2, 2004, 267–274.
- [33] Yan J.C., Lü S.X., Xie X.Q., Zhou Z.G., Yang S.Q., He S.Y., *An alignment evaluation method for polycrystalline Terfenol-D based on magnetostriction effect*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 234, 2001, 431–436.
- [34] Duenas T.A., Carman G.P., *Particle distribution study for low-volume fraction magnetostrictive composites*, *Journal of Applied Physics*, 90, 5, 2001, 2433–2439.
- [35] Kwon O.Y., Kim J.C., Kwon Y.D., Yang D.J., Lee S.H., Lee Z.H., Hong S.H., *Magnetostriction and magnetomechanical properties of grain-oriented Tb_{0.33}Dy_{0.67}Fe_y/epoxy composite*, *Applied Physics A*, 80, 2005, 1563–1566.
- [36] Neressian N., Or S.W., Carman G.P., *Magneto-thermo-mechanical characterization of 1–3 type polymer-bonded Terfenol-D composites*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 263, 2003, 101–112.
- [37] Or S.W., Li T., Chan H.L.W., *Dynamic magnetomechanical properties of Terfenol-D/epoxy pseudo 1–3 composites*, *Journal of Applied Physics*, 97, 2005, 10M308.
- [38] Ren W.J., Or S.W., Chan H.L.W., Zhang Z.D., *Magnetoelastic properties of polymerbonded Sm_{0.88}Dy_{0.12}Fe_{1.93} pseudo 1–3 composites*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 293, 2005, 908–912.
- [39] Rodríguez C., Barrio A., Orue I., Vilas J.L., León L.M., Barandiarán J.M., Fdez-Gubieda R.M.L., *High magnetostriction polymer-bonded Terfenol-D composites*, *Sensors and Actuators A*, 142, 2008, 538–541.
- [40] McKnight G.P., Carman G.P., *Large magnetostriction in Terfenol-D particulate composites with preferred [112] orientation*, [w:] *Smart Structures and Materials 2001: Active Materials: Behavior and Mechanics*, C.S. Lynch (red.), 4333, 2001, 178–183.
- [41] Or S.W., Carman G.P., *Dynamic magnetoelastic properties of epoxy-bonded Terfenol-D particulate composite with a preferred [112] crystallographic orientation*, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 10, 2005, 2790–2792.
- [42] Cai N., Zhai J., Nan C.W., Lin Y., Shi Z., *Dielectric, ferroelectric, magnetic, and magnetoelectric properties of multiferroic laminated composites*, *Physical Review B*, 68, 22, 2003, 224103.
- [43] Kerrigan C.A., Ho K.K., Mohanchandra K.P., Carman G.P., *Sputter deposition and analysis of thin film Nitinol/Terfenol-D multilaminate for vibration damping*, *Smart Materials and Structures*, 18, 2009, 015007.
- [44] Grabham N.J., Beeby S.P., White N.M., *Effects of the binder material on the mechanical properties of thick-film magnetostrictive materials*, *Sensors and Actuators A*, 110, 2004, 365–370.
- [45] Lu X., Li H., *Magnetic properties of Terfenol-D film on a compliant substrate*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322, 2010, 2113–2116.

- [46] Michalski B., Leonowicz M., Kaszuwara W., *Polymer bonded hard magnetic foils for MEMS applications*, Kompozyty, 11, 1, 2011, 29–33.
- [47] Schwartz M., *Smart Materials*, CRC Press, Boca Raton, London, New York 2009.
- [48] Gancedo L.G., Busbridge S.C., Button T.W., *Enhancement of magnetostriction in internally-biased Terfenol-D 2-2 composites*, IEEE Transactions on Magnetics, 44, 11, 2008, 3028–3031.
- [49] Guo Y.Y., Zhou J.P., Liu P., *Magnetolectric characteristics around resonance frequency under magnetic field in Pb(Zr, Ti)O₃/Terfenol-D laminate composite*, Current Applied Physics, 10, 2010, 1092–1095.
- [50] Ma J., Shi Z., Nan C.W., *Magnetolectric properties of composites of single Pb(Zr, Ti)O₃ rods and Terfenol-D/epoxy with a single-period of 1–3 type structure*, Advanced Materials, 19, 2007, 2571–2573.
- [51] Ryu J., Carazo A.V., Uchino K., Kim H.E., *Magnetolectric properties in piezoelectric and magnetostrictive laminate composites*, Japanese Journal of Applied Physics, 40, 2001, 4948–4951.
- [52] Yao W., Hou Y., Dong S., Huang X., Yu Q., Li X., *Influence of magnetic fields on the mechanical loss of Terfenol-D/PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃/Terfenol-D laminated composites*, Journal of Alloys and Compounds, 509, 24, 2011, 6920–6923.
- [53] Kwon O.Y., Kim K.H., Yu M.K., Hong S.H., *Fabrication process and magnetostriction of infiltrated Terfenol-D/epoxy composite*, Key Engineering Materials, 334–335, 2007, 1121–1124.
- [54] Olabi A.G., Grunwald A., *Design and application of magnetostrictive materials*, Materials & Design, 29, 2, 2008, 469–483.
- [55] Or S.W., Nersessian N., Carman G.P., *Dynamic magnetomechanical behavior of Terfenol-D/epoxy 1–3 particulate composites*, IEEE Transactions on Magnetics, 40, 1, 2004, 71–77.
- [56] Lim S.H., Kim S.R., Kang S.Y., Park J.K., Nam J.T., Son D., *Magnetostrictive properties of polymer-bonded Terfenol-D composites*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 191, 1999, 113–121.
- [57] Pasquale M. and Sasso C., Lim S.H., *Analysis and optimization of the magnetomechanical properties of Terfenol-D composites at audio frequencies*, IEEE Transactions on Magnetics, 35, 5, 1999, 3829–3831.
- [58] Rodríguez C., Barrio A., Orue I., Vilas J.L., León L.M., Barandiarán J.M., Fdez-Gubieda R.M.L., *Magnetostrictive properties of polymer-bonded Terfenol-D composites*, Sensor Letters, 5, 1, 2007, 23–25.
- [59] Altin G., Ho K.K., Henry C.P., Carman G.P., *Static properties of crystallographically aligned Terfenol-D/polymer composites*, Journal of Applied Physics, 101, 3, 2007, 033537.
- [60] Guan X., Dong X., Ou J., *Predicting performance of polymer-bonded Terfenol-D composites under different magnetic fields*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321, 2009, 2742–2748.
- [61] Hsieh S.L., Tuan W.H., *Elastic and thermal expansion behavior of two-phase composites*, Materials Science and Engineering A, 425, 2006, 349–360.
- [62] Leonowicz M., *Materiały magnetostrykcyjne*, Inżynieria Materiałowa, 2, 2004, 68–69.

- [63] Dong X., Qi M., Guan X., Ou J., *Microstructure analysis of magnetostrictive composites*, Polymer Testing, 29, 2010, 369–374.
- [64] Kendall D., Piercy A.R., *The frequency dependence of eddy current losses in Terfenol-D*, Journal of Applied Physics, 73, 1993, 6174–6176.
- [65] Kaleta J., Lewandowski D., Mech R., Zając P., *Metal, ceramic and polymeric composites for various uses*, rozdz. Smart magnetic composites, InTech, Rijeka 2011, 475–504.
- [66] Mech R., *Właściwości magnetomechaniczne kompozytów na bazie proszków z materiału o gigantycznej magnetostrykcji*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, w przygotowaniu.
- [67] Mech R., *Badanie właściwości magnetomechanicznych kompozytów na bazie proszków z materiałów o gigantycznej magnetostrykcji*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2008.
- [68] Kaleta J., Lewandowski D., Mech R., *Magnetomechanical properties of monolithic Terfenol-D versus epoxy-bonded composite with Terfenol-D powder*, [w:] *Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM '11)*, C.K.C. Daejeon (red.), Techno Press, Seoul, Korea, 2011, 2183–2192.
- [69] Gąsior P., Kaleta J., Sankowska A., *Metody monitorowania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych z wykorzystaniem czujników światłowodowych*, [w:] *XII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Jachranka 2006.
- [70] Sankowska A., Błażejowski W., Gąsior P., Kaleta J., *Optical fiber sensors integrated with composite material based constructions*, [w:] *Proc. SPIE Lightguides and Their Applications III*, J. Wójcik, W. Wójcik (red.), 6608 2007, 66081L–66081L–9.
- [71] Gąsior P., *Metoda monitorowania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych na paliwa gazowe z wykorzystaniem pomiarów odkształceń czujnikami światłowodowymi*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2012.
- [72] Kaleta J., Mech R., *Wzbudnik drgań na bazie kompozytu zawierającego Terfenol-D. budowa, właściwości, aplikacje*, [w:] *Proceedings VII-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures*, Augustów 2013, 151–154.
- [73] Kaleta J., Lewandowski D., Mech R., *Actuator with magnetostrictive composite core*, [w:] *5th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART'2011*, Universität des Saarlandes, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken 2011, 1–8, dokument elektroniczny.
- [74] Kupczyński A., *Wpływ proszków żelaza karbonylkowego i Terfenolu-D na właściwości magnetomechaniczne kompozytu na bazie żywicy epoksydowej*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2010.
- [75] Bodniewicz D., Lewandowski D., Kaleta J., *Numerical calculation of Terfenol-D rod's effective dimensions in the GMM actuator*, [w:] *6th ECCOMAS Conference on Smart Structures and Materials SMART'2013*, E. Carrera, F. Miglioretti, M. Petrolo (red.), Politecnico di Torino, Torino 2013.
- [76] Bodniewicz D., Lewandowski D., Kaleta J., *Employment of the GMM actuator for stimulation of bone's adhesion. testing and identification.*, [w:] *6th ECCOMAS Conference on Smart Structures and Materials SMART'2013*, E. Carrera, F. Miglioretti, M. Petrolo (red.), Politecnico di Torino, Torino 2013.

Rozdział 5. Efekt magnetokaloryczny

W rozdziale opisano wstępne badania wybranego materiału magnetokalorycznego, czyli takiego, którego temperatura ulega zmianie pod wpływem cyklicznie zmieniającego się pola magnetycznego. Tematyka jest zagadnieniem poznawczym i aplikacyjnym. Przewiduje się bowiem, że chłodzenie magnetyczne podniesie sprawność lodówek i obniży zużycie energii koniecznej do ich zasilania. Ponadto materiały magnetokaloryczne, ze względu na przyjazny środowisku charakter, mogą stać się alternatywą dla stosowanych obecnie w chłodnictwie gazów z grupy chlorofluorowęglowodorów, które przyczyniają się do powstawania dziury ozonowej. Jednak do chwili obecnej nie powstały materiały magnetokaloryczne, których koszty wytworzenia i właściwości byłyby wystarczające, aby chłodziarki magnetyczne mogły zastąpić tradycyjne lodówki, pracujące dzięki sprężaniu i rozprężaniu gazów.

Zasadność badań wynika z kilku powodów. Dobór odpowiedniego składu chemicznego i parametrów wytwarzania ma kluczowy wpływ na właściwości magnetokaloryczne materiałów. Istotna jest również odpowiednia postać materiału magnetokalorycznego i jego wymiary ze względu na przewodność cieplną, a co za tym idzie, częstotliwość pracy urządzenia. Ponadto konstrukcja prototypowego stanowiska laboratoryjnego powinna umożliwiać porównanie materiałów magnetokalorycznych przez pomiar zmian ich temperatury dla różnych parametrów pracy.

Obiektem badań pilotowych był gadolin – materiał atrakcyjny dzięki temperaturze Curie, bliskiej temperaturze pokojowej oraz dużej różnicy temperatur i dużej zmianie entropii magnetycznej. Jest to jednocześnie materiał referencyjny, który służy do porównań w badaniach efektu z użyciem bardziej zaawansowanych stopów wykazujących ten efekt. Źródłem pola magnetycznego były magnesy stałe (w postaci tzw. macierzy Halbacha), które nie potrzebują ani zewnętrznego zasilania, ani układu chłodzącego, lecz ich wadą są ograniczenia w wartościach generowanych pól magnetycznych (maks. 2 T).

Celem głównym badań było skonstruowanie demonstratora układu chłodzącego, który umożliwiłby badanie kolejnych materiałów. Przyjęto następujące

założenie dotyczące budowy i działania demonstratora: cykl pracy – AMR (ang.: *Active Magnetic Regenerator*), a sposób wprowadzania materiału magnetokalorycznego w pole magnetyczne zrealizowano mechanicznie przez cykliczny ruch posuwisto-zwrotny. Omówiono trzy typy demonstratorów oraz przytoczono wyniki badań z użyciem jednego z nich. Rozdział zakończono propozycjami w zakresie dalszych badań.

5.1. Wprowadzenie

Chłodzenie magnetyczne jest nowoczesnym sposobem obniżania temperatury, opartym na efekcie magnetokalorycznym. Pierwsze wzmianki w literaturze, dotyczące efektu magnetokalorycznego, pochodzą z roku 1881. Wtedy to E. Warburg zauważył, iż umieszczona w polu magnetycznym próbka żelaza zmienia swoją temperaturę [1]. Po znalezieniu się w obszarze działania pola magnetycznego temperatura próbki zwiększa się, natomiast gdy materiał opuszcza pole magnetyczne, jego temperatura maleje. Zmiany temperatury są bardzo szybkie, zachodzą w ułamku sekundy. Efekt magnetokaloryczny początkowo wykorzystywany był w kriogenice do skraplania wodoru i helu. Dzięki jego zastosowaniu udało się po raz pierwszy uzyskać temperaturę poniżej 1 K. Przyczyniło się to do osiągnięcia przez W. Giauque w 1949 r. nagrody Nobla w dziedzinie chemii. Możliwość zastosowania efektu magnetokalorycznego w chłodziarkach pracujących w temperaturze pokojowej pojawiła się dopiero w roku 1976, kiedy to G.V. Brown zbudował pierwsze tego typu urządzenie. Wzbudziło ono duże zainteresowanie ze względu na fakt, iż nie wykorzystywało gazów z grupy chlorofluorowęglowodorów, dzięki czemu było przyjazne środowisku, gdyż nie przyczyniało się do zubożania warstwy ozonowej. Wykorzystanym przez G.V. Browna materiałem magnetokalorycznym był gadolin. Metal ten zastosowano w postaci cienkich płytek. Do wygenerowania pola magnetycznego użyto magnesu nadprzewodzącego chłodzonego ciekłym helem. Magnes ten wytwarzał pole o wartości 7 T. Pierwsza chłodziarka magnetyczna uzyskała 47 K różnicy temperatur [2].

Jak wiadomo, efekt magnetokaloryczny jest zjawiskiem termodynamicznym polegającym na zmianach temperatury materiału pod wpływem cyklicznie zmieniającego się pola magnetycznego. Po wejściu materiału magnetokalorycznego w pole magnetyczne zostaje on namagnesowany. W trakcie tego procesu dipole magnetyczne układają się równoległe do kierunku pola, co powoduje, iż entropia magnetyczna ciała maleje. Procesowi namagnesowania towarzyszy wzrost temperatury próbki, który jest efektem wzrostu entropii sieci (w warunkach adiabatycznych entropia całkowita jest stała, dlatego zmiana entropii magnetycznej powoduje równą co do wartości, ale o przeciwnym znaku, zmianę entropii sieci).

Gdy pole magnetyczne zostaje usunięte, następuje rozmagnesowanie materiału, a dipole magnetyczne tracą swoje uporządkowanie. Podczas tej przemiany entropia magnetyczna ciała wzrasta, natomiast jego temperatura obniża się ze względu na zmniejszenie entropii sieci. Za miarę efektu magnetokalorycznego uważa się zmianę temperatury ΔT materiału oraz entropii magnetycznej ΔS_M . Efekt magnetokaloryczny zależy zarówno od temperatury otoczenia, jak i zmiany indukcji pola magnetycznego. Maksimum osiąga on w temperaturze przejścia fazowego ferromagnetyka w paramagnetyk, czyli w tak zwanej temperaturze Curie (T_c), która jest specyficzna dla każdego materiału.

Rozwojowi konstrukcji chłodziarek magnetycznych towarzyszy postęp w dziedzinie badań nad materiałami magnetokalorycznymi. Dobre chłodziwo powinno charakteryzować się dużą zmianą temperatury oraz entropii magnetycznej. Jak wspomniano wcześniej, gadolin był pierwszym materiałem zastosowanym w chłodziarce magnetycznej pracującej w temperaturze pokojowej i nadal jest najchętniej wykorzystywanym materiałem magnetokalorycznym, co potwierdza duża liczba prototypów układów chłodzących. Gadolin jest materiałem atrakcyjnym dla konstruktorów chłodziarek magnetycznych, dzięki temperaturze T_c bliskiej temperaturze pokojowej oraz względnie dużej zmianie temperatury i entropii magnetycznej. Na podstawie badań laboratoryjnych opracowano nowe materiały, wykazujące większy efekt magnetokaloryczny niż gadolin. W 1997 r. Pecharsky i Gschneider uzyskali materiał o tzw. gigantycznym efekcie magnetokalorycznym. Materiał ten to stop w postaci $Gd_5(Si_2Ge_2)$ [3]. Wartości ΔS_M dla tego materiału są około dwa razy większe niż dla czystego gadolinu, natomiast ΔT zwiększyło się o około 30% [3]. Jest to spowodowane tym, iż w stopie $Gd_5(Si_2Ge_2)$ zachodzi nie tylko przemiana magnetyczna, ale towarzyszy jej przebudowa sieci krystalicznej. Materiał ten wykazuje przejście fazowe pierwszego rodzaju, podczas gdy gadolin – drugiego rodzaju. W kolejnych latach odkryto wiele innych stopów o gigantycznym efekcie magnetokalorycznym. Są to również materiały o przejściu fazowym pierwszego rodzaju, m.in. $MnAs_{1-x}Sb_x$ [4], $MnFe(P_{1-x}As_x)$ [5] czy $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$ [6].

5.2. Budowa chłodziarek magnetycznych

Pomimo iż pierwsza chłodziarka magnetyczna powstała ponad 30 lat temu, podstawowe elementy tego typu urządzeń są nadal takie same. Układy chłodzące, działające według efektu magnetokalorycznego, składają się z kilku następujących elementów: łoża magnetycznego wypełnionego materiałem magnetokalorycznym, źródła pola magnetycznego, układu transportującego medium do wymiany ciepła gorącego i zimnego zbiornika oraz układu sterującego.

Na podstawie przeglądu prototypów chłodziarek, opartych na efekcie magnetokalorycznym [7], można zauważyć, iż materiał ten zwykle wykorzystywany jest w postaci proszku, granulek i płytek. Za medium transportujące ciepło zwykle stosuje się wodę z dodatkami antykorozyjnymi. Dzieje się tak ze względu na dużą pojemność cieplną wody, przyjazny środowisku charakter oraz szeroką dostępność. Zastosowanie dodatków antykorozyjnych jest konieczne, ponieważ gadolin reaguje z wodą. Znacznie rzadziej wybierane jest medium w postaci gazowej.

Chłodziarki magnetyczne wymagają stosowania silnych pól magnetycznych, ponieważ wpływa to na wartość efektu magnetokalorycznego. W celu wygenerowania pola magnetycznego wykorzystywane są trzy rodzaje magnesów: elektromagnesy, magnesy nadprzewodzące i stałe. Te ostatnie stosowane są obecnie najczęściej, jednak wszystkie typy magnesów mają swoje ograniczenia. Magnesy nadprzewodzące mogą wygenerować silne pola magnetyczne, ale wadą ich jest konieczność zapewnienia dodatkowego systemu chłodzącego, niezbędnego do pracy tych urządzeń. Koszt takiego układu jest duży, przez co rozwiązanie to jest nieekonomiczne w przypadku urządzeń domowych. Elektromagnesy, podobnie jak magnesy nadprzewodzące, potrafią wytworzyć silne pola magnetyczne, jednak generują one również znaczne straty. Magnesy te konsumują duże ilości energii oraz wydzielają dużo ciepła. Magnesy stałe nie potrzebują ani zewnętrznego zasilania, ani układu chłodzącego, a ich wadą są ograniczenia w wartościach natężenia generowanych pól magnetycznych (maks. 2 T).

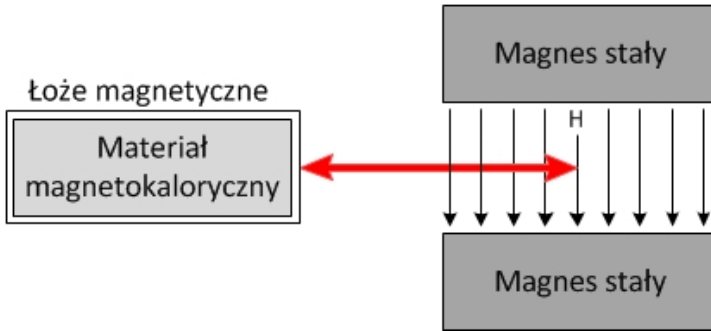
5.3. Badania własne

5.3.1. Cel i założenia

Za główny cel badań własnych przyjęto skonstruowanie laboratoryjnego stanowiska chłodzącego, działającego na podstawie efektu magnetokalorycznego. Demonstrator taki ma umożliwić sprawdzenie przydatności kolejno badanych materiałów magnetokalorycznych do budowy możliwie wydajnych układów chłodzących. Powinien on ponadto ułatwić pomiar efektu magnetokalorycznego w powtarzalnych warunkach. Należy w tym miejscu podkreślić, iż analiza literatury przedmiotu wskazuje na brak akceptowanych powszechnie standardów, a istniejące w wiodących laboratoriach stanowiska badawcze są prototypami.

Aby zrealizować wyznaczony cel, przyjęto następujące założenia dotyczące budowy i działania demonstratora:

- cykl pracy – AMR (ang.: *Active Magnetic Regenerator*; patrz rys. 5.2),
- materiał magnetokaloryczny – gadolin,
- źródło pola magnetycznego – magnesy stałe,



Rys. 5.1. Schemat działania demonstratora opracowany na podstawie przyjętych założeń [8–10]

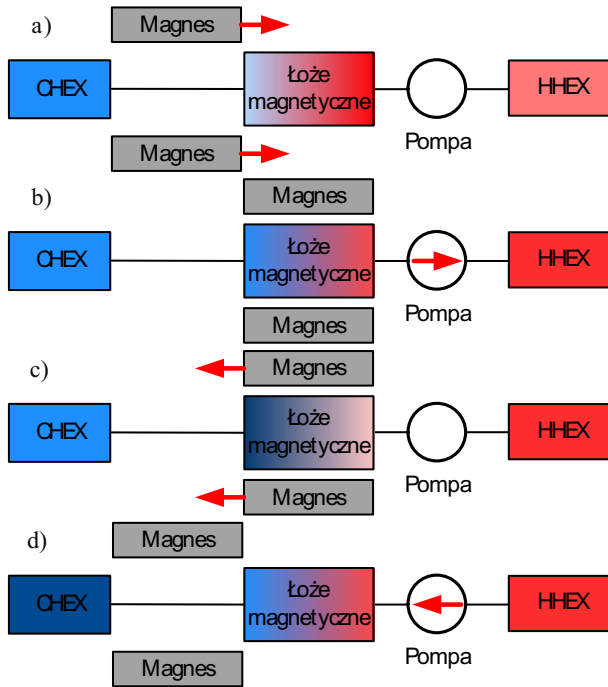
- sposób wprowadzania materiału magnetokalorycznego w pole magnetyczne – przesuw.

Schemat działania stanowiska laboratoryjnego, spełniający przyjęte założenia, został przedstawiony na rysunku 5.1. Łoże magnetyczne wypełnione jest materiałem magnetokalorycznym – gadolinem, porusza się ruchem posuwisto-zwrotnym względem źródła pola magnetycznego – układu magnesów stałych. Cykliczne wprowadzanie materiału magnetokalorycznego w obszar działania pola magnetycznego umożliwia naprzemiennie namagnesowywanie i rozmagnesowywanie materiału, dzięki czemu może on zmieniać swoją temperaturę, a dzięki temu pracować jako czynnik chłodniczy.

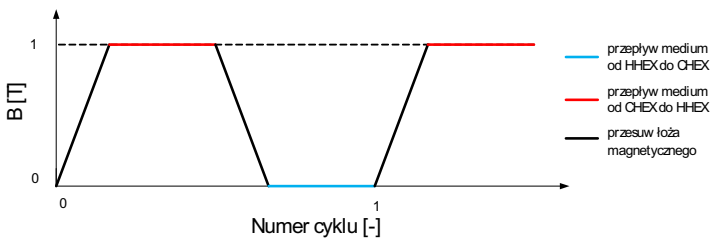
Cykl pracy AMR, który ma być realizowany przez demonstrator, pokazany został na rysunku 5.2. Cykl ten składa się z 4 etapów:

- adiabaticzne namagnesowanie materiału magnetokalorycznego, powodujące wzrost jego temperatury,
- proces w stałym polu magnetycznym, podczas którego materiał chłodzony jest przez medium wypływające z zimnego rezerwuaru (CHEX, ang.: *Cold Heat EXchanger*), odbierające ciepło od łoża i transportujące je do gorącego rezerwuaru (HHEX, ang.: *Hot Heat EXchanger*),
- adiabaticzne rozmagnesowanie materiału magnetokalorycznego, którego efektem jest obniżenie jego temperatury,
- proces, gdy brakuje pola magnetycznego, podczas którego medium wypływa z gorącego rezerwuaru, oddaje ciepło do łoża i odbiera je od zimnego rezerwuaru.

Zmiany w odcieniach kolorów łoża magnetycznego oraz rezerwuarów wskazują na zmiany ich temperatury po zrealizowaniu odpowiedniego etapu cyklu. Czerwone strzałki pokazują kierunek ruchu źródła pola magnetycznego oraz przepływu medium.



Rys. 5.2. Cykl pracy AMR [11]



Rys. 5.3. Wykresy pracy stanowiska laboratoryjnego [12, 13]

Na rysunku 5.3 przedstawiony został schemat cyklu pracy demonstratora obrazujący moment zmiany pola magnetycznego oraz przepływu cieczy. Z wykresu można odczytać, że ciecz ma być przetłaczana w chwili, gdy łożo magnetyczne jest w spoczynku. Gdy łożo znajduje się w polu magnetycznym, medium transportowane jest z zimnego do gorącego rezerwuaru. Podczas przemieszczania się odbiera ono ciepło od gadolinu i przekazuje je do gorącego zbiornika. W momencie gdy łożo opuszcza pole magnetyczne, ciecz przetłaczana jest z gorącego do zimnego rezerwuaru. W trakcie tego procesu medium dostarcza ciepło do materiału magnetokalorycznego, a następnie odbiera je od zimnego zbiornika.

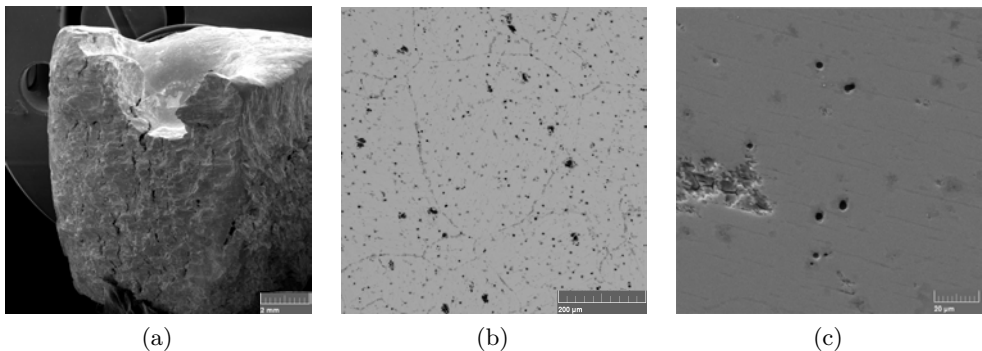
5.3.2. Badania materiałowe

Za materiał magnetokaloryczny wybrano, ze względu na charakterystyki przejścia w okolicy temperatury pokojowej, gadolin. Materiał zakupiony został w firmie Sigma Aldrich. Postać zakupionego gadolinu to wlewki o czystości 99,99%, deklarowanej przez producenta. Na rysunku 5.4 przedstawiono zdjęcia gadolinu wykonane na Skaningowym Mikroskopie Elektronowym (SEM). Można zauważyć, że w materiale występują liczne pory, które mogą mieć niekorzystny wpływ na przewodność cieplną materiału.

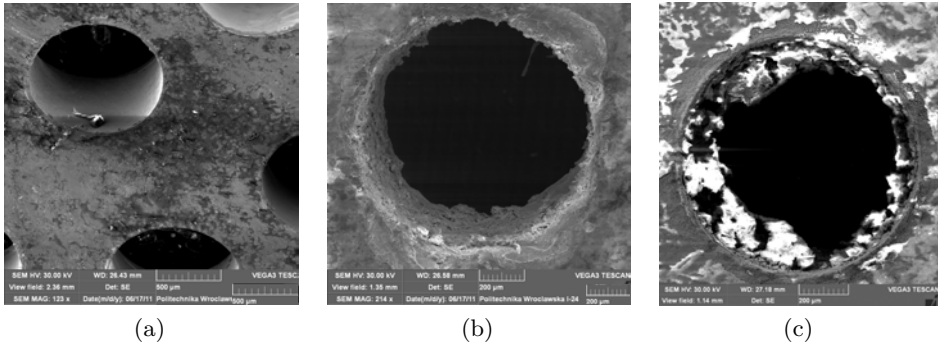
Gadolin w formie wlewek (zakupionych od producenta) wymagał przetworzenia, ze względu na zbyt dużą masę i wymiary poszczególnych cząstek, a także z powodu obecności licznych porów wewnątrz materiału. Średnia masa jednego wlewka wynosiła 5 g. Aby przyspieszyć wymianę ciepła, konieczne było zredukowanie wymiarów materiału. Wlewki z gadolinu zostały poddane następującej obróbce mechanicznej: zgniot na zimno, kucie na gorąco, wiercenie, cięcie i obróbka elektroerozyjna. Aby określić wpływ przetwarzania na jakość powierzchni materiału, wykonano badania mikroskopowe SEM (rys. 5.5) [14].

Opierając się na wynikach podanych badań, zdecydowano się na rozdrobnienie materiału metodą zgniatania na zimno i cięcia. Po obróbce uzyskano gadolin w postaci kawałeczków o wymiarach w zakresie 1–4 mm (rys. 5.6). Tak przygotowany materiał magnetokaloryczny wykorzystano do wypełnienia łoża magnetycznego.

Aby wyznaczyć efekt magnetokaloryczny w materiale przeprowadzono badania. Efekt magnetokaloryczny może być mierzony bezpośrednio lub pośrednio. Bezpośrednia metoda umożliwia wyznaczenie zmiany temperatury materiału ΔT . Wymaga ona pomiaru temperatury próbki przed umieszczeniem jej w polu magnetycznym, T_0 i po T_1 . Następnie ΔT obliczana jest jako różnica między T_1



Rys. 5.4. Zdjęcia SEM zakupionego gadolinu: a) wlewki, b) i c) zgląd metalograficzny [12]



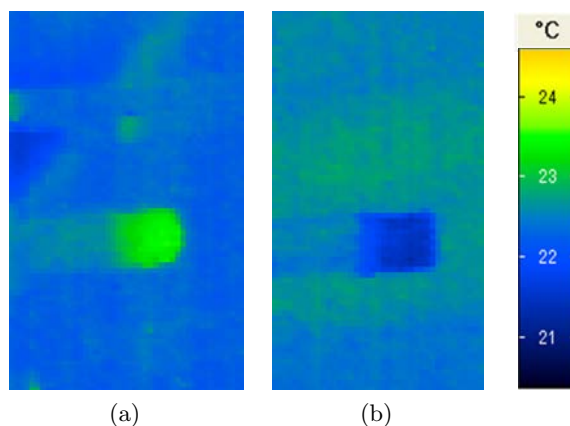
Rys. 5.5. Zdjęcia SEM gadolinu po obróbce przez: a) zgniot na zimno + wiercenie, b) kucie na gorąco + wiercenie, c) kucie na gorąco + obróbka elektroerozyjna



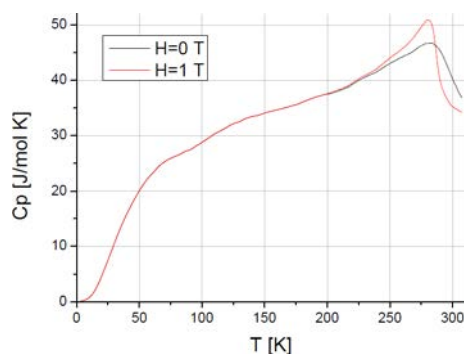
Rys. 5.6. Wypełnienie łoża magnetycznego – kawałeczki gadolinu [12, 13]

a T_0 . Do bezpośredniego pomiaru efektu magnetokalorycznego wykorzystuje się termometry dotykowe i bezdotkowe. Badania bezpośrednie zostały zrealizowane z użyciem kamery termowizyjnej. Na rysunku 5.7 przedstawiono zdjęcia, gdy gadolin jest w polu magnetycznym (a) i po opuszczeniu pola magnetycznego (b). Uzyskana zmiana temperatury wyniosła około 2 K w polu magnetycznym o indukcji 0,5 T i około 3 K, gdy indukcja wynosiła 1 T.

Przeprowadzone zostały również pomiary efektu magnetokalorycznego metodą pośrednią. Pośrednia metoda polega na przekształceniu danych otrzymanych z pomiarów pojemności cieplnej w funkcji temperatury. Pomiary przeprowadzane są dla dwóch różnych wartości pola magnetycznego. Ułatwiają one zarówno wyznaczenie zmian entropii magnetycznej ΔS_M , jak i zmian temperatury ΔT . Wyniki tych badań cechuje znacznie lepsza dokładność niż pomiarów z użyciem kamery



Rys. 5.7. Zdjęcia z kamery termowizyjnej: a) gadolin w polu magnetycznym o wartości 1 T, b) po opuszczeniu pola magnetycznego [15]

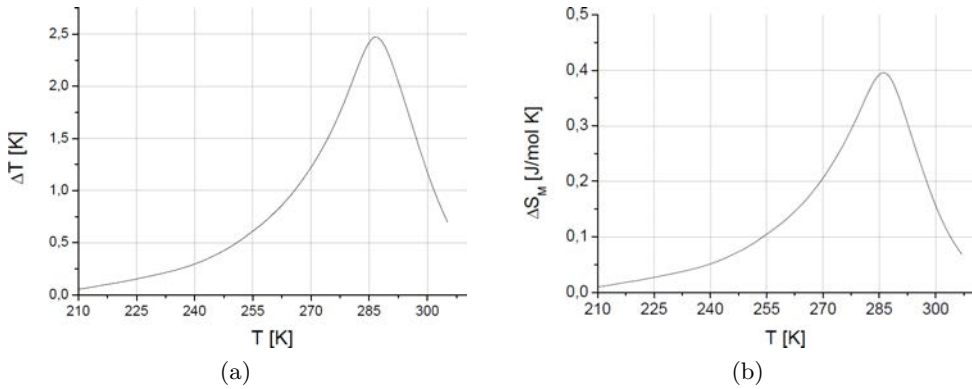


Rys. 5.8. Zależność pojemności cieplnej gadolinu od temperatury w polu magnetycznym 0 T i 1 T (badania zrealizowane w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur) [17]

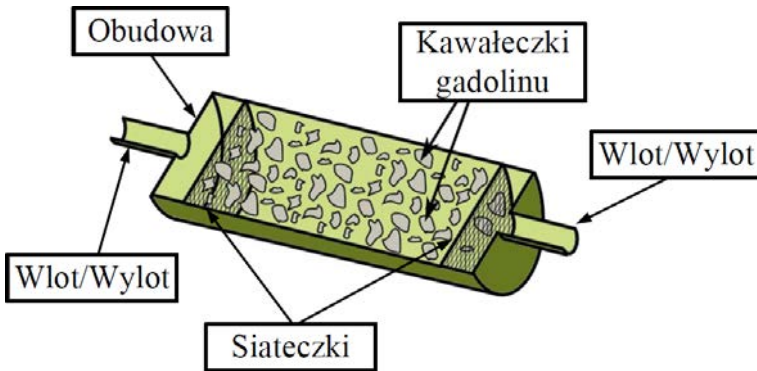
termowizyjnej. Badania wykonywano bez obecności pola magnetycznego oraz w polu magnetycznym o wartości 1 T. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunku 5.8. Z danych tych wyznaczono następnie zmiany temperatury materiału (rys. 5.9a) i entropii magnetycznej (rys. 5.9b z użyciem metody opisanej w [16]). Maksymalną różnicę temperatury o wartości 2,5 K oraz maksymalną zmianę entropii magnetycznej – 0,4 J/mol K uzyskano w temperaturze wynoszącej 287 K.

5.3.3. Budowa łoża magnetycznego

Łoże magnetyczne zostało wykonane z tworzywa sztucznego umożliwiającego uzyskanie przez gadolin przemian termodynamicznych bliskich adiabatycznym.



Rys. 5.9. Zmiana temperatury (a) i entropii magnetycznej (b) gadolinu w zależności od temperatury [12, 13]

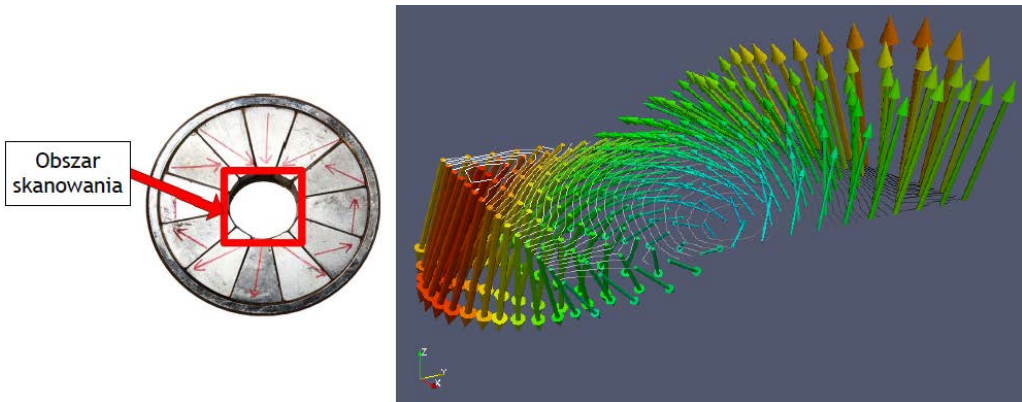


Rys. 5.10. Koncepcja łoża magnetycznego [12, 13]

Są one częścią cyklu pracy realizowanego na stanowisku badawczym. Łoże magnetyczne ma po jednym wlocie/wylocie z każdej strony, co umożliwia przepływ medium do wymiany ciepła. Materiał magnetokaloryczny jest umieszczony między siateczkami, które w momencie przepływu cieczy zabezpieczają go przed przemieszczeniem się poza obszar łoża magnetycznego. Schemat łoża magnetycznego został przedstawiony na rysunku 5.10.

5.3.4. Źródło pola magnetycznego

W celu wygenerowania pola magnetycznego zastosowano cylindryczną macierz Halbacha [18], dzięki której można, według producenta (Gaussboys Super Magnets), uzyskać w jej wewnętrznej przestrzeni indukcję magnetyczną o wartości około 1 T. Przestrzeń ta ma kształt cylindra o wymiarach 25,4 mm średnicy

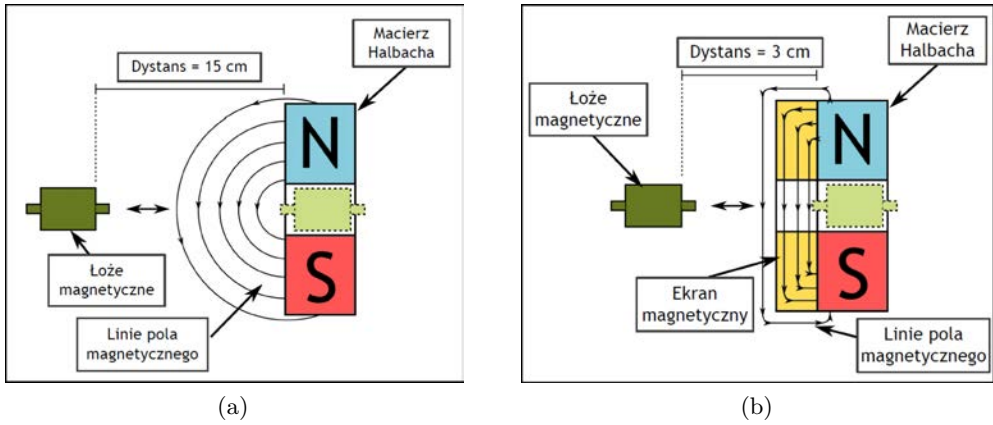


Rys. 5.11. Rozkład pola magnetycznego na powierzchni macierzy Halbacha [12, 13]

i 25 mm długości. Pole magnetyczne generowane przez macierz Halbacha zostało zobrazowane za pomocą systemu skanującego MagLab [19], opracowanego w laboratorium [8, 12]. Na rysunku 5.11 przedstawiono rozkład natężenia pola magnetycznego na powierzchni macierzy. Po lewej stronie na zdjęciu zastosowanej macierzy Halbacha czerwonym kwadratem zaznaczony został obszar skanowania.

Jak można zauważyć, pole magnetyczne jest niejednorodne. W środku otworu wektor pola magnetycznego zmienia swój zwrot. Niejednorodność pola magnetycznego powoduje, iż cząstki gadolinu, mimo gęstego upakowania w łożu magnetycznym, ulegają przemieszczeniu i gromadzą się w miejscu występowania najsilniejszego pola magnetycznego (przy krawędziach otworu). Może to stanowić problem podczas odbierania ciepła przez ciecź, gdy materiał znajduje się w polu magnetycznym, ponieważ medium, przepływając przez łożo magnetyczne, wybierze najłatwiejszą drogę przepływu, która prowadzić będzie przez obszar o najmniejszej gęstości cząsteczek gadolinu. Z tego powodu duża część materiału magnetokalorycznego nie będzie miała kontaktu z ciecżą, ciepło więc nie zostanie od niego odprowadzone.

Aby ograniczyć zasięg działania pola magnetycznego zastosowano, ekran wykonany ze stali hartowanej. Badania przeprowadzone za pomocą systemu skanującego MagLab potwierdziły, iż ekran skutecznie wyznacza granice działania pola magnetycznego. Ograniczenie obszaru występowania pola magnetycznego skraca odległość, na jaką musi przesunąć się łożo magnetyczne, aby materiał magnetokaloryczny mógł zostać rozmagnesowany. Bez zastosowania ekranu odległość ta wynosiła 15 cm, natomiast ekran zmniejsza dystans do 3 cm (rys. 5.12).



Rys. 5.12. a) schemat pracy stanowiska bez ekranu magnetycznego, b) z ekranem magnetycznym [8, 12]

5.3.5. Układ wymiany ciepła

Za medium do transportu ciepła, między łóżem magnetycznym a rezerwuarami, wykorzystano komercyjnie dostępną ciecz „DP Ultra” firmy Aqua Computer. Płyn ten wykorzystywany jest do chłodzenia komputerów. Testy korozyjności z wykorzystaniem metody zaprezentowanej w [9] pokazały, iż nie wchodzi on w reakcję z gadolinem. Pozostałe elementy układu wymiany ciepła to dwa rezerwuary – gorący i zimny, pełniące funkcję wymienników ciepła oraz układ tłoczący medium. Zimny rezerwuar jest izolowany od otoczenia, aby ciepło z zewnątrz nie dostawało się do niego, natomiast ciepły rezerwuar wymienia ciepło z otoczeniem lub jego temperatura utrzymywana jest na stałym poziomie za pomocą dodatkowego systemu chłodzącego.

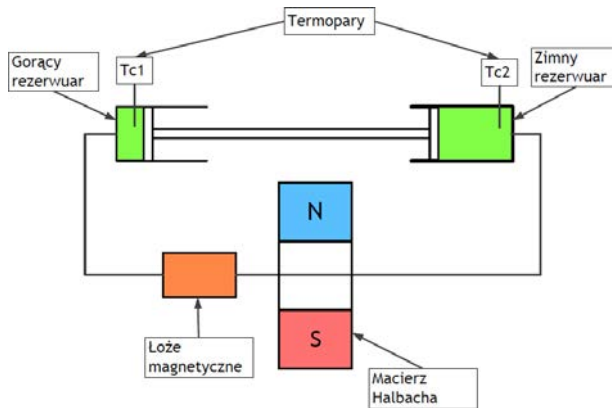
5.3.6. Dodatkowy system chłodzący

Dodatkowy system chłodzący umożliwia ustawienie i utrzymanie odpowiedniej temperatury w gorącym rezerwuarze. System ten wykorzystuje zestaw modułów Peltiera. Od gorącej strony układu zastosowano radiator z wiatrakami, który rozprasza ciepło przetransportowane do wymiennika.

Efektom zastosowania dodatkowego systemu chłodzącego jest spadek temperatury w zimnym rezerwuarze z zachowaniem stałej różnicy temperatury między zbiornikami. Celem magnetycznych układów chłodzących jest uzyskanie w otoczeniu o temperaturze pokojowej jak najniższej temperatury w zimnym rezerwuarze, dlatego dodatkowe chłodzenie gorącego rezerwuaru może okazać się przydatne. Wadą tego rozwiązania jest jednak dodatkowe zużycie prądu przez ogniwa Peltiera.

5.3.7. Konstrukcja demonstratora

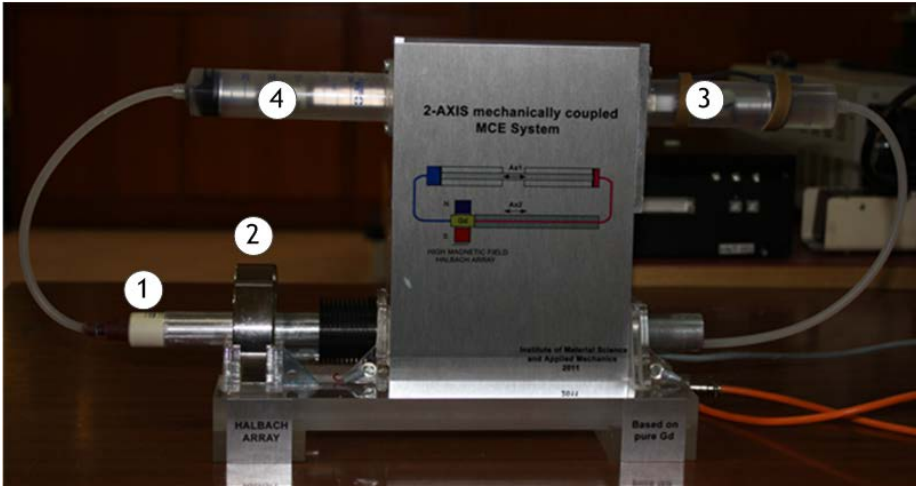
Stworzono trzy typy demonstratora układu chłodzącego działającego na podstawie efektu magnetokalorycznego. Schemat pierwszego rozwiązania został przedstawiony na rysunku 5.13. Stanowisko to składa się z kilku głównych elementów: łoża magnetycznego wypełnionego materiałem magnetokalorycznym – gadolinem, koncentratora pola magnetycznego – macierzy Halbacha, układu transportującego medium do wymiany ciepła (tłoki), zimnego i gorącego rezerwuaru oraz układu sterującego. Do wypełnienia łoża magnetycznego wykorzystano 30 g gadolinu w postaci drobin o wymiarach 2–4 mm.



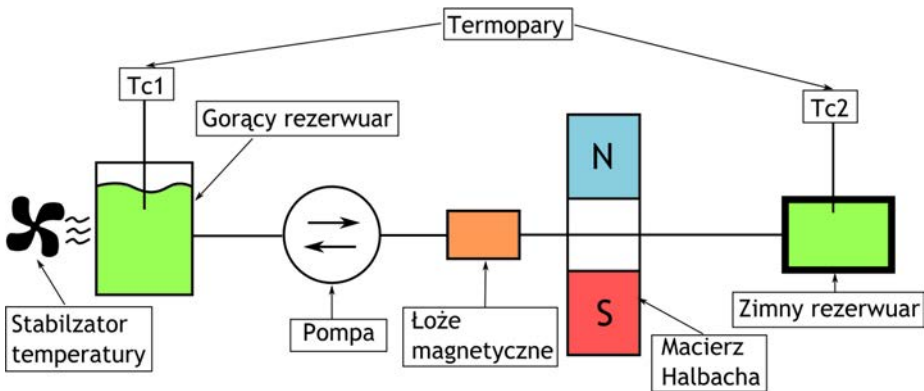
Rys. 5.13. Schemat demonstratora pierwszego typu [8, 12]

Na rysunku 5.14 przedstawiono rzeczywisty wygląd stanowiska. Łoże magnetyczne (1) porusza się po prowadnicach ruchem posuwisto-zwrotnym względem macierzy Halbacha (2), dzięki czemu materiał magnetokaloryczny jest cyklicznie namagnesowywany i roznamagnesowywany, przez co może zmieniać swoją temperaturę. Do poruszania łożem magnetycznym wykorzystywany jest silnik krokowy. Powyżej łoża i źródła pola magnetycznego znajdują się dwa cylindry spełniające funkcje rezerwuarów – gorący (3) i zimny (4). Ciepło wydzielone przez materiał magnetokaloryczny, znajdujący się w polu magnetycznym, jest odprowadzane do gorącego rezerwuaru, natomiast temperatura zimnego rezerwuaru obniżana jest na skutek poboru ciepła przez wypełnienie łoża magnetycznego. Do transportowania cieczy między rezerwuarami wykorzystywany jest drugi silnik krokowy, który odpowiada za przesuw tłoków.

Wyniki uzyskane z pierwszego demonstratora nie były satysfakcjonujące. Różnica temperatury między rezerwuarami była niewielka, wynosiła około 0,3 K. Spowodowane było to znacznymi stratami ciepła oraz problemami ze sterowaniem, dlatego konieczna była budowa kolejnego stanowiska laboratoryjnego.



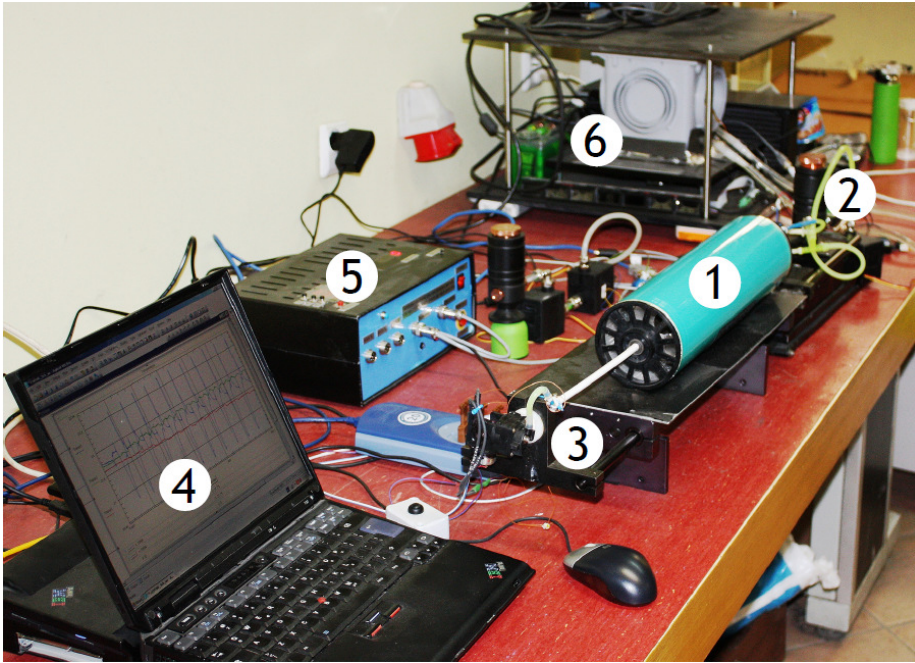
Rys. 5.14. Widok ogólny demonstratora pierwszego typu (opis w tekście) [8, 12]



Rys. 5.15. Schemat demonstratora drugiego typu [10]

Schemat demonstratora drugiego typu został przedstawiony na rysunku 5.15. Stanowisko to zbudowane jest z łoża magnetycznego wypełnionego gadolinem, macierzy Halbacha, układu transportującego medium do wymiany ciepła (dwukierunkowa pompa perystaltyczna), zimnego i gorącego rezerwuaru oraz układu sterującego. Do wypełnienia łoża magnetycznego, tak jak i w poprzednim przypadku, wykorzystano 30 g gadolinu w postaci drobin o wymiarach w zakresie 2–4 mm. Na schemacie zamieszczono również dodatkowy system chłodzący, którego celem jest utrzymywanie stałej temperatury w gorącym rezerwarze. Jest to układ wspomagający i nie należy do głównych elementów systemu magnetokalorycznego.

Na rysunku 5.16 przedstawiono zdjęcie stanowiska. Tuba (1) stanowi główny element systemu, w jej wnętrzu znajduje się w układ magnetyzujący oraz łoże ma-

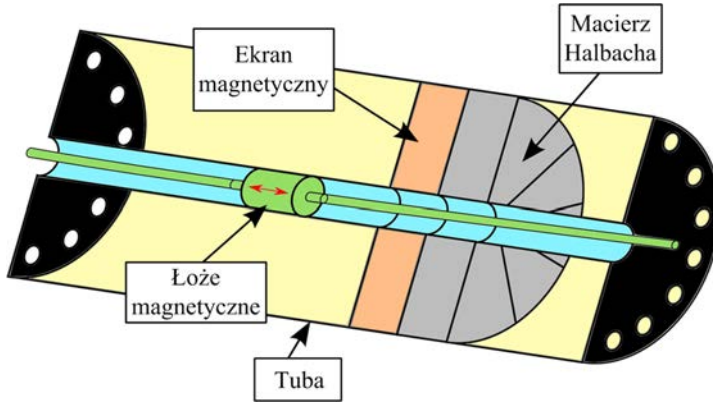


Rys. 5.16. Widok ogólny demonstratora drugiego typu (opis w tekście) [12]

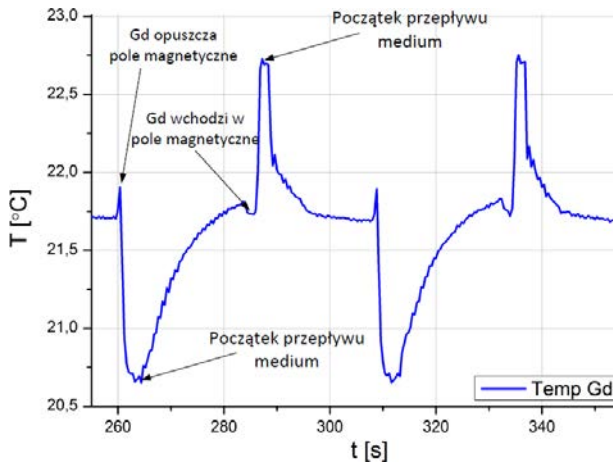
gnetyczne wraz z przewodnikami. Przekrój przez tubę pokazany został na rysunku 5.17; po obu stronach tuby znajdują się rezerwuary – gorący (2) i zimny (3). Do kontroli i rejestracji wyników wykorzystany został komputer PC (4) wyposażony w system akwizycji danych. Połączony jest on z mikrokontrolerem (5), który stanowi stopień wykonawczy. Program działania stanowiska, zawierający czas i prędkość przetłaczania cieczy oraz przesuwu łoża, jest przygotowywany na komputerze, a następnie wysyłany i realizowany za pomocą mikrokontrolera. Gorący wymiennik ciepła jest połączony równolegle z dodatkowym systemem chłodzącym (6), który ma umożliwić stabilizację jego temperatury.

Na rysunku 5.18 przedstawiono wykres zmian temperatury gadolinu. Pomiarzy zostały zarejestrowane podczas pracy stanowiska w temperaturze otoczenia wynoszącej około $21,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na wykresie można zauważyć, iż zmiany temperatury materiału wynoszą około 2 K . Po wejściu w pole magnetyczne temperatura materiału gwałtownie zwiększa się o 1 K , a po opuszczeniu pola magnetycznego temperatura materiału w ułamku sekundy zmniejsza się również o wartość 1 K . Przepływ medium do wymiany ciepła powoduje powrót temperatury materiału magnetokalorycznego do stanu początkowego.

Przykładowe wyniki pomiarów różnicy temperatury pomiędzy gorącym a zimnym zbiornikiem uzyskane z użyciem demonstratora drugiego typu zostały przed-

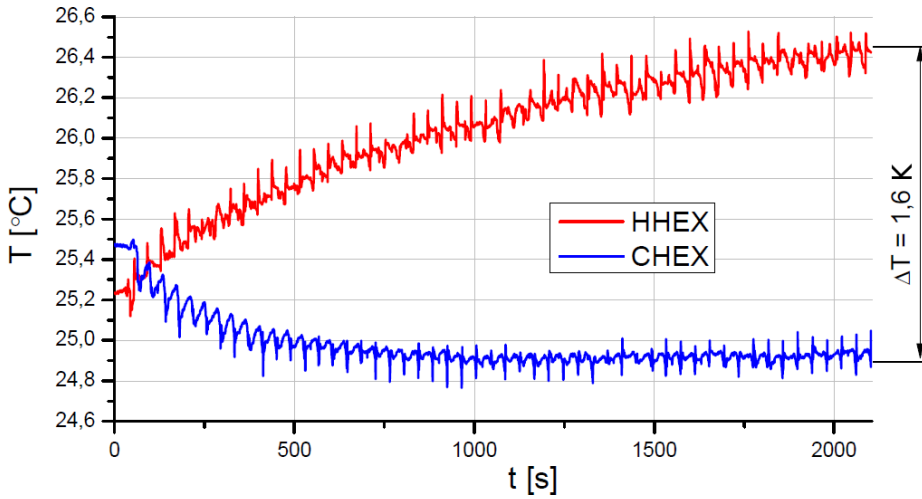


Rys. 5.17. Przekrój przez tubę [10]



Rys. 5.18. Zmiany temperatury gadolinu (demonstrator drugiego typu) [12]

stawione na rysunkach 5.19 i 5.20. Na rysunku 5.19 pokazano testy wykonane bez użycia dodatkowego systemu chłodzącego. Pomiary temperatury wykonywano w dwóch punktach: w gorącym i w zimnym rezerwarze. Badanie przeprowadzone było w temperaturze otoczenia wynoszącej około 25,3 °C. Początkowa temperatura cieczy w zbiornikach zbliżona była do temperatury otoczenia. Pomiary wykonywane były przez około 2000 s. Z wykresu można zauważyć, że po 1000 s temperatura w zimnym zbiorniku ustabilizowała się, natomiast temperatura gorącego rezerwaru nadal zwiększała się. Wzrost ten może być spowodowany pracą pompy, która umiejscowiona jest między łożem magnetycznym a gorącym wymiennikiem ciepła. Po czasie równym 2000 s między zbiornikami powstała maksymalna różnica temperatury 1,6 K [12].



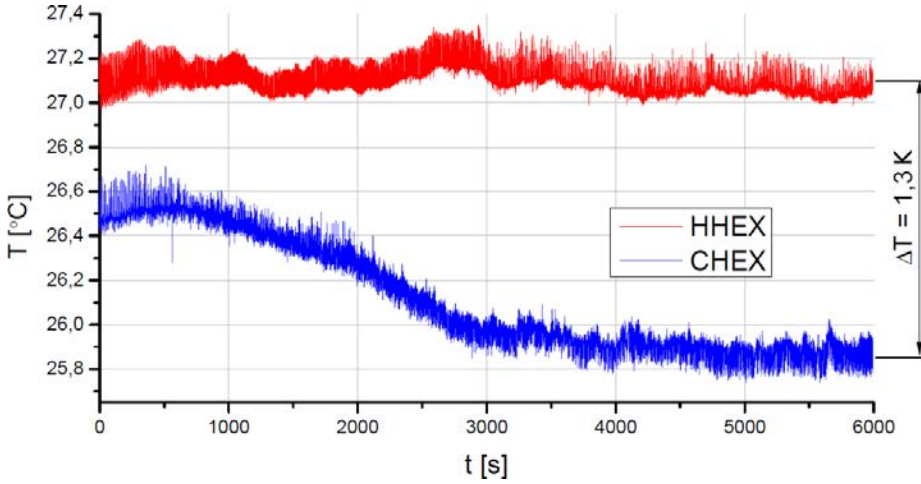
Rys. 5.19. Różnica temperatury między gorącym a zimnym rezerwuarem. Pomiar wykonany bez użycia dodatkowego systemu chłodzącego (demonstrator drugiego typu) [12]

Na rysunku 5.20 pokazany został pomiar z zastosowaniem dodatkowego systemu chłodzącego. Eksperyment przeprowadzono w temperaturze otoczenia wynoszącej około $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jak można zauważyć na wykresie, po około 3500 sekundach temperatura w zimnym zbiorniku ustabilizowała się. W stosunku do temperatury początkowej uzyskano spadek o $0,8\text{ K}$. W gorącym rezerwuarze temperatura utrzymywana była na stałym poziomie. Maksymalna różnica temperatury między zimnym a gorącym rezerwuarem wyniosła $1,3\text{ K}$ [10].

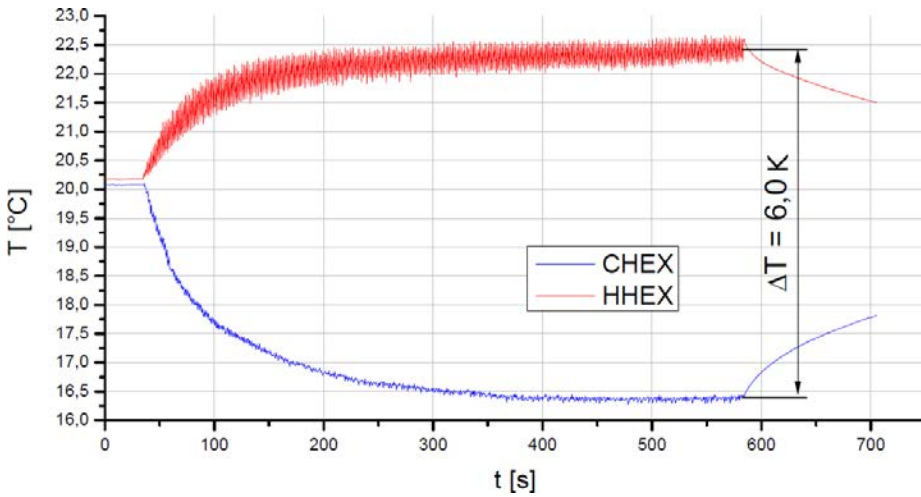
Demonstrator drugiego typu uzyskał maksymalną różnicę temperatury między zimnym a gorącym rezerwuarem o wartości $1,6\text{ K}$. Różnica ta jest niewielka i odpowiada wartości adiabatycznej przemiany materiału ΔT , konieczne było więc dalsze usprawnianie stanowiska.

Budowa demonstratora trzeciego typu jest zbliżona do poprzedniej konstrukcji. Główne różnice wynikają z usprawnienia systemu sterowania (przez co możliwe stało się uzyskiwanie większej częstotliwości pracy), modyfikacji łoża magnetycznego oraz poprawy izolacji termicznej. Ponadto do wypełnienia łoża magnetycznego zastosowano gadolin o mniejszych cząstkach, w zakresie $1\text{--}2\text{ mm}$ i o łącznej masie 15 g .

Wyniki pomiarów różnicy temperatury między zimnym a gorącym rezerwuarem uzyskane z użyciem demonstratora trzeciego typu przedstawione zostały na rysunku 5.21. Badanie przeprowadzone było w temperaturze otoczenia wynoszącej około $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pomiaru wykonywane były przez około 600 sekund. Z wykresu można



Rys. 5.20. Różnica temperatury między gorącym a zimnym rezerwuarem. Pomiar wykonany z użyciem dodatkowego systemu chłodzącego (demonstrator drugiego typu) [10]



Rys. 5.21. Różnice temperatury między gorącym a zimnym rezerwuarem (demonstrator trzeciego typu) [11]

zauważyć, że po 400 s temperatura w rezerwuarach ustabilizowała się. Między rezerwuarami powstała maksymalna różnica temperatury o wartości 6 K [11].

5.4. Zasadność i kierunki dalszych badań

Aktualność poznawcza i aplikacyjna tematyki uzasadnia dalsze badania, których celem powinno być określenie równoczesnego wpływu pola magnetycznego i mechanicznego na właściwości magnetokaloryczne materiałów ferromagnetycznych (mówiąc precyzyjniej chodzi o tzw. efekt magnetobarokaloryczny). Z analizy literatury przedmiotu wynika bowiem, że zasadna jest teza, iż zewnętrzne obciążenie mechaniczne (np. ciśnienie) wpływa na właściwości magnetokaloryczne materiałów ferromagnetycznych.

Za szczególnie wskazane należy uznać podjęcie następujących zagadnień:

- wytwarzanie stopów o tzw. gigantycznej magnetokaloryczności, których postać będzie umożliwiała wprowadzenie naprężeń ściskających i zastosowanie ich w chłodziarce magnetycznej,
- budowa prototypowych stanowisk badawczych do pomiaru efektu magnetokalorycznego i barokalorycznego w materiałach,
- pomiary właściwości magnetycznych i mechanicznych, a w szczególności badania nad wpływem pola magnetycznego i mechanicznego na zmiany temperatury wytworzonych materiałów,
- budowa demonstratorów laboratoryjnych prezentujących możliwości komercjalizacji efektu magnetokalorycznego i magnetobarokalorycznego.

Bibliografia

- [1] Warburg E., *Magnetische untersuchungen*, Annalen der Physik, 13, 1881, 141–164.
- [2] Brown G., *Magnetic heat pumping near room temperature*, Journal of Applied Physics, 47, 1976, 3673–3680.
- [3] Pecharsky V., Gschneidner Jr. K., *Giant magnetocaloric effect in $Gd_5(Si_2Ge_2)$* , Physical Review Letters, 78, 1997, 4494–4497.
- [4] Wada H., Tanabe Y., *Giant magnetocaloric effect of $MnAs_{1-x}Sb_x$* , Applied Physics Letters, 79, 2001, 3302–3304.
- [5] Tegus O., Brück E., Zhang L., Dagula, Buschow K.H.J., de Boera F.R., *Magnetic-phase transitions and magnetocaloric effects*, Physica B: Condensed Matter, 319, 2002, 174–192.
- [6] Fujita A., Fujieda S., Hasegawa Y., Fukamichi K., *Itinerant electron metamagnetic transition and large magnetocaloric effects in $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$ compounds and their hydrides*, Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics, 67, 2003, 1–12.
- [7] Yu B., Liu M., Egolf P.W., Kitanovski A., *A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010*, Int. J. Refrigeration, 33, 2010, 1029–1060.
- [8] Czernuszewicz A., Kaleta J., Lewandowski D., *Magnetic field investigations for a magnetocaloric laboratory test stand*, [w:] *29th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, DAS 29*, M. Ognjanović, M. Stanković, M. Ristić

- (red.), University of Belgrade. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia 2012, 102–103.
- [9] Bodniewicz D., Kaleta J., Wiewiórski P., *Investigation of the corrosion process in the magnetocaloric material – gadolinium*, [w:] *5th International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature (Thermag V)*, C. Vasile-Muller, P.W. Egolf (red.), International Institute of Refrigeration, Paris, Grenoble, France 2012, 249–255.
- [10] Czernuszewicz A., Kaleta J., Lewandowski D., *Stanowisko do badań efektu magnetokalorycznego ze stabilizacją temperatury gorącego rezerwuaru*, [w:] *XXV Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego imienia prof. Jacka Stupnickiego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Jachranka 2012, 32–33.
- [11] Czernuszewicz A., Kaleta J., Lewandowski D., *A gadolinium-based device for magnetic cooling*, [w:] *6th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials (SMART 2013)*, Torino, Italy, 2013.
- [12] Czernuszewicz A., Kaleta J., Królewicz M., Lewandowski D., Mech R., Wiewiórski P., *A test stand to study the possibility of using magnetocaloric materials for refrigerators.*, [w:] *5th International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature (Thermag V)*, C. Vasile-Muller, P.W. Egolf (red.), International Institute of Refrigeration, Paris, Grenoble, France 2012, 517–524.
- [13] Czernuszewicz A., Kaleta J., Królewicz M., Lewandowski D., Wiewiórski P., *A laboratory test stand for studies of magnetocaloric materials*, [w:] *Proceedings of 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, YSESM*, I. Tuns, I. Szava, V. Ungureanu (red.), Transilvania University Publishing House, Braşov 2012, 210–215.
- [14] Czernuszewicz A., Kaleta J., Lewandowski D., *Gadolinium as a solid magnetic refrigerant for a new type of cooling system*, [w:] *International Conference on RARE EARTH MATERIALS Advances in Synthesis, Studies and Applications*, Wrocław, Poland 2013, P–11.
- [15] Czernuszewicz A., Kaleta J., Królewicz M., Liberda M., *A concept of the test stand for magnetocaloric effect investigations*, [w:] *28th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Scientific Society for Mechanical Engineering, Siófok, Hungary 2011, 237–238.
- [16] Tishin A.M., Spichkin Y.I., *The magnetocaloric effect and its applications*, Taylor & Francis 2003.
- [17] Lewandowski D., *Estimating the efficiency of cooling system based on gadolinium using a simple model of heat capacity*, [w:] *5th International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature (Thermag V)*, C. Vasile-Muller, P.W. Egolf (red.), International Institute of Refrigeration, Paris, Grenoble, France 2012, 539–547.
- [18] Choi J., Yoo J., *Design of a halbach magnet array based on optimization techniques*, IEEE Transactions on Magnetics, 44, 10, 2008, 2361–2366.
- [19] Kaleta J., Wiewiórski P., *Magnetic field distribution detecting and computing methods for experimental mechanics*, Engineering Transactions, 58, 2010, 97–118.

Rozdział 6. Elastomery magnetoreologiczne

W rozdziale omówiono badania elastomerów magnetoreologicznych (zwanym także elastomerami magnetoaktywnymi). Stymulacja zewnętrznym polem magnetycznym powoduje w nich nieliniową i odwracalną zmianę kilku właściwości naraz (np. lepkość, sztywność). W odróżnieniu od cieczy MR, pracujących powyżej granicy plastyczności, typowy obszar pracy elastomerów magnetoreologicznych mieści się poniżej tej granicy. Materiały te „nie konkurują” zatem, ale nawzajem się uzupełniają.

Elastomery magnetoreologiczne są zbudowane z dwóch elementów: niemagnetycznej, polimerowej matrycy oraz rozmieszczonych w niej cząstek aktywnych magnetycznie. Dzięki usieciowanej strukturze osnowy, elementy wypełnienia magnetycznego nie mogą się w niej swobodnie przemieszczać. Nie występuje zatem zjawisko sedymentacji. Z powodu ograniczonych ruchów cząstek, odpowiedź materiału na przyłożenie pola magnetycznego (efekt magnetoreologiczny) może być szybsza niż w cieczach MR i zachodzić w czasie nawet poniżej 10 milisekund.

Dokonano doboru składników wypełniających oraz materiału matrycy, a także selekcji dodatków uplastyczniających. Wykonano kilka różnych rodzajów kompozytów o różnych składach i polaryzacji końcowej. W badaniach wykorzystano elastomer termoplastyczny, umożliwiając wielokrotną obróbkę termiczną. Wypełnienie materiału matrycy stanowiły cząstki miękkich ferromagnetyków (w tym żelazo karbonylkowe używane do cieczy MR). Zarówno kształt, jak i rozmiar elementów magnetycznie aktywnych istotnie wpływał na charakter całego kompozytu. Ważnym parametrem wpływającym na obserwowalny w elastomerze efekt magnetoreologiczny był objętościowy stosunek wypełnienia magnetycznego do materiału matrycy.

Zmiana struktury wewnętrznej, pod wpływem magnetyzacji zewnętrznym polem magnetycznym w zadanym kierunku, odbywała się w trakcie wytwarzania elastomeru. Cząstki materiału ferromagnetycznego, na skutek mieszania z uplastycznionym materiałem matrycy, tworzyły homogeniczną masę. Po obniżeniu temperatury, w dość krótkim czasie, cząstki zastygały w bezładnym

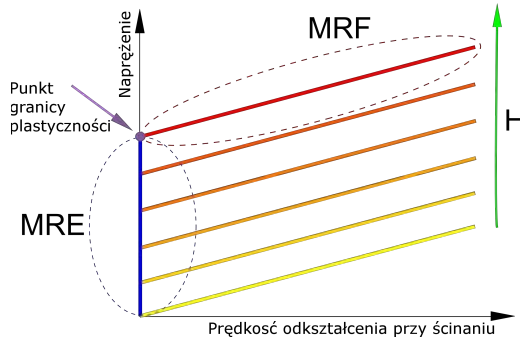
położeniu. Taką organizację wewnętrzną można było uznać za izotropową. Wykorzystując stymulację magnetyczną, uzyskano również elastomery ze strukturą uporządkowaną, czyli anizotropowe. Wykazano, iż oddziaływanie między spolaryzowanymi cząstkami magnetycznymi zależy od ich odległości; im bliżej się znajdują, tym siła przyciągania jest większa.

Opracowano metodykę badań i oszacowanie wpływu pola magnetycznego na właściwości mechaniczne elastomerów magnetoreologicznych. Główne badania cykliczne przeprowadzono w warunkach zbliżonych do czystego ścinania. Podjęto również zagadnienie modelowania efektu krzyżowego oraz aplikacji elastomerów. W części końcowej sformułowano sugestie w zakresie przyszłych badań.

6.1. Wprowadzenie. Kompozyty magnetoreologiczne z matrycami litymi

Kolejnym typem materiałów SMM (ang.: *Smart Magnetic Materials*) jest grupa kompozytów z matrycami elastomerowymi, czyli tzw. elastomery magnetoreologiczne (zwane także elastomerami magnetoaktywnymi). Podobnie jak ciecze magnetoreologiczne i kompozyty magnetoreologiczne oparte na matrycach porowatych, elastomery te zmieniają swoje właściwości mechaniczne pod wpływem pola magnetycznego. Stymulacja zewnętrznym polem magnetycznym powoduje nieliniową i odwracalną zmianę kilku właściwości naraz (np. lepkość, sztywność), co obrazuje stopień skomplikowania działania takiego materiału. Zjawisko to, podobnie jak w przypadku pozostałych materiałów SMM, jest określane mianem efektu magnetoreologicznego. Elastomery magnetoreologiczne są stosunkowo nową grupą materiałów Smart. Projektując elastomery magnetoreologiczne, dąży się do uzyskania maksymalnie dużych zmian właściwości pod wpływem pola magnetycznego. W odróżnieniu od cieczy MR, pracujących powyżej granicy plastyczności, typowy obszar pracy elastomerów magnetoreologicznych mieści się poniżej tej granicy. Można zatem powiedzieć, że jeśli chodzi o zastosowanie, materiały te nie konkurują, lecz uzupełniają się nawzajem (rys. 6.1).

W swojej podstawowej formie elastomery magnetoreologiczne są zbudowane z dwóch elementów: niemagnetycznej, polimerowej matrycy oraz rozmieszczonych w niej cząstek aktywnych magnetycznie. Dzięki usieciowanej strukturze osnowy, elementy wypełnienia magnetycznego nie mogą się w niej swobodnie przemieszczać. Nie występuje zatem zjawisko sedymentacji. Z powodu ograniczonych ruchów cząstek, odpowiedź materiału na przyłożenie pola magnetycznego (efekt magnetoreologiczny) może być, choćby nieznacznie, szybsza niż w cieczach MR, nawet poniżej 10 milisekund. Osnowę elastomeru magnetoreologicznego stanowić mogą

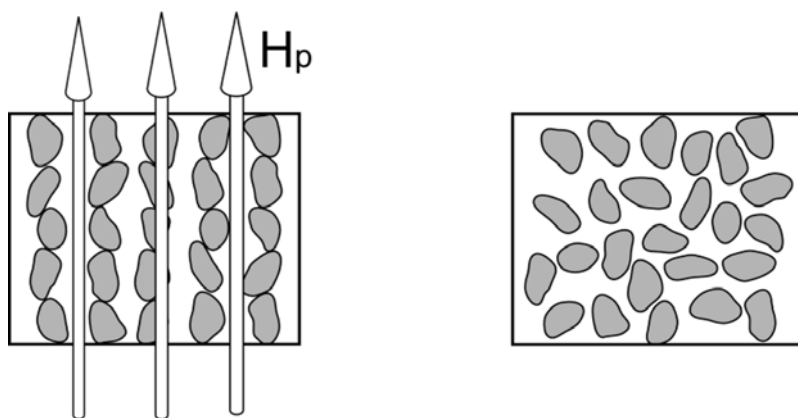


Rys. 6.1. Porównanie obszaru działania cieczy magnetoreologicznych MRF i elastomerowych kompozytów magnetoreologicznych MRE na modelu ciała Binghama w układzie naprężenie–prędkość odkształcenia

różne materiały. W dotychczas prowadzonych na świecie badaniach przeważają kauczuki, które nie oferują jednak możliwości recyklingu. Dlatego w dalszej części skoncentrowano się na elastomerach termoplastycznych, umożliwiającym wielokrotną obróbkę termiczną. Wypełnienie materiału matrycy tworzą cząsteczki miękkich ferromagnetyków (w tym żelazo karbonylkowe używane do cieczy MR). Zarówno kształt, jak i rozmiar elementów magnetycznie aktywnych istotnie wpływa na charakter całego kompozytu. Najczęściej stosuje się sferyczne cząstki żelaza o średnicy od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Ważnym parametrem wpływającym na obserwowalny w elastomerze efekt magnetoreologiczny jest objętościowy stosunek wypełnienia magnetycznego do materiału matrycy.

Ze względu na sposób rozmieszczenia cząstek magnetycznych w osnowie, wyróżnić można dwa typy MRE. Elastomery polaryzowane, zwane też anizotropowymi, które mają ściśle uporządkowaną strukturę wewnętrzną oraz elastomery izotropowe charakteryzujące się jednorodnym i chaotycznym rozłożeniem cząstek aktywnych magnetycznie. Zaobserwowano, że elastomery polaryzowane wykazują anizotropię właściwości zarówno mechanicznych, jak i magnetycznych, elektrycznych oraz termicznych. W materiałach tych cząstki magnetyczne tworzą formacje łańcuchowe (kolumnowe), przypominające te obecne w cieczy MR. Elastomery anizotropowe powstają, gdy w procesie utwardzania matrycy materiał jest poddawany działaniu zewnętrznego pola magnetycznego. Struktury łańcuchowe formują się wzdłuż kierunku działającego pola, w wyniku oddziaływań między dipolami poszczególnych cząstek. Cząstki te osiągną w ten sposób niski stan energetyczny. Zniszczenie tych struktur, np. przez ścinanie kompozytu, wymaga dodatkowej pracy, która jest zależna od natężenia pola magnetycznego (podobnie jak w cieczy MR). Jednak w odróżnieniu od cieczy magnetoreologicznych, anizotropowa budowa elastomeru pozostaje zachowana, gdy zanika zewnętrzne pole magnetyczne. Dzieje się tak,

ponieważ powstałe struktury cząstek są trwale osadzone w materiale matrycy. Istotnym problemem związanym z wytwarzaniem elastomerów polaryzowanych jest konieczność zastosowania pola magnetycznego podczas sieciowania polimeru osnowy. Cząstki magnetycznie aktywne w elastomerach izotropowych są rozłożone równomiernie w całej objętości kompozytu. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego powoduje, że cząstki te dążą do ułożenia się wzdłuż linii tego pola (rys. 6.2). Efektem takich ruchów jest odkształcenie matrycy i zmiana właściwości magnetomechanicznych. Elastomery izotropowe, nie wymagając pola magnetycznego podczas wytwarzania, wydają się materiałem bardziej przydatnym do produkcji masowej.



Rys. 6.2. Schemat struktury wewnętrznej polaryzowanych elastomerów magnetoreologicznych (kierunek pola oznaczony wektorem \mathbf{H}_p) o strukturze anizotropowej i izotropowej – bez polaryzacji

6.2. Przegląd literatury przedmiotu i cele badań własnych

Niezbyt liczna literatura przedmiotu z zakresu elastomerów magnetoreologicznych, w porównaniu do prac dotyczących innych materiałów magnetycznych Smart, skłania do dokładniejszej analizy najbardziej reprezentatywnych pozycji. Dlatego w dalszej części, inaczej jak w pozostałych rozdziałach, celowo szerzej omówiono wyniki badań dominujących w literaturze przykładów MRE.

Ważnym zagadnieniem rozpatrywanym często w literaturze przedmiotu jest wpływ parametrów premagnetyzacji MRE na jego właściwości. Typowym przykładem z tego zakresu jest zachowanie się materiału opartego na proszku żelaza karbonylowego średnicy $6\ \mu\text{m}$, niewulkanizowanej metylowinyłowej gumy silikonowej (MVQ) 110-2 i dwumetylo-dwubenzenoheksanu (DMDBH) jako środka

wulkanizującego [1]. W tym przypadku olej metyloowo-silikonowy został użyty jako plastyfikator. Efekt magnetoreologiczny był wyznaczany jak stosunek modułu zachowawczego próbki badanej z udziałem pola magnetycznego do modułu postaciowego próbki badanej bez jego udziału. Zaprezentowano wpływ trzech czynników na właściwości elastomeru magnetoreologicznego: wartości pola, temperatury i czasu premagnetyzacji na właściwości MRE. Wraz ze zwiększaniem się pola magnetycznego użytego do premagnetyzacji znacząco zwiększał się moduł zachowawczy G' uzyskany dla próbek bez pola magnetycznego, co uzasadniono teorią Madialia [2, 3]. Moduł zachowawczy dla MRE, nie poddanego premagnetyzacji, wyniósł 0,17 MPa, a efekt magnetoreologiczny wyniósł 3,5%, natomiast próbka wykazująca największy efekt magnetoreologiczny (64,7%) została premagnetyzowana polem o natężeniu 110 mT. Wówczas moduł zachowawczy, przy braku pola magnetycznego, wyniósł 0,34 MPa. Następnie dla premagnetyzowanego MRE, wykazującego największy efekt magnetoreologiczny, sprawdzono wpływ temperatury i czasu premagnetyzacji, wykazując, że w temperaturze 120 °C i czasie 10 minut uzyskuje się materiał o największym module.

Innym kierunkiem badań jest wytwarzanie i wyznaczanie właściwości anizotropowego elastomeru magnetoreologicznego zawierającego matrycę z poliuretanu wytworzonego metodą *in situ* [4]. W tym przypadku MRE składał się z polieteru glikolu (PTMEG), izocyjanianu fenylu (MDI), 1,4-butanodiolu (BDO), żelaza karbonylowego o rozmiarze 3–5 μm . Jako katalizatora użyto Dabco-33LV oraz BYK-A 506 jako środka zapobiegającego pienieniu. Efekt magnetoreologiczny obliczono zgodnie ze wzorem 6.1,

$$\frac{\Delta G}{G_0} \times 100 \quad (6.1)$$

gdzie ΔG to przyrost modułu G , a G_0 to wartość modułu w polu równym 0. Największy efekt magnetoreologiczny wyniósł 21%. Moduł sprężystości postaciowej G dla anizotropowego PU MRE o wagowej zawartości żelaza 70%, oscylacyjnie ścinanego z częstotliwością 1 Hz, zestawiono z wynikami izotropowego PU MRE o takim samym składzie. Porównano również wpływ zawartości „twardych” elementów na efekt magnetoreologiczny, wykazując w ten sposób możliwość sterowania właściwościami MRE przez kontrolę ich zawartość w materiale. Przeanalizowano także wyniki uzyskane dla różnych częstotliwości i zawartości wagowych żelaza karbonylowego. Analizując wpływ „twardych” elementów na właściwości anizotropowego MRE, uzyskano następujące wyniki. Dla materiału z zawartością 26% elementów moduł sprężystości postaciowej, w zerowym polu magnetycznym, wyniósł 6,1 MPa, a efekt MR był równy 21%. Natomiast dla materiału zawierającego 31% elementów moduł przyjął wartość 9,9 MPa, a efekt MR wyniósł 13%.

Porównanie właściwości materiału w zależności od częstotliwości ścinania wykazało niezmiennosc względnego efektu MR w materiale z jednoczesnym zwiększeniem modułu sprężystości postaciowej oraz częstotliwości. Sprawdzone również wpływ ilości wypełnienia magnetycznie aktywnego na moduł i efekt MR. Dla materiału z 50% wypełnieniem, w zerowym polu magnetycznym, moduł był równy 2,8 MPa, a efekt MR wyniósł 7%. Z kolei dla wypełnienia równego 60%, dla zerowego pola magnetycznego, moduł był równy 4,0 MPa, a efekt MR wyniósł 8%. Natomiast dla wypełnienia równego 70% uzyskano odpowiednio: moduł – 6,2 MPa i efekt MR 21%.

W pracy [5] zaprezentowano badania nad izotropowymi i anizotropowymi elastomerami magnetoreologicznymi zawierającymi termoplast SEBS i proszek żelaza karbonylowego IC. Materiał matrycy to Taiplo-SEBS-3151, żelazo karbonylkowe wielkości ziaren 3–5 μm i gładkiej powierzchni, a jako plastyfikatora użyto oleju mineralnego. Przedstawione wyniki porównują wartości modułu zachowawczego dla próbek izotropowych i anizotropowych polaryzowanych w polu magnetycznym różnej wartości dla próbek o wagowej zawartości żelaza 40 i 70%. Pokazują one znaczące zwiększenie tak modułu zachowawczego, jak i efektu magnetoreologicznego wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego, w którym próbki były polaryzowane, aż do 900 mT. Różnica między próbkami o podanych zawartościach żelaza jest znacząca, ponieważ dla próbek izotropowych można mówić o dwukrotnym zwiększeniu modułu zachowawczego przy wzroście zawartości żelaza. W przypadku próbek anizotropowych można mówić nawet o zwiększeniu 7–8-krotnym wraz ze zwiększeniem pola użytego do premagnetyzacji. W artykule przedstawiono również wpływ czasu i temperatury premagnetyzacji na moduł G' i wartość efektu magnetoreologicznego, wykazując że temperatura i czas polaryzacji są parametrami komplementarnymi i w nieznacznie niższej temperaturze i dłuższym czasie polaryzacji można uzyskać podobny efekt jak w przypadku wyższej temperatury i krótszego czasu polaryzacji.

Z kolei w pracy [6] zaprezentowano badania elastomeru magnetoreologicznego opartego na gumie cispolibutadinowej z dodatkiem elastomeru termoplastycznego polikaprolaktanu w połączeniu z żelazem karbonylkowym średnicy 6 μm . Ciekawym aspektem tego połączenia jest to, że materiał matrycy jest biodegradowalny. Przedstawiono wyniki pomiarów MRE w odniesieniu do wyników takich pomiarów dla samego materiału matrycy bez wkładu ferromagnetycznego. Dla czterech składów matrycy przeprowadzono testy pokazujące wpływ temperatury, pola magnetycznego, amplitudy naprężenia i częstotliwości na współczynnik stratności. W związku z tym, że temperatura topnienia polikaprolaktanu to 60 °C, na wszystkich wykresach prezentujących wyniki zależne od temperatury widać wyraźną zmianę właściwości materiału przy przekraczaniu tej temperatury. Współczynnik

stratności uzyskany dla MRE, zawierającego czysty cispolibutadian, wahał się między 0,175 w 25 °C do 0,15 w 60 °C, natomiast dla MRE opartego na matrycy mieszanej w proporcjach 4:1 cispolibutadinu do polikaprolaktanu wyniki były odpowiednio większe, odpowiednio: 0,225 i 0,25. Również moduł sprężystości postaciowej odznaczał się znaczącą różnicą między składami matrycy na korzyść matrycy mieszanej. Dla badania zależności modułu G od temperatury, dla częstotliwości 10 Hz, amplitudy odkształcenia 0,5% i braku pola magnetycznego oraz próbki o matrycy jednorodnej moduł wyniósł około 0,2 MPa, a dla próbki mieszanej 0,275 MPa, natomiast w momencie osiągnięcia temperatury 60 °C moduł dla próbki jednorodnej zmniejszył się do około 0,175 MPa, a dla próbki mieszanej do około 0,2 MPa. Z zastosowaniem tej samej procedury przebadano również próbki o różnym składzie matrycy i policzono względny efekt magnetoreologiczny. Największy, bo około 70%, efekt MR otrzymano dla próbki z matrycą w proporcjach 9:1 *cis*-polibutadienu do polikaprolaktanu w temperaturze 50 °C.

Wpływ częstotliwości dla różnych wartości amplitudy odkształcenia na właściwości elastomeru magnetoreologicznego zaprezentowano w [7]. Materiałem użytym do wykonania próbek była guma RTV uplastyczniana olejem silikonowym z dodatkiem cząstek żelaza ISP-3700. W przypadku elastomeru izotropowego stwierdzono znaczące zwiększenie modułu zespolonego po zwiększeniu pola 0–0,6 T w zakresie częstotliwości 0–20 Hz. Natomiast dla wyższych wartości częstotliwości następowało powolne liniowe zwiększenie modułu w przedziale 2,2–5 MPa, z jednoczesnym zmniejszeniem odkształcenia. Dla próbki anizotropowej stwierdzono, iż zwiększenie modułu zachowawczego jest znaczne. Wówczas bowiem wyniósł on około 0,2–0,3 MPa dla zerowego pola, a dla pola 0,6 T przyjął z kolei wartości z przedziału 0,3–1,1 MPa. Współczynnik stratności dla próbek niepolaryzowanych wyniósł nieco poniżej 0,2, natomiast dla próbek polaryzowanych nieznacznie powyżej 0,2.

Właściwości elastomeru magnetoreologicznego wykonanego z gumy silikonowej 704 wypełnionej żelazem karbonylowym z dodatkiem oleju metylosilikonowego jako plastyfikatora zaprezentowano w [8, 9]. Wyznaczono tam moduł sprężystości postaciowej oraz współczynnik stratności w zależności od natężenia pola magnetycznego, dla trzech poziomów odkształcenia równych odpowiednio 0,1; 0,2 i 0,3%. Względny efekt magnetoreologiczny wyniósł 700% dla pola magnetycznego równego 0,8 T. Moduł przy braku pola magnetycznego wyniósł poniżej 0,5 MPa, natomiast w silnym polu magnetycznym moduł osiągnął 3,0 MPa. Z kolei moduł stratności wahał się pomiędzy 0,25 a 0,45 w zależności od natężenia pola magnetycznego i odkształcenia. Przykładowo dla pola magnetycznego równego 0,8 T i odkształcenia 0,2% względny efekt magnetoreologiczny wyniósł 725,8%, a współczynnik stratności był równy 0,32.

Innym przykładem było badanie szczeliwa silikonowego [10] z matrycą z poli-dimetylosiloksanu i wypełnieniem magnetycznie aktywnym w postaci żelaza karbonylkowego, o wielkości ziaren 4,5–5,2 μm . Jako plastyfikatora użyto w tym przypadku oleju silikonowego. Proporcje wagowe składników, czyli odpowiednio żelaza, oleju silikonowego i matrycy wyniosły 7:2:1. Badania materiału przeprowadzono na reometrze. Wykazano, iż maleje moduł zachowawczy w polu magnetycznym, wraz ze wzrostem naprężenia. Natomiast moduł stratności nie zmniejsza się.

W pracy [11] zaprezentowano z kolei wyniki badań elastomeru magnetoreologicznego, pozostającego w stanie uplastycznionym w temperaturze pokojowej, czyli – jak to określono – plastomeru magnetoreologicznego. Materiał wytworzono na podstawie glikolu polipropylenowego wypełnionego żelazem karbonylkowym średnicy 6 μm . Przedstawiono wykresy zależności modułu sprężystości postaciowej i współczynnika stratności od pola magnetycznego. Wykazano, że wraz ze wzrostem pola magnetycznego współczynnik stratności maleje (ok. 1 do blisko 0). Wykazano również, że wraz ze zwiększaniem procentowego udziału wkładu magnetycznego w materiale zmniejsza się współczynnik stratności. Materiał wykazał ponadto wpływ polaryzacji na wartość modułu sprężystości postaciowej. Elastomer anizotropowy wykazał większą wartość modułu G . Przykładowo uzyskano wartość równą 7 MPa dla natężenia pola magnetycznego równego 300 mT. Z kolei, po zastosowaniu takiej samej wartości natężenia pola magnetycznego, w przypadku materiału izotropowego osiągnięto moduł równy 6,5 MPa.

Metodykę poprawy właściwości magnetoreologicznych przez uplastycznianie elastomeru opartego na poliuretanie opisano w [12]. Badania efektu magnetoreologicznego prowadzono w temperaturze pokojowej dla amplitudy odkształcenia równej 0,3% i częstotliwości równych odpowiednio: 1, 5 i 10 Hz. Wykazano maksymalny względny efekt magnetoreologiczny równy 386,7%. Dla materiału bez udziału plastyfikatora maksymalna wartość modułu zachowawczego wyniosła 5,2 MPa dla 1 Hz i 6,1 MPa dla 10 Hz oraz odpowiednio 2,35 MPa i 3,05 MPa dla materiału z 30% zawartością plastyfikatora. Wykazano ponadto zmniejszenie wartości modułu zachowawczego wraz ze wzrostem wartości odkształcenia.

Wpływ tarcia międzyfazowego oraz wielkości ziaren i ilości żelaza karbonylkowego na właściwości MRE opisano w [13]. Z kolei badania usieciowanego hydrożelu, ze sterowalnym modułem zachowawczym, omówiono w pracy [14]. Próbki w tym przypadku były badane w warunkach cyklicznego ścinania z częstotliwością z zakresu 1–10 Hz o amplitudzie odkształcenia równej 0,3%. Największy efekt magnetoreologiczny wykazał materiał anizotropowy

Elastomery magnetoreologiczne mają znacznie krótszą historię niż ciecze magnetoreologiczne, przez co także ustępują im w ilości aplikacji przemysłowych.

Patenty z tego obszaru zaczęto zgłaszać w latach 90. XX wieku, jednak ich liczba zaczęła wzrastać dopiero po roku 2000. Opatentowano zarówno sam materiał [15], jak i zastosowania, w których wykorzystuje się unikatowe właściwości tych kompozytów. Można zauważyć, iż do tej pory patentowano głównie rozwiązania z anizotropowymi elastomerami magnetoreologicznymi.

O tym, że kompozyty magnetoreologiczne mają duży potencjał, by szeroko zaistnieć na rynku, może świadczyć fakt, iż w 1999 roku założono w Newadzie w USA firmę Advanced Materials and Devices (AMAD), specjalizującą się właśnie w elastomerach magnetoreologicznych. W materiałach reklamowych firmy znaleźć można na przykład informacje o badaniach prowadzonych dla US Navy, a mających na celu opracowanie wkładek tłumiących o zmiennej sztywności do systemu wystrzeliwania pocisków w okrętach podwodnych. Wkładki te znajdują się pomiędzy zewnętrzną warstwą pocisku, a wewnętrzną powierzchnią lufy. W dotychczasowych systemach stosowano pasywne, elastomerowe wkładki, przez co ich sztywność była odpowiednia dla jednego tylko typu pocisku. Celem projektu jest opracowanie warstwy o sterowalnych parametrach, aby można było używać różnych pocisków bez konieczności wymiany warstwy tłumiącej. Wśród firm, z którymi AMAD współpracuje, wymienione są między innymi laboratoria badawcze Forda. Właśnie z branży motoryzacyjnej zgłaszana jest duża liczba patentów wykorzystujących kompozyty magnetoreologiczne.

Jeden z pierwszych patentów wykorzystujących elastomery magnetoreologiczne, opracowany właśnie w Ford Motor Company [16], dotyczył regulacji sztywności elementu zawieszenia pojazdu przez zastosowanie tulei o regulowanej sztywności. W rozwiązaniu tym elastomer magnetoreologiczny umieszczony został pomiędzy dwoma tulejami, z których wewnętrzna połączona jest z ruchomym elementem zawieszenia, natomiast zewnętrzna z nadwoziem. Dodatkowym elementem układu jest cewka (umieszczona pomiędzy kompozytem a wewnętrznym cylindrem), w której indukowane jest pole magnetyczne regulujące sztywność kompozytu magnetoreologicznego. Rozwiązanie to może zmniejszyć nadsterowność i podsterowność samochodu, a także ograniczyć hałas wywołowany drganiami nadwozia.

Podobne rozwiązanie wykorzystano do eliminacji drgań tarcz hamulcowych [17]. Wykorzystano w nim opisany już element składający się z dwóch cylindrów rozdzielonych warstwą elastomeru magnetoreologicznego. Sztywność kompozytu zmienia się przez regulowanie natężenia prądu płynącego w cewce nawiniętej na warstwie elastomeru. Wartość natężenia prądu zadawana jest przez system sterujący na podstawie danych przesyłanych z czujnika w układzie hamulcowym.

Opierając się między innymi na opisanych wcześniej patentach, opracowano metodę szybkiej regulacji parametrów fizycznych elastomerowych elementów w samochodach [18]. W tradycyjnych rozwiązaniach elementy elastomerowe, czyli

między innymi tuleje w zawieszeniu, elementy mocowania silnika, układu przeniesienia napędu czy układu wydechowego mają niezmiennie właściwości fizyczne. Zastępując je elastomerami magnetoreologicznymi i dodając układ sterujący, można regulować ich sztywność, a przez to między innymi poziom hałasu, drgań, eliminować tzw. nurkowanie pojazdu podczas hamowania, nadsterowność, podsterowność. W opisie patentu zaznaczono, że zmiana sztywności któregośkolwiek z elementów elastomerowych zmienia funkcje obciążenia innych elementów, a co za tym idzie wpływa na parametry całego układu. Dlatego w patentowanej metodzie uwzględniono w procesie sterowania wszystkie elementy.

W laboratoriach Forda (Ford Global Technologies) opracowano również urządzenie do pomiaru w czasie jazdy przemieszczenia i siły w zawieszeniu samochodowym [19]. W urządzeniu tym elastomer magnetoreologiczny umieszczony jest, podobnie jak w opisanych wcześniej patentach [16], pomiędzy dwoma cylindrami, z których wewnętrzny łączy się z ruchomym elementem zawieszenia pojazdu, natomiast zewnętrzny cylinder z nadwoziem. Między kompozytem a wewnętrznym cylindrem wprowadzona jest dodatkowo elektroda. Pod wpływem odkształcenia kompozytu zmieniają się parametry elektryczne układu. Na podstawie tych zmian można określić wartości przemieszczenia i siły.

W firmie ThyssenKrupp AG opracowano z kolei kolumnę kierownicy z adaptacyjnym systemem pochłaniającym energię w czasie wypadku [9]. Do tej pory firma produkowała kolumnę kierowniczą ThyssenKrupp Presta, w której energię uderzenia pochłaniał specjalnie wyprofilowany element z blachy. Rozwiązanie to stosuje się w dalszym ciągu, gdyż ogranicza ryzyko urazu kierowcy, jednak, tak samo jak podobne konstrukcje innych producentów, nie uwzględnia wielu zmiennych czynników, takich jak na przykład prędkość pojazdu czy masa kierowcy. Dlatego rozpoczęto prace nad systemem adaptacyjnym z cieczami magnetoreologicznymi. Pomimo obiecujących wyników wstępnych badań, zrezygnowano z cieczy ze względu na takie problemy jak sedymentacja, chemiczna niestabilność, a także trudna dostępność na rynku z powodu monopolistycznej pozycji producenta. Nie zrezygnowano jednak całkowicie z materiałów magnetoreologicznych. W kolejnej fazie projektu wykorzystano elastomery magnetoreologiczne, dla których otrzymano równie zadowalające wyniki badań, eliminując jednocześnie problemy, z jakimi łączyło się użycie cieczy magnetoreologicznych.

Z kolei w General Motors Corporation opracowano układ absorbujący energię uderzenia podczas wypadku [20]. Może być on zainstalowany na przykład w zagłówkach, w fotelach, w desce rozdzielczej, w drzwiach czy nad głowami kierowcy i pasażerów. Dzięki zastosowaniu elastomerów magnetoreologicznych możliwe jest dostosowanie sztywności amortyzatora do potrzeb użytkownika; na przykład tam, gdzie ma on zabezpieczać podczas wypadku głowę pasażera; jego sztywność można

zmniejszyć dla dziecka tak, aby zarówno dla niego, jak i dorosłego pasażera utrzymać jednakową wartość opóźnienia. Dodatkowo konstrukcja układu umożliwia szybkie przywrócenie jego pierwotnego kształtu w celu ponownego użycia, co jest niemożliwe w przypadku większości stosowanych dotychczas zabezpieczeń, takich jak na przykład poduszka powietrzna. Opatentowane rozwiązanie zbudowane jest ze sztywnej podstawy i elastycznej pokrywy. Wewnątrz znajdują się cylindryczne elementy z elastomeru magnetoreologicznego, wokół których nawinięta jest cewka. Dodatkowo cały układ wyposażony jest w czujniki oraz system sterujący. Mechanicznie lub przez działanie podciśnienia utrzymuje się minimalną objętość układu. W celu rozprężenia usuwa się mechaniczne ograniczenia lub działanie podciśnienia. Elastomer magnetoreologiczny wypycha wówczas elastyczną pokrywę. Zwiększa się także jego sztywność przez działanie pola magnetycznego indukowanego w cewkach. Po wypadku wyłącza się pole magnetyczne i kompresuje układ mechanicznie lub podciśnieniem do objętości spoczynkowej.

Prowadzono także prace teoretyczne mające na celu zastosowanie elastomerów magnetoreologicznych do budowy zderzaków samochodowych. Według autorów symulacji, jej wyniki mogą posłużyć do zaprojektowania przedniego zderzaka o optymalnym kształcie, wykorzystującego unikatowe właściwości kompozytów magnetoreologicznych. Gdyby wykorzystać efekt magnetostrykcji oraz użyć materiałów z pamięcią kształtu, można byłoby skonstruować zderzak, który po kolizji wracałby do pierwotnego kształtu [21].

Firmy samochodowe patentują nie tylko rozwiązania mające typowo motoryzacyjne zastosowania. W General Motors Corporation opracowano system zaczepów rozłączanych polem magnetycznym [7, 22]. Opatentowany system składa się z elementów w kształcie pętli i zaczepionych o nie haczyków z elastomeru magnetoreologicznego. Pod wpływem działania pola magnetycznego haczyki prostują się, układając wzdłuż kierunku wektora natężenia pola magnetycznego, przez co następuje rozłączenie obu elementów. Podczas gdy oba elementy są ze sobą połączone, cały układ pełni również funkcje tłumika drgań. Dodatkowy system sterujący reguluje sztywność elementów magnetoreologicznych tak, aby wyeliminować wibracje.

Zaczepy otwierane i zamykane przy użyciu pola magnetycznego wykorzystano do opracowania całego systemu rozłącznego mocowania różnych podzespołów samochodu [22]. Autorzy patentu wśród zastosowań tego rozwiązania wymieniają między innymi zamykanie pokrywy bagażnika czy drzwi. Dodatkowo system połączeń wykonany z materiałów aktywnych, może dostosowywać się do aktualnych warunków, zwiększając bezpieczeństwo. W rozwiązaniu tym rozszerzono paletę materiałów służących do wykonania elementów zmieniających kształt pod wpływem sygnału sterującego, wymieniając obok elastomerów magnetoreologicznych inne

materiały aktywne, między innymi materiały z pamięcią kształtu oraz materiały piezoelektryczne.

Innym przykładem zastosowania elastomerów magnetoreologicznych w przemyśle samochodowym jest system redukcji drgań samochodowego wału napędowego [23]. W tym rozwiązaniu tłumik, ograniczający przenoszenie drgań z wału napędowego na nadwozie, jest mocowany do przegubu. Zbudowany jest z dwóch pierścieni – zewnętrznego oraz wewnętrznego, pomiędzy którymi umieszczony jest pierścień wykonany z elastomeru magnetoreologicznego. Pole magnetyczne zmieniające jego sztywność uzyskuje się dzięki zastosowaniu śrub wykonanych z materiału paramagnetycznego. Zmianę natężenia pola magnetycznego, indukowanego w elastomerze magnetoreologicznym, wywołuje się przez dokręcenie lub odkręcenie śrub tak, aby dostroić tłumienie do częstotliwości drgań wału napędowego.

Właściwości mechaniczne elastomerów magnetoreologicznych predestynują je do tłumienia drgań. Kolejnym przykładem takiego zastosowania jest adaptacyjny tłumik drgań zgłoszony do opatentowania przez Georgia Tech Research Corporation z USA [24]. Proponowane urządzenie może być rozwiązaniem pośrednim między tłumikami dostrojonymi tylko do konkretnej częstotliwości wymuszenia a aktywnymi systemami tłumiącymi, które w zależności od wymuszenia mogą dostarczyć energię do układu. Pierwsze z wymienionych rozwiązań może być stosowane tylko w układach wymuszanych stałą częstotliwością, natomiast systemy aktywne są dość złożone, dlatego kosztowne, a ponadto dostarczanie dodatkowej energii do układu może spowodować jego niestabilność. Tłumik adaptacyjny z elastomerem magnetoreologicznym można dostrajać w czasie rzeczywistym do sygnału wymuszającego, dzięki czemu może znaleźć szersze możliwości zastosowania niż urządzenie o stałej charakterystyce, zachowując jednocześnie niską cenę. W proponowanym rozwiązaniu elementy wykonane z elastomeru magnetoreologicznego umieszczone są między dwoma płasko leżącymi masami. Masy te mogą być jednocześnie rdzeniami układu magnetycznego, na które nawinięto cewkę. Element tłumiony znajduje się na górnej masie. Wektor pola magnetycznego działa pionowo, wzdłuż kierunku ściskania kompozytu. Regulując natężenie pola magnetycznego indukowanego w elastomerach magnetoreologicznych, można sterować tłumieniem całego układu.

Omawiane dotychczas patenty dotyczyły tłumików magnetoreologicznych tłumiących drgania tylko w jednym, określonym kierunku. W 2006 roku opatentowane zostało rozwiązanie umożliwiające tłumienie drgań w kilku kierunkach jednocześnie [25]. W tym rozwiązaniu warstwa elastomeru magnetoreologicznego znajduje się między warstwami aktywującymi, w których umieszczone są magnesy stałe bądź elektromagnesy, bądź jednocześnie magnesy stałe i elektromagnesy. Tłumienie

w różnych kierunkach możliwe jest dzięki odpowiedniemu rozkładowi magnesów w warstwach aktywujących, a także przez uformowanie kształtu całego zestawu. W układzie możliwe jest jednocześnie tłumienie wymuszenia ścinającego oraz ściskającego. Autorzy patentu wskazują różne konfiguracje układu tłumiącego (warstwy elastomeru magnetoreologicznego oraz warstw aktywujących): konfiguracji belkowej, w postaci płyty oraz dowolnej powierzchni umożliwiającej tłumienie w wielu kierunkach jednocześnie. Można je także łączyć w układy wielowarstwowe.

W Swiss Laboratories for Materials Testing and Research w Szwajcarii opracowano system redukcji drgań okien [26]. Zasada działania układu polega na wygenerowaniu drgań przeciwdziałających fali akustycznej. Aktywne okno zbudowane jest z jednej lub kilku warstw biernych, stanowiących ochronę termiczną oraz biernie tłumiących drgania, a także z warstwy aktywnej. Warstwa bierna zamocowana jest we framudze z użyciem zwykłej uszczelki zabezpieczającej przed wilgocią oraz strumieniem powietrza. Warstwa aktywna zawiera elastomer magnetoreologiczny, aktywowany elektromagnesem. Dodatkowo cały układ wyposażony jest w system czujników połączonych z układem sterującym natężeniem pola magnetycznego.

W ministerstwie obrony w Indiach opracowano urządzenie do emisji fal akustycznych pod wodą, do celów wojskowych oraz zastosowań oceanograficznych [27]. Zbudowano je na podstawie elastomeru magnetoreologicznego, dzięki czemu można regulować natężenie fali akustycznej przez zmianę natężenia pola magnetycznego. Zakres częstotliwości emitowanych fal mieści się od 50–100 Hz.

Istnieją także konstrukcje wykorzystujące materiały z szerokiej grupy zwanej „Smart materials”, w tym również elastomery magnetoreologiczne. Jedną z takich konstrukcji jest pokrywa silnika lub bagażnika opracowana w General Motors Corporation oraz University of Michigan [28]. W proponowanym rozwiązaniu pokrywa, która podczas normalnej eksploatacji znajduje się blisko silnika lub bagażu, w momencie wypadku odkształca się tak, aby zwiększyć możliwość absorpcji energii. W patencie, na liście materiałów, które można wykorzystać w konstrukcji takiego mechanizmu, obok elastomerów magnetoreologicznych, wymieniono między innymi materiały z pamięcią kształtu, materiały piezoelektryczne oraz ciecz magneto- i elektoreologiczne.

Kolejny patent opracowany w tych ośrodkach dotyczy zamka pokrywy silnika lub bagażnika w samochodzie [4, 29]. Autorzy patentu przedstawili propozycje konstrukcji wykorzystujących materiały „Smart”, w tym również elastomery magnetoreologiczne. Proponowane rozwiązanie ułatwia zamykanie oraz otwieranie pokrywy, a także absorbuje więcej energii podczas wypadku niż tradycyjne, jednopunktowe zamki.

Oprócz opatentowanych i przetestowanych aplikacji wykorzystujących kompozyty magnetoreologiczne, w literaturze przedmiotu przedstawiane są również

teoretyczne rozwiązania dotyczące możliwych zastosowań tych materiałów. Przeprowadzono między innymi symulacje układu tłumiącego drgania budynków. Do obliczeń wykorzystano parametry z rzeczywistych trzęsień ziemi. Według uzyskanych wyników, drgania budynków z kompozytami magnetoreologicznymi mogłyby być zmniejszone od 10%, aż do ponad 40% (w zależności od piętra budynku i przebiegu wymuszenia generowanego przez trzęsienie ziemi) [14].

Przeanalizowano także możliwość zastosowania kompozytu magnetoreologicznego do aktywnego tłumienia fal akustycznych [12]. Rozważania przeprowadzono dla układu zbudowanego z cienkich warstw, między którymi umieszczono kompozyt. Stwierdzono, że regulując natężenie pola magnetycznego, działającego na elastomer magnetoreologiczny, można wpływać na poziom wytłumienia dźwięku.

Mając na uwadze podane rezultaty analizy literatury przedmiotu, przyjęto następujące cele badań:

- dobór składników ferromagnetycznych oraz materiału matrycy i dodatków uplastyczniających,
- wytworzenie kilku rodzajów kompozytów o różnych składach i polaryzacji końcowej,
- zastosowanie surowców zapewniających możliwość wielokrotnego przetwarzania elastomeru,
- zapewnienie polaryzacji cząstek ferromagnetycznych w fazie wytwarzania elastomeru,
- opracowanie metodyki badań i wytworzenie stanowisk pomiarowych, w tym głównie umożliwiających badania w warunkach cyklicznego ścinania,
- oszacowanie wpływu pola magnetycznego na właściwości mechaniczne elastomerów magnetoreologicznych.

6.3. Matryca elastomeru magnetoreologicznego.

Dobór składników

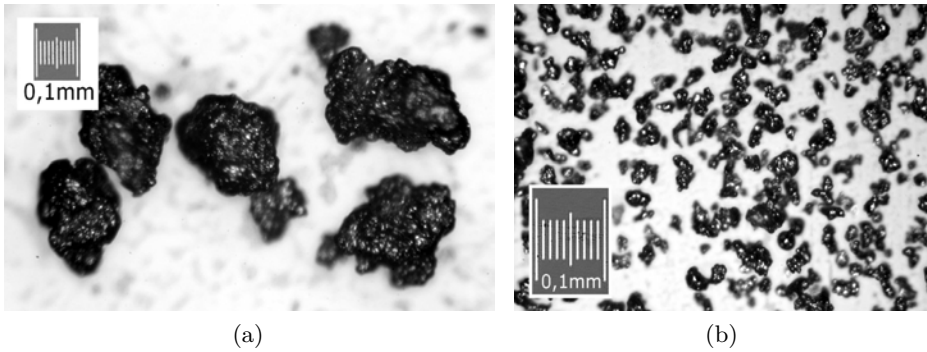
Właściwości kompozytu magnetoreologicznego w dużej mierze zależą od rodzaju matrycy, w której rozmieszczone są cząstki aktywne magnetycznie. W badaniach prowadzonych dotychczas na świecie testowano elastomery, w których za matryce stosowano między innymi następujące grupy materiałów: kauczuki silikonowe, naturalne, akrylonitrylowe, izobutylenowo-izoprenowe, akrylonitrylowo-butadienowe, żele silikonowe oraz różnorodne modyfikacje wymienionych składników. Zauważyć można, że niemal wszystkie stosowane uprzednio matryce charakteryzuje usieciowanie struktury, a więc brak możliwości ponownego przetwarzania. Wadę tę wyeliminować można przez zastosowanie materiału ułatwiającego wielokrotną obróbkę, na przykład elastomeru termoplastycznego. Postanowiono

zatem zastosować materiał, który cechuje się możliwością wielokrotnej obróbki oraz dobrą wytrzymałością mechaniczną z jednoczesną niską twardością. Ostatecznie wybrano polimer termoplastyczny Tefabloc TO.222 30A, produkowany przez francuską firmę CTS Cousin-Tessier. Jest to polimer typu TPE-S, który wykorzystuje cechy kopolimeru blokowego SBS (styren–butadien–styren) i uwodornionego kopolimeru blokowego SEBS (styren–etylen–butadien–styren). Materiał łączy mechaniczne właściwości kauczuku z zaletami termoplastów. Cechuje się między innymi dużą wytrzymałością mechaniczną, niską twardością oraz dużą odpornością na utlenienie, detergenty, kwasy oraz czynniki atmosferyczne. Elastomer ten zastosowano między innymi w produkcji uszczelek do samochodów oraz jako element urządzeń AGD i zabawek. Spośród dostępnych twardości z zakresu 30–80 A (w skali Shore'a) wybrano tę mniejszą, gdyż miękki kompozyt powinien gwarantować większy względny efekt magnetoreologiczny.

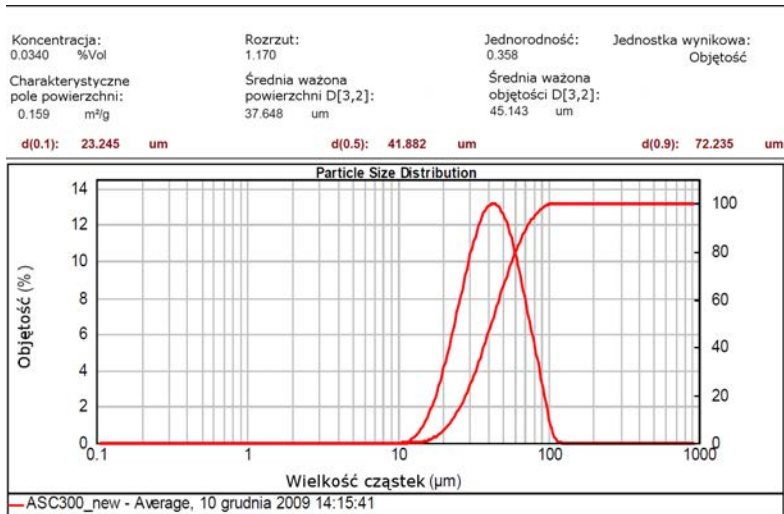
6.4. Cząstki aktywne magnetycznie, dobór

Cząstki aktywne magnetycznie to drugi kluczowy składnik decydujący o zachodzącym w kompozycie efekcie magnetoreologicznym. Do najbardziej pożądanых cech tego materiału należy duża przenikalność magnetyczna i indukcja nasycenia magnetycznego. Parametry te gwarantują maksymalne przyciąganie między poszczególnymi cząsteczkami. Założenia te świetnie spełnia miękki magnetyk – żelazo, dlatego jest materiałem najczęściej stosowanym w produkcji elastomerów magnetoreologicznych. Składnikami cieczy MR mogłyby również być stopy żelaza i niklu lub kobaltu, mające większe nasycenie magnetyczne. Nie znalazły one jednak tak szerokiego zastosowania w produkcji MRE, jak żelazo. Wybierając materiał wypełnienia, sugerowano się zarówno badaniami prowadzonymi wcześniej, jak i danymi literaturowymi. Rozważano między innymi proszki żelaza, np. ASC 300 oraz AT 40.29 szwedzkiej firmy Höganäs AB. Ponieważ żelazo AT 40.29 stanowiły cząstki o wielkości powyżej 150 μm (patrz rys. 6.3a), czyli kilkakrotnie większe od pozostałych proszków, elastomery wytworzone z jego użyciem wykazywały znacznie większą kruchość. Dlatego produkt ten odrzucono. Ostatecznie wybrano żelazo ASC 300. Materiał został udostępniony do badań dzięki uprzejmości produkującej je firmy Höganäs AB. Zdjęcie wykonane z użyciem mikroskopu świetlnego (rys. 6.3b) ujawniło ich porowatą powierzchnię i nieregularny kształt.

Aby opisać wielkości cząstek żelaza ASC300, wykonano pomiary, których wyniki w postaci krzywej rozkładu (rys. 6.4) pokazały, że w analizowanym proszku najwięcej objętościowo (ok. 13%) było cząstek wielkości 42 μm , a ilościowo (90%) było mniejszych niż 72 μm .



Rys. 6.3. Porównanie obszaru działania cieczy magnetoreologicznych MRF i elastomerowych kompozytów magnetoreologicznych MRE na modelu ciała Bingham'a w układzie naprężenie–prędkość odkształcenia [30]



Rys. 6.4. Rozkład wielkości cząstek żelaza ASC 300 wykonany z użyciem urządzenia Mastersizer 2000 (Wydział Chemiczny PWr.) [30]

Ustalając końcowy skład próbek, założono, że będzie on jednakowy zarówno dla próbek izotropowych, jak i anizotropowych. Ułatwi to ostateczne porównanie efektu magnetoreologicznego w obu typach kompozytów. Na podstawie analizy literatury, przede wszystkim z badań prowadzonych w USA, Australii oraz w Chinach, sformułowano warunki niezbędne do uzyskania maksymalnego efektu magnetoreologicznego w elastomerach izotropowych. Jest to z pewnością wielkość cząstek magnetycznych, a wówczas oddziaływanie między dipolami jest silniejsze dla większych cząstek, cząstki te zatem łatwiej tworzą struktury łańcuchowe

w obecności pola magnetycznego. Istotne znaczenie ma też twardość matrycy, co oznacza, że im bardziej miękka osnowa, tym łatwiej cząstki układają się wzdłuż linii pola magnetycznego. Ważne też są odstępki między cząstkami magnetycznymi a osnową, im większe bowiem szczeliny, tym większa strata energii magnetycznej i mniejsze zmiany struktury (czyli efekt MR) w obecności pola magnetycznego. Ważna jest też rola dodatków, które powinny poprawiać miękkość i kohezję kompozytu.

Mając na uwadze wszystkie podane założenia, zdecydowano, że wzorcowa zawartość żelaza ASC 300 wyniesie 35% objętości elastomeru. Aby umożliwić porównanie kompozytów izotropowych z anizotropowymi, w obu rodzajach materiałów użyto jednakowej ilości proszku żelaza. Zaplanowano do wykonania kilka różnych rodzajów kompozytów o różnych składach i polaryzacji końcowej (tab. 6.1).

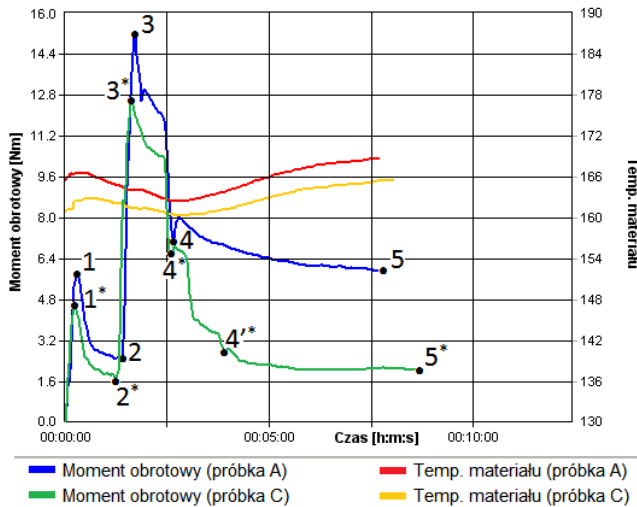
Tabela 6.1. Składy planowanych elastomerów magnetoreologicznych [31]

Nazwa (typ) próbki	Materiał czynny magnetycznie ASC 300	Materiał matrycy Téfabloc	Plastyfikator Olej parafinowy	Udział żelaza	
	[g]	[g]	[g]/[% wag.]	[% wag.]	[% obj.]
próbki izotropowe					
A[X]	125	23,4	2,6/1,7	82,8	35
B[X]	125	20,8	5,2/3,4	82,8	35
C[X]	125	18,2	7,8/5,2	82,8	35
próbki anizotropowe					
A[X]P	125	23,4	2,6/1,7	82,8	35
B[X]P	125	20,8	5,2/3,4	82,8	35
C[X]P	125	18,2	7,8/5,2	82,8	35

6.5. Wytwarzanie elastomerów MRE

Próbki wytwarzano dwuetapowo w mieszalniku oraz w prasie. Do mieszania zastosowano urządzenie Plasti-Corder Lab-Station firmy Brabender. Komorę urządzenia nagrzewano do temperatury 190 °C, wtedy uruchamiano rotory, które kręciły się przeciwbieżnie z prędkością stałą 60 obr./min oraz początkowym momentem obrotowym 1 Nm. Przebieg zmian momentu rejestrowano na komputerze w postaci wykresu plastyczności (rys. 6.5) i na jego podstawie dobierano czasy

poszczególnych etapów mieszania kompozytu. Niezależnie od składu próbki, na początku wsypywano elastomer matrycy (pkt 1; patrz rys. 6.5) i mieszano około minuty do jego całkowitego uplastycznienia, czyli ustabilizowania momentu obrotowego rotorów (pkt 2). Wtedy dosypywano żelaza ASC300 (pkt 3). Gdy następował znaczny spadek momentu (zwykle po około 30 sekundach), który sygnalizował ujednorodnienie materiału, wlewano plastyfikator czyli olej parafinowy (pkt 4). Olej wlewano dwuetapowo (pkt 4 i 4' na dolnym wykresie rys. 6.5), aby uniknąć kontaktu z rozgrzaną masą. Całość mieszano przez 5 minut. Jak zaobserwowano na wykresach plastyczności, rzeczywista temperatura materiału podczas procesu wahała się w zakresie 160–170 °C, co wystarczało do całkowitego uplastycznienia elastomeru matrycy i wymieszania wszystkich składników. Plastyczną, homogeniczną masę wyjmowano z komory i pozostawiano do wystygnięcia.

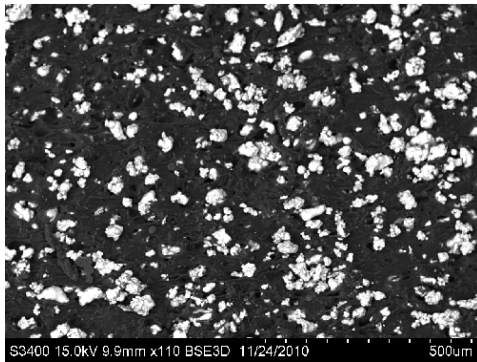


Rys. 6.5. Porównanie plastogramów dla próbek o skrajnych wartościach oleju parafinowego: próbka A – 1,7% wag., próbka C – 5,2% wag. (zgodnie z tab. 6.1). Punkty charakterystyczne próbki C oznaczono gwiazdką [30]

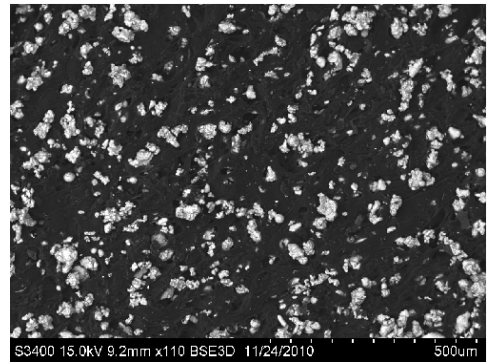
Zmianie poddawano ilość plastyfikatora (olej parafinowy), którego wpływ na funkcjonowanie całego elastomeru uznano za znaczący. Zmiana twardości matrycy miała umożliwić funkcjonowanie mechanizmów oddziaływania między poszczególnymi cząstkami materiału ferromagnetycznego. Przyjęto, iż ich zbliżanie bądź oddalanie, wraz z pojawieniem się i zanikaniem pola magnetycznego, umożliwia zmiany makroskopowo obserwowanych właściwości magnetomechanicznych – efektu magnetoreologicznego elastomeru.

Drugim parametrem, jaki uznano za kluczowy, była zmiana struktury wewnętrznej elastomeru, pod wpływem magnetyzacji zewnętrznym polem magnetycznym,

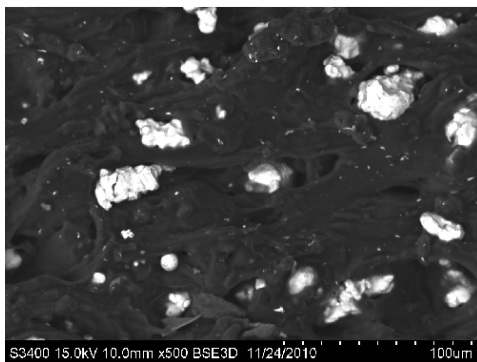
w zadanym kierunku. W trakcie wytwarzania elastomeru cząstki materiału ferromagnetycznego, na skutek mieszania z uplastycznionym materiałem matrycy, tworzą homogeniczną masę. Po obniżeniu temperatury, w dość krótkim czasie, cząstki zastygają w bezładnym położeniu. Taką organizację wewnętrzną można uznać za izotropową. Zdjęcia przekrojów wykonanych próbek (niepolaryzowane – bez litery P w oznaczeniu), wykonane na mikroskopie SEM, pokazane są na rysunkach 6.6a i 6.6b. Oddziaływanie między spolaryzowanymi cząstkami magnetycznymi zależy od ich odległości. Im znajdują się bliżej, tym siła przyciągania jest większa; stąd próba zbliżenia cząstek w trakcie procesu wytwarzania. Ruchy wywoływane są za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego, które powoduje wzajemne przyciąganie się cząstek. Proces ten realizowany jest na etapie uplastycznionej matrycy, która umożliwia swobodne przemieszczanie się i ewentualne obroty cząstek żelaza.



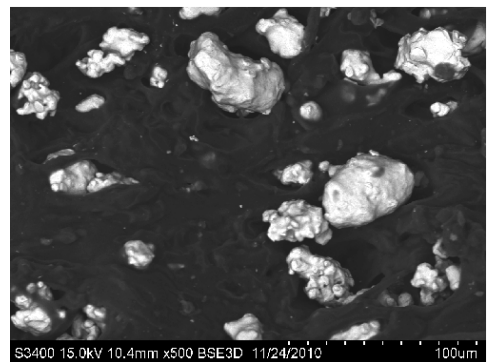
(a)



(b)



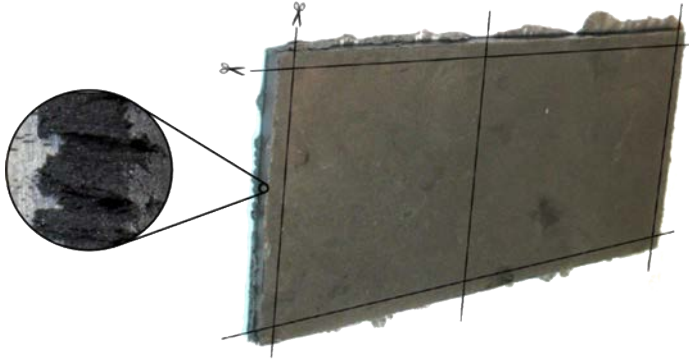
(c)



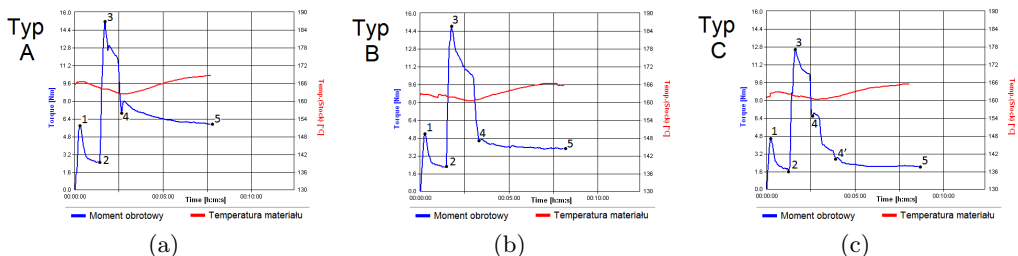
(d)

Rys. 6.6. Zdjęcia próbek elastomerów MR z mikroskopu SEM: a, c) izotropowe (bez polaryzacji) i b, d) anizotropowe (próbka typu B – 35% objętościowo proszku żelaza). Powiększenie 110× (a, b) i 500× (c, d)

Układają się one w struktury, które powstają zgodnie z kierunkiem wektora pola magnetycznego. Obniżenie temperatury (do temperatury pokojowej) powoduje, iż materiał matrycy przestaje być plastyczny i wiąże położenie spolaryzowanych struktur. Takie struktury charakteryzują się budową łańcuchową, którą łatwo jest zaobserwować jedynie w niewielkich ilościach wypełnienia ferromagnetycznego. Takie struktury obserwowano często na brzegach próbek. Przypadek taki pokazano na rysunku 6.6. Obecność tego typu struktur dowodzi zmian we wnętrzu materiału. Ze względu na występujące niejednorodności, brzegi obcinano przed właściwym badaniem próbek. Dla większych zawartości wypełnienia (takiego jak stosowane w badaniach) nie są one tak dobrze widoczne pod mikroskopem (por. rys. 6.6c i 6.6d). W łańcuchach odległości między cząstkami są mniejsze niż w strukturze izotropowej. Uważa się, iż ma to znaczący wpływ na zwiększenie efektu magnetoreologicznego, obserwowanego w skali makro.

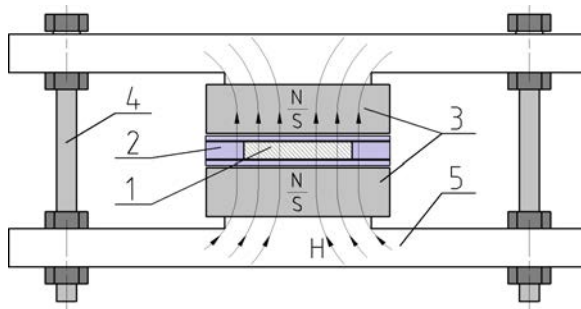


Rys. 6.7. Próbka elastomeru magnetoreologicznego po wyciągnięciu z formy. Powiększenie pokazujące powstające podczas polaryzacji struktury łańcuchowe na brzegach. Zaznaczono miejsca odcięcia w celu uformowania właściwego kształtu próbki



Rys. 6.8. Plastogramy dla próbek typu A–C: 1 – wsypanie polimeru do matrycy, 2–3 – dodawanie proszku żelaza, 4 – dolanie oleju parafinowego (w przypadku próbki C olej dodawano w dwóch etapach, odpowiednio 4 i 4'), 5 – zakończenie mieszania [31]

W kolejnym kroku próbki poddawano prasowaniu, aby nadać im pożądany kształt. Przed prasowaniem materiał cięto na mniejsze kawałki, aby umożliwić równomierne wypełnienie formy. Forma przeznaczona dla elastomerów izotropowych zbudowana była z blachy stalowej grubości 4 mm z wyciętym otworem o wymiarach 50×100 mm oraz dwóch okładzin z cienkiej blachy. Elastomery anizotropowe umieszczano w formie aluminiowej. Aby uniknąć przywierania materiału do okładzin stalowych, blachy oddzielano folią PET (politeraftalan etylenu). Nie stosowano oleju rozdzielającego ze względu na późniejszą konieczność klejenia próbek do płytek mocujących z laminatu szklano-epoksydowego. W procesie prasowania elastomeru o strukturze równokierunkowej, mającej chaotycznie i jednorodnie uporządkowane cząstki, użyto dwóch pras – gorącej oraz zimnej. Najpierw formę wraz z próbką umieszczano na dwie minuty w prasie gorącej podgrzanej do $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, stosując minimalny docisk, aby uplastyczyć materiał. Następnie prasowano pod ciśnieniem 20 MPa przez kolejne 2 minuty. Nagrzaną formę szybko przekładano do prasy o temperaturze pokojowej, gdzie ochładzano pod ciśnieniem 10 MPa. Po 5–7 minutach temperatura formy obniżała się do około $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wtedy wyjmowano ją z prasy.



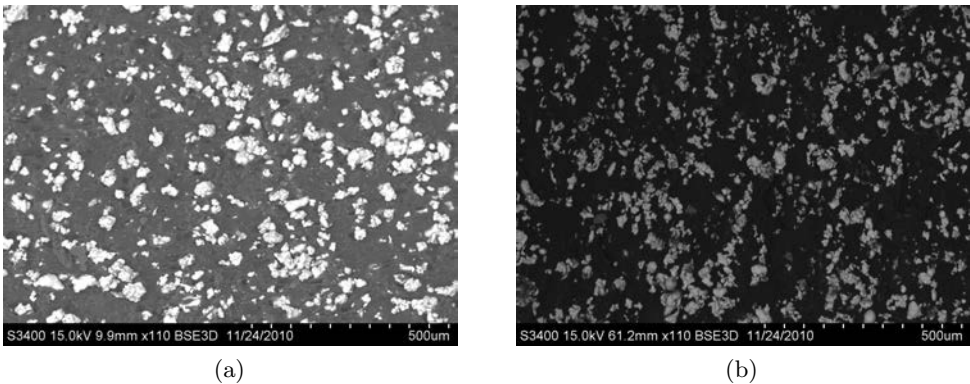
Rys. 6.9. Obwód magnetyczny do polaryzacji elastomerów podczas sieciowania matrycy:

- 1 – elastomer MR, 2 – aluminiowa forma, 3 – magnesy stałe,
 4 – śruby regulujące odległość między magnesami, 5 – zewnętrzny rdzeń spełniający rolę obwodu magnetycznego i łącznika mechanicznego, H – wektor pola magnetycznego, N i S – bieguny magnesów [31]

Dodatkowa obróbka odpężająca nie była konieczna, ponieważ elastomer stopniowo wychładzał się wraz z formą. W efekcie prasowania otrzymywano izotropowy elastomer w postaci wypraski o wymiarach $50 \times 100 \times 4$ mm. W przypadku prasowania kompozytu o strukturze ukierunkowanej, posłużono się formą z otworem o wymiarach $50 \times 85 \times 4$ mm. Wykonano ją z aluminium, aby uniknąć rozproszenia pola magnetycznego przechodzącego przez materiał próbki. Po prasowaniu na gorąco, które przebiegało analogicznie do próbek z materiału izotropowego, nagrzaną formę szybko wkładano między dwa magnesy stałe o znanym wektorze

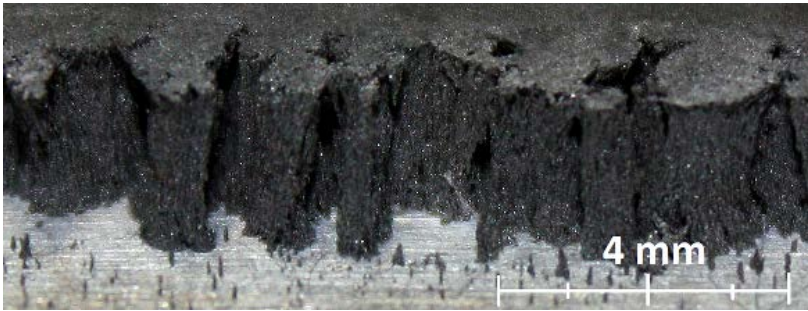
pola oraz pozostawiano je do wystygnięcia (rys. 6.9). Rdzeń ze stałymi magnesami wytwarzał pole magnetyczne o natężeniu H około 400 kA/m i indukcji 0,5 T, przechodzące przez formę prostopadle do jej głównej powierzchni. W ten sposób otrzymywano elastomer polaryzowany.

Sumarycznie otrzymano sześć różnych rodzajów kompozytów MRE, w tym dwie grupy o polaryzowanej i niepolaryzowanej strukturze wewnętrznej. Na początku wykonano serię materiałów testowych, analizując zastosowane metody wytwarzania i przyjęte parametry. Sprawdzenie wpływu polaryzacji zewnętrznym polem magnetycznym wykonano za pomocą obserwacji wewnętrznych struktur. Poddano analizie anizotropowość ułożenia cząstek stanowiących wypełnienie ferromagnetyczne. Na zdjęciach z mikroskopu SEM (rys. 6.10) pokazano wewnętrzne struktury dla kompozytów typu B2 i B2P. Wyraźnie widoczne są cząstki ferromagnetyczne rozłożone w matrycy elastomerowej. Wpływ pola magnetycznego na strukturę i uprzywilejowany kierunek ułożenia cząstek żelaza jest możliwy do zaobserwowania przez porównanie rysunków 6.10a i b.



Rys. 6.10. Zdjęcia mikroskopowe SEM struktur kompozytów magnetoreologicznych: a) kompozyt typu B bez polaryzacji struktur, b) kompozyt typu B z polaryzacją struktur

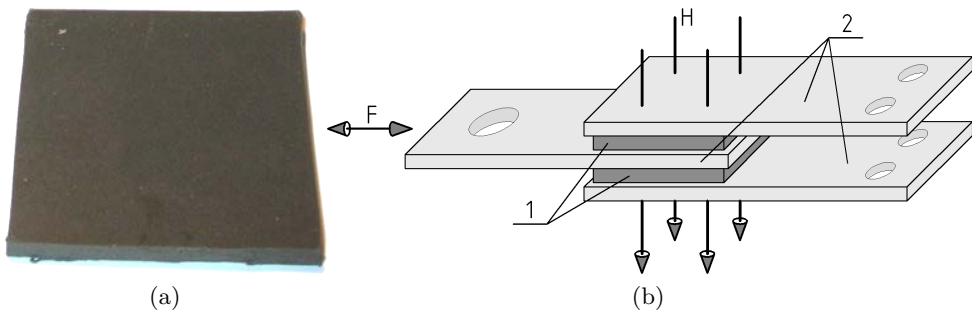
Dodatkowo zamieszczono zdjęcie próbki poddanej polaryzacji przy tzw. wolnej krawędzi matrycy, gdzie materiał kompozytu miał możliwość swobodnego ułożenia się pod wpływem pola magnetycznego (rys. 6.11). Widoczne są struktury spolaryzowane (słupki) układające się zgodnie z liniami pola magnetycznego, prostopadłymi do powierzchni zewnętrznej.



Rys. 6.11. Zdjęcia makrostruktury elastomerowego kompozytu magnetoreologicznego wykonane na wolnym brzegu próbki

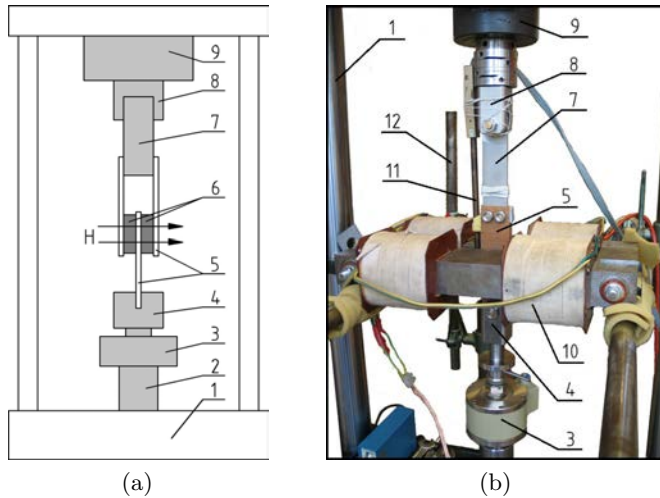
6.6. Cel i metodyka badań

Wytworzone elastomery magnetoreologiczne poddano badaniom, których celem było określenie oddziaływania pola magnetycznego na właściwości mechaniczne pod wpływem obciążeń cyklicznych. Proces wytwarzania umożliwił przy tym uzyskanie próbek o wielkościach $40 \times 40 \times 4$ mm, które wklejano między okładki z laminatu epoksydowo-szklanego. Widok i schemat wytworzonej do badań próbki pokazano na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. a) próbka makro z kompozytu MRE otrzymana w procesie prasowania, gotowa do wklejenia w układ pokazany na rys., b) schemat próbki eksperymentalnej do cyklicznego ścinania; 1 – elastomer magnetoreologiczny, 2 – płytki mocujące, F – wektor siły obciążającej próbkę, H – wektor zewnętrznego pola magnetycznego [31]

Aby zbadać właściwości tłumiące różnych typów wytworzonych elastomerów magnetoreologicznych (MRE), zestawiono stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 6.13. Układ pulsatora hydraulicznego umożliwił testy w warunkach cyklicznego ścinania. Sterowano przebiegiem sinusoidalnej funkcji przemieszczenia oraz przeprowadzono bezpośrednią rejestrację sygnałów siły. Stanowisko pomiarowe wyposażono w obwód magnetyczny, który umożliwił precyzyjne zadawanie

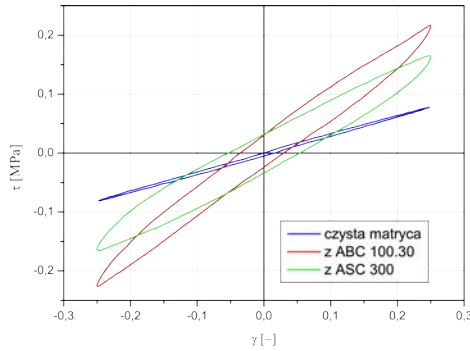


Rys. 6.13. Stanowisko badawcze: a) schemat, b) zdjęcie stanowiska; 1 – pulsator MTS, 2 – tłok pulsatora, 3 – czujnik siły PCB, 4, 8 – szczęki mocujące, 5 – płytki mocujące, 6 – elastomer magnetoreologiczny, 7 – element dystansujący, 9 – czujnik siły MTS, 10 – obwód magnetyczny, 11 – sonda Halla, 12 – element stelażu mocującego [31]

wartości natężenia pola magnetycznego. Wektor pola magnetycznego zorientowany był prostopadle do próbki.

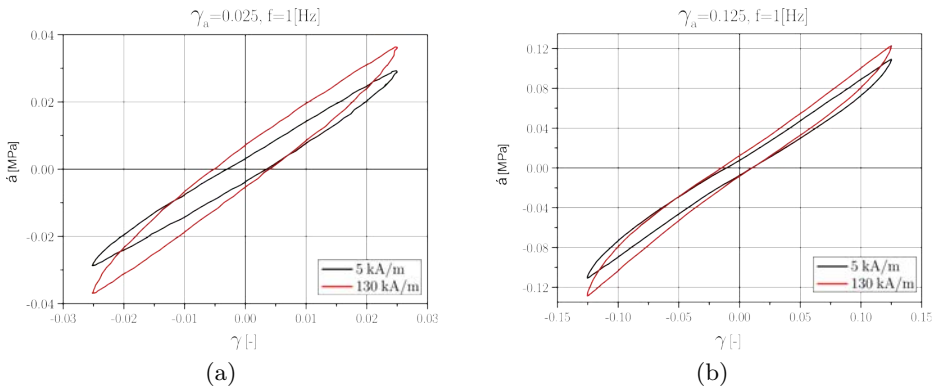
Aby pokazać zmiany, jakie zachodzą w materiale matrycy na skutek domieszkania proszkiem materiału ferromagnetycznego, wykonano w pierwszym etapie badania dla próbek z czystego elastomeru termoplastycznego. Następnie badano MRE wypełnione cząstkami ABC 100.30 oraz ASC 300, które stanowiły 30% objętości. Próbkę testowano w warunkach cyklicznego czystego ścinania, dla różnych wartości amplitudy odkształcenia postaciowego oraz częstotliwości sygnału przemieszczenia. W początkowym etapie analizowano pętle histerezy, we współrzędnych naprężenie tnące–odkształcenie postaciowe ($\tau - \gamma$) dla wybranych materiałów, przy braku pola magnetycznego. Wyraźnie widoczne są różnice właściwości kompozytów i czystego elastomeru (rys. 6.14). Widać też, iż pomimo równej objętości cząstek ferromagnetycznych, kompozyty o różnych wypełnieniach różnią się właściwościami. Wytlumaczyć to można różnicą w wielkości obu typu cząstek (odpowiednio ABS 100.30 oraz ASC 300), przez co materiały różnią się faktycznym stopniem wypełnienia matrycy.

Jak już zaznaczono uprzednio, wpływ pola magnetycznego na właściwości mechaniczne określany jest jako tzw. efekt magnetoreologiczny. Pętle histerezy zwiększają swoją powierzchnię i zmieniają kształt. Amplituda naprężenia tnącego τ_a zwiększa się dla wyższego natężenia pola magnetycznego H , z zachowaniem



Rys. 6.14. Wpływ napełnienia matrycy cząstkami magnetycznymi na kształt i wielkość pętli histerezy. Badania cykliczne w warunkach czystego ścinania – $H = 0$ kA/m [30]

stałej amplitudy odkształcenia postaciowego γ_a . Powstawanie mechanicznej pętli histerezy w obciążeniach harmonicznym świadczy o nieodwracalnym rozpraszaniu energii. Porównanie pętli histerezy dla dwóch skrajnych wartości pola magnetycznego (odpowiednio 5 i 130 kA/m), dla stałej amplitudy odkształcenia, pokazano na rysunku 6.15. W pierwszym etapie poddano badaniu próbki typu A o składzie opisanym w tabeli 6.1. Widoczne są duże różnice w wyglądzie pętli. Przyłożenie pola magnetycznego powoduje zwiększenie naprężeń rejestrowanych w obu typach próbek, a zatem wzrost wielkości odpowiednich pętli.

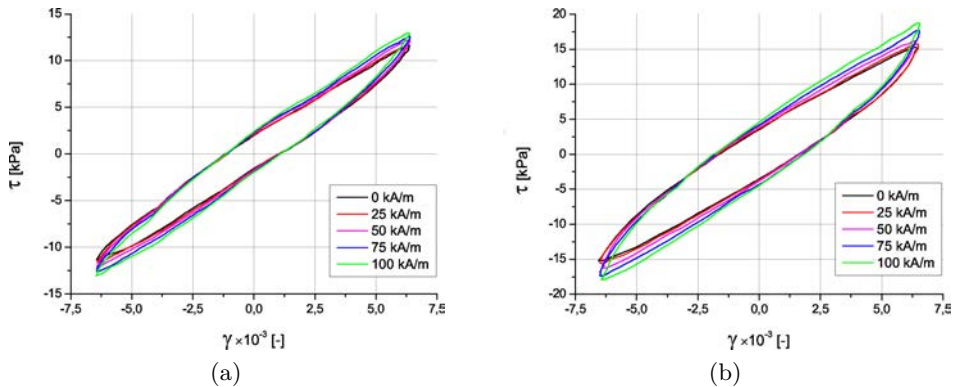


Rys. 6.15. Pętle histerezy o skrajnych wartościach wymuszeń: a) $\gamma_a = 0,025$ i $f = 1$ Hz, b) $\gamma_a = 0,125$ i $f = 1$ Hz dla materiału typu A (tab. 6.1) [32]

Wstępna analiza wyników wykazała, iż właściwości mechaniczne wytworzonych elastomerów mogą być w znacznym stopniu stymulowane polem magnetycznym. Wyraźnie obserwowalne są zmiany, które są powtarzalne i dobrze mierzalne.

6.6.1. Badania kompozytów w warunkach cyklicznego ścinania

W kolejnym etapie przeprowadzono badania mające na celu określenie różnic we właściwościach magnetomechanicznych między poszczególnymi typami elastomerów magnetoreologicznych. Wyniki badań przeprowadzonych w warunkach cyklicznego ścinania kompozytu pokazano na kolejnych rysunkach 6.16.

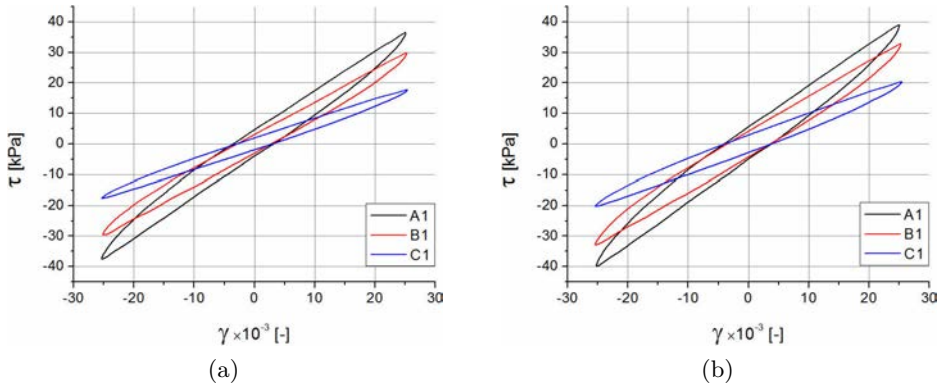


Rys. 6.16. Wpływ uporządkowania wewnętrznej struktury elastomerów magnetoreologicznych: a) pętle histerezy dla próbek typu A1 – niepolaryzowane, b) A1P – polaryzowane przy kolejno narastających wartościach pola magnetycznego 0–100 kA/m [31]

Zestawienie danych pomiarowych na rysunku 6.16 pokazuje, iż polaryzacja próbek istotnie wpływa na energię pętli histerezy we współrzędnych $\tau - \gamma$. Na przykład, dla natężenia pola magnetycznego o wartości 100 kA/m pole pętli dla próbki spolaryzowanej jest większe o ponad 100% w porównaniu z próbką niespolaryzowaną.

Potwierdzono również eksperymentalnie wpływ dodatków uplastyczniających na wartość pola pętli histerezy we współrzędnych $\tau - \gamma$. Porównanie, dla dwóch skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego (odpowiednio: 0 kA/m oraz 100 kA/m) i trzech typów próbek, oznaczonych odpowiednio jako A, B i C, zaprezentowano na rysunku 6.17.

Reasumując ten etap badań, można stwierdzić, iż właściwości wytworzonych elastomerów MR mogą być w znacznym stopniu modyfikowane. Zmiany parametrów magnetomechanicznych uzyskano, kontrolując skład i strukturę wewnętrzną materiału, a także stosując odpowiednią stymulację polem magnetycznym. Analizując pętle histerezy, zauważono wpływ natężenia pola magnetycznego na kształt i pole powierzchni wykresów. Niezależnie od składu i struktury próbki, zwiększenie natężenia pola zawsze powodowało wzrost powierzchni pętli. Zmiana ta była lepiej widoczna w próbkach anizotropowych. W przypadku elastomerów



Rys. 6.17. Wpływ dodatków uplastyczniających matryce kompozytu: a) pętle histerezy dla próbek typu A, B i C (o różnej wartości plastyfikatora) dla dwóch skrajnych wartości pola magnetycznego – 0 kA/m, b) 100 kA/m [31]

izotropowych, wartości rejestrowane naprężenia były odwrotnie proporcjonalne do zawartości plastyfikatora, co oznacza, iż większe pętle histerezy obserwowano dla bardziej twardych matryc. Wpływ składu materiału na rozmiar pętli elastomerów polaryzowanych nie był przedmiotem badań. Zauważalnie natomiast zmieniało się ich wzajemne położenie. Naprężenia rejestrowane w próbkach anizotropowych były zawsze większe niż w przypadku odpowiadających im składem próbek izotropowych. Różnice te pogłębiały się ze zwiększaniem się natężenia pola magnetycznego. Elastomery anizotropowe wykazują też większe zmiany amplitudy naprężenia niż elastomery izotropowe. Dla elastomerów izotropowych maksymalną wartość względnej zmiany amplitudy naprężenia, ponad 24%, zmierzono w próbce o najmniejszej twardości, typu C. Dzięki uzyskanym результатам przyjmuje się, iż materiały te można zastosować w budowie aktywnych tłumików drgań.

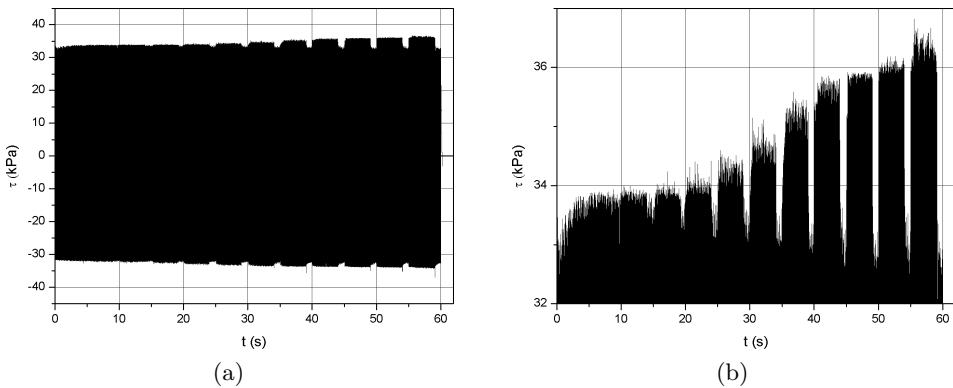
6.7. Badania właściwości magnetomechanicznych elastomerów magnetoreologicznych

Głównym celem badań było określenie związków między polem mechanicznym i magnetycznym dla wybranej grupy elastomerów MR. Relacje między obydwojma polami określone są przez związki konstytutywne. W przypadku materiałów obdarzonych charakterystykami nie tylko sprężystymi – ale też plastycznymi, a w dodatku zależnymi od czasu i innych zewnętrznych oddziaływań (np. magnetycznych) – znalezienie związków konstytutywnych jest zadaniem o dużym stopniu trudności. Prezentowane wyniki badań obejmowały zarówno głównie zależ-

ności odkształcenie–naprężenie, jak i wielkości amplitudy odkształcenia w funkcji natężenia pola magnetycznego.

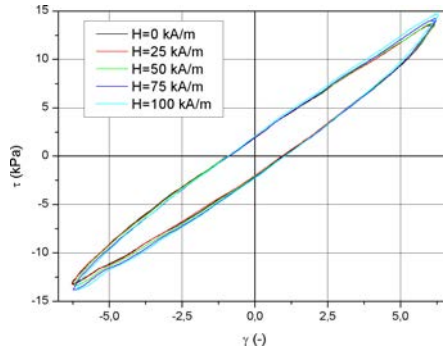
Próbki mocowano w sposób umożliwiający uzyskanie stanu zbliżonego do czystego ścinania w badanym materiale. Pole magnetyczne przykładano prostopadle do kierunku odkształcania. Rejestrowano przebiegi naprężenia i przemieszczenia o zadanej wartości natężenia pola magnetycznego i częstotliwości odkształcania. Metodyka pomiaru polegała na rejestrowaniu „odpowiedzi” materiału w postaci naprężenia i porównaniu otrzymanych wykresów dla różnych wartości przykładanego pola magnetycznego oraz parametrów obciążenia mechanicznego. Za kluczowe, dla poznania właściwości magnetomechanicznych materiału, uznano odpowiednio wpływ amplitudy odkształcenia oraz natężenia pola magnetycznego. Za wymuszenie mechaniczne wybrano sygnał harmoniczny o stałej częstotliwości 1 Hz. Jego amplitudę ustalano dla każdego pomiaru indywidualnie. Odpowiedź rejestrowano w postaci przebiegów naprężenia mierzonych pośrednio za pomocą czujników siły.

Na rysunku 6.18 przedstawiono typowe wyniki. W jednym cyklu badawczym rejestrowano zmiany naprężeń powstających w materiale na skutek oddziaływania pola magnetycznego lub zmiany amplitudy odkształcenia. Pole magnetyczne przykładane było w określonych cyklach (z krótkimi przerwami, gdy było zmniejszane do poziomu bliskiego zera). Opierając się na analizie rysunku 6.1 można zauważyć, iż amplitudy naprężenia zmieniają się wraz z oddziaływaniem pola magnetycznego. Zwiększają się podczas zwiększania wartości pola magnetycznego i maleją po jego zmniejszeniu. Pole magnetyczne przykładane było z kolejno nara-

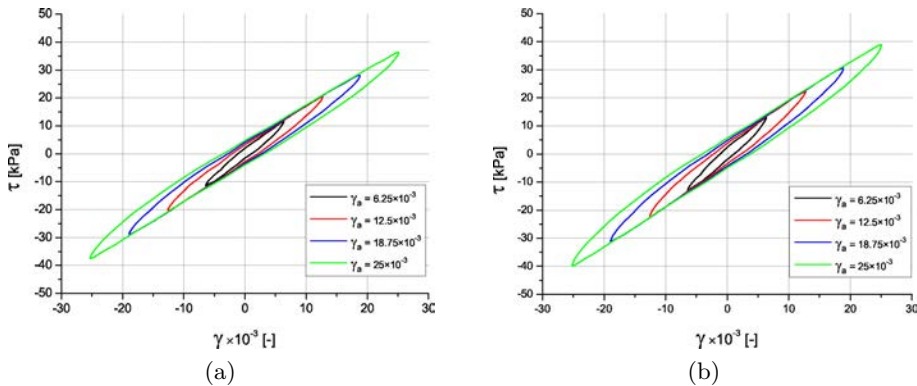


Rys. 6.18. Przebieg czasowy odpowiedzi (naprężenie τ) badanego materiału magnetoreologicznego na wymuszenie odkształceniem o stałej amplitudzie (γ_a) o charakterze funkcji harmonicznej dla częstotliwości równej 1 Hz. Widoczne uskoki wywołane zewnętrznym polem magnetycznym: a) pełny przebieg, b) powiększenie wykresu w celu pokazania uskoków dla dodatniej części amplitudy

stającymi wartościami natężenia, 0–100 kA/m, ze skokiem co 10 kA/m. W celu lepszego zaprezentowania występujących uskoków, wykonano powiększenie wykresu z rysunku 6.18a, co widoczne jest na rysunku 6.18b. Efekt działania pola magnetycznego jest widoczny zatem jako zmiana właściwości mechanicznych. Oznacza to innymi słowy, iż uzyskanie tego samego przemieszczenia – dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego – wymaga różnych wartości sił. Świadczy to o tzw. umocnieniu materiału pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 6.19. Wybrane pętle histerezy w układzie naprężenie–odkształcenie dla narastających wartości pola magnetycznego, o ustalonej wartości amplitudy odkształcenia postaciowego



Rys. 6.20. Wybrane pętle histerezy, w układzie naprężenie–odkształcenie, dla narastających wartości amplitudy odkształcenia i dwóch skrajnych wartości pola magnetycznego: a) $H = 0$ kA/m, b) $H = 100$ kA/m [31]

Wykresy w postaci wybranych pętli histerezy, w układzie naprężenie–odkształcenie (dla ustalonej wartości amplitudy odkształcenia), pokazano na rysunku 6.19. Widoczne są niewielkie zmiany wywołane narastającym polem magnetycznym.

Pętla histerezy zmienia wówczas nieznacznie swoje pochylenie, co może świadczyć o zwiększającej się sztywności. Widoczny jest też niewielki wzrost pola powierzchni, co z kolei świadczy o zwiększeniu tłumienia.

6.8. Zasadność i kierunki dalszych badań

Zarówno uzyskane wyniki, jak i analiza literatury przedmiotu wskazują na potrzebę kontynuacji badań w zakresie budowy, technologii wytwarzania, badania właściwości i zastosowań elastomerów magnetoreologicznych. Za szczególnie wskazane uznać należy działania mające na celu:

- Optymalizację doboru składników elastomeru, w tym niemagnetycznej matrycy, elementów magnetycznie aktywnych (w tym: rodzaju, kształtu, ilości i rozmieszczenia cząstek) oraz dodatków uplastyczniających.
- Doskonalenie technologii wytwarzania elastomerów izotropowych i anizotropowych, głównie w celu uzyskania powtarzalnych właściwości magnetoreologicznych. Liczba parametrów wymagających regulacji w fazie mieszania, prasowania i stymulacji magnetycznej jest znaczna i trudna do optymalizacji.
- Przeprowadzenie gruntownych badań zmęczeniowych wytworzonych materiałów, gdyż możliwości aplikacyjne elastomerów magnetoreologicznych uzależnione są od stabilności właściwości tłumiących w zakresie wytrzymałości wysokocyklowej.
- Poszukiwania związków konstytutywnych umożliwiających opis właściwości magnetomechanicznych, w tym szczególnie z uwzględnieniem wpływu częstotliwości obciążania.
- Budowy demonstratorów laboratoryjnych prezentujących możliwości komercjalizacji elastomerów magnetoreologicznych.

Bibliografia

- [1] Li J.F., Gong X.L., Xu Z.B., Jiang W.Q., *Effect of pre-structure process on magnetorheological elastomer performance*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 99, 2008, 1358–1364.
- [2] Medalia A.I., *Morphology of aggregates: I. Calculation of shape and bulkiness factors; application to computer-simulated random flocs*, Journal of Colloid and Interface Science, 24, 1967, 393–404.
- [3] Medalia A.I., *Effective degree of immobilization of rubber occluded within carbon black aggregates*, Rubber Chemistry and Technology, 45, 1972, 1171.
- [4] Browne A.L., Johnson N.L., *Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use*, US patent 2006/0012191 A1 2006.

- [5] Lu X.S., Qiao X.Y., Watanabe H., Gong X.L., Yang T., Li W., Sun K., Li M., Yang K., Xie H.G., Yin Q., Wang D., Chen X.D., *Mechanical and structural investigation of isotropic and anisotropic thermoplastic magnetorheological elastomer composites based on poly(styrene-*b*-ethylenecobutylene-*b*-styrene) (sebs)*, *Rheologica Acta*, 51, 2011, 37–50.
- [6] Gong X.L., Fan Y.C., Xuan S.H., Xu Y.G., Peng C., *Control of the damping properties of magnetorheological elastomers by using polycaprolactone as a temperature-controlling component*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 2012, 6395–6403.
- [7] Ottaviani R.A., Ulicny J.C., Golde M.A., *Magnetorheological nanocomposite elastomer for releasable attachment applications*, US patent 7,020,938 B2 2006.
- [8] Opie S., Yim W., *Design and control of a real-time variable modulus vibration isolator*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22, 2011, 113–125.
- [9] Klukowski C., *Steering column for a motor vehicle*, US patent 20090033082 A1 2009.
- [10] Hu G.L., Guo M., Li W.H., Du H.P., *Experimental investigation of the vibration characteristics of a magnetorheological elastomer sandwich beam under non-homogeneous small magnetic fields*, *Smart Materials and Structures*, 20, 2011, 127001.
- [11] Xu Y.G., Gong X.L., Xuan S.H., Zhang W., Fan Y.C., *A high-performance magnetorheological material: preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties*, *Soft Matter*, 7, 2011, 5246.
- [12] Hasheminejad S.M., Shahanimotlagh M., *Magnetic-field-dependent sound transmission properties of magnetorheological elastomer-based adaptive panels*, *Smart Materials and Structures*, 19, 2010.
- [13] Fan Y.C., Gong X.L., Xuan S.H., Zhang W., Zhang J., Jiang W.Q., *Interfacial friction damping properties in magnetorheological elastomers*, *Smart Materials and Structures*, 20, 2011, 035007.
- [14] Usman M., Sung S.H., Jang D.D., Jung H.J., Koo J.H., *Numerical investigation of smart base isolation system employing MR elastomer*, *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.
- [15] Bose H., Roder R., *Magnetorheological elastomers and use thereof*, US patent 7,608,197 B2 2009.
- [16] Watson J.R., *Method and apparatus for varying the stiffness of a suspension bushing*, US patent 5,609,353 1997.
- [17] Stewart W.M., Ginder J.M., Ellie L.D., Nichols M.E., *Method and apparatus for reducing brake shudder*, US patent 5,816,587 1998.
- [18] Elie L.D., Ginder J.M., Mark J.S., Nichols M.E., Stewart W.M., *Method for allowing rapid evaluation of chassis elastomeric devices in motor vehicles*, US Patent 5,974,856 1999.
- [19] Elie L.D., Ginder J.M., Mark J.S., Nichols M.E., Stewart W.M., *Method and apparatus for measuring displacement and force*, US patent 5,814,999 1998.
- [20] Barvosa-Carter W., Johnson N.L., Browne A.L., *Reversibly expandable energy absorbing assembly utilizing actively controlled and engineered materials for impact management and methods for operating the same*, US patent 7,140,478 B2 2006.

- [21] Bogdanov V., Borin D., Stepanov G., Andruszkiewicz A., *Usage of magneto-active elastomers in a bumper of a vehicle for front impact protection*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [22] Ottaviani R.A., Ulicny J.C., Golde M.A., *Magnetorheological nanocomposite elastomer for releasable attachment applications*, US patent 6,877,193 B2.
- [23] Radolato A.R., Pawlowski R.P., *Tunable slip yoke damper assembly*, US patent 6,623,364 B2 2003.
- [24] Lerner A.A., Cunefar K.A., *Adaptable vibration absorber employing a magnetorheological elastomer with a variable gap length and methods and systems therefor*, US patent 7,102,474 B2 2006.
- [25] Hitchcock G., Gordaninejad F., Fuchs A., *Controllable magneto-rheological elastomer vibration isolator*, US patent 7,086,507 B2 2006.
- [26] Farshad M., LeRoux M., *A new active noise abatement barrier system*, Polymer Testing, 23, 2004, 855–860.
- [27] Reji J., Suresh G.N., Natarajan V., *Low frequency underwater acoustic projector using a magnetorheological elastomer*, Indian patent 2251/del/2004 2004.
- [28] Brei D., Redmond J., Wilmot A.L., Browne N.A., Johnson N.L., Jones G.L., *Hood lift mechanisms utilizing active materials and methods of use*, US patent 7,063,377 B2 2006.
- [29] Brei D., Redmond J., Wilmot A.L., Browne N.A., Johnson N.L., Jones G.L., *Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use*, EU patent EP 1 617 022 A2 2006.
- [30] Zając P., *Właściwości tłumiące elastomerów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja. W trakcie realizacji*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2012.
- [31] Królewicz M., *Właściwości magnetomechaniczne elastomerów magnetoreologicznych o strukturze izotropowej i anizotropowej*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2010.
- [32] Zając P., Kaleta J., Lewandowski D., Gasperowicz A., *Isotropic magnetorheological elastomers with thermoplastic matrices: structure, damping properties and testing*, Smart Materials and Structures, 19, 2010, 1–7.

Rozdział 7. Magnetowizja

W rozdziale zaprezentowano budowę i możliwości pomiarowe systemów magnetowizyjnych, czyli skanerów pola magnetycznego o cechach użytkowych umożliwiających szybkie uzyskiwanie obrazu magnetycznego różnorodnych obiektów. Wykazano, iż związki między właściwościami wytrzymałościowymi, polem mechanicznym i magnetycznym stworzyły nowe możliwości badania materiałów.

Zbadano możliwości aplikacyjne efektu Villariego. Wykazano wrażliwość efektu na geometrię próbki, jakość powierzchni, strukturę materiału, poziom i historię obciążenia itp. Powoduje to, iż wykorzystane zjawisko można było uznać za czuły indykator w procesie zmęczenia i quasi-statycznego obciążania. Wykazano, iż możliwa jest rejestracja pola magnetycznego wywołanego jedynie obciążeniem mechanicznym. Opanowano i udokumentowano metodę wyznaczania cyklicznej granicy plastyczności w badaniach przyśpieszonych, opierając się na efekcie Villariego. Wykazano, iż parametry efektu wykazują silnie liniowy charakter w obszarze odkształceń globalnie sprężystych, a więc tam, gdzie mechaniczna pętla histerezy redukuje się praktycznie do linii. Pojawienie się odkształceń plastycznych sygnalizowane jest z kolei wyraźnym odgięciem przebiegu. Efekt Villariego wykazuje silną zależność od amplitudy naprężenia i liczby cykli zadawanego obciążenia mechanicznego. Przydatność efektu jest szczególnie duża w przypadku ferromagnetyków wykazujących bardzo małe odkształcenia plastyczne (np. stale spiekane). Wartość energii magnetycznej ΔM jest około pięć rzędów mniejsza od wartości energii mechanicznej ΔW dostarczanej do materiału.

Stworzono kilka generacji głowic, kamer i skanerów z zastosowaniem układów pomiarowych zarówno zawierających pasywne czujniki magnetorezystancyjne, jak i wykorzystujących, np. efekt Halla. Opracowano też metodykę badań pól magnetycznych z użyciem wymienionych urządzeń. Niektóre skanery dedykowane były do badania zmian pola magnetycznego o wartościach mniejszych niż magnetyzm ziemski, inne z kolei przeznaczone były do rejestracji pola wokół silnych magnesów trwałych. Systemy umożliwiały szybkie uzyskiwanie obrazu

magnetycznego z różnorodnych obiektów płaskich, walcowych i kulistych. Urządzenia pomiarowe mogły być używane zarówno jako układy całkowicie autonomiczne, jak i sprzężone przez wspólne sterowanie z typową maszyną wytrzymałościową do badań statycznych i zmęczeniowych. Wykazano też, iż skaner może zostać wyposażony w nowe funkcje, takie jak pomiar struktury na badanej powierzchni (optyczny skaner 3D) czy skaner podatności powierzchni na zjawiska elektryczne, takie jak zmiana właściwości dielektrycznych, w tym podatności na przebicia. Stworzono ponadto generację oprogramowania, dzięki której stała się możliwa dalsza obróbka map rozkładu pola magnetycznego z pomiaru oraz wizualizacja w programach parametrycznych typu CAD. Duży nacisk położono na sposób prezentacji wyników i optymalizację obliczeń.

Na przykładzie tarczy z otworem kołowym poddanej cyklicznemu obciążaniu zaprezentowano możliwości wykorzystania układu pomiarowego do identyfikacji efektu Villariego. Przeprowadzono identyfikację zjawisk o charakterze magnetomechanicznym w odkształcanych blachach ferromagnetycznych w procesie tłoczenia. Zaproponowano magnetyczny analog krzywej jednoosiowego rozciągania i krzywej umocnienia. Wykazano przydatność kamery do badania tekstury blach oraz kinetyki przemian fazowych (np. atermicznej przemiany martenzytycznej występującej w przypadku materiałów z pamięcią kształtu), a także magnetopoligrafii. Zbadano magnetomechaniczne właściwości blach spawanych laserowo w procesie quasi-statycznego rozciągania. Ważnym osiągnięciem było też wykazanie magnetycznej pamięci historii odkształcania materiału ferromagnetycznego. Sprawdzono możliwości magnetowizji do testowania obiektów w zakresie silnych pól magnetycznych (magnesy), demagnetyzacji termicznej przemysłowych magnesów trwałych oraz degradacji materiałów na skutek gwałtownego cyklicznego przemagnesowania.

7.1. Wprowadzenie

Niniejszy rozdział książki jest przykładem, jak zainteresowania zespołu autora polami krzyżowymi, w tym głównie efektami magnetomechanicznymi w mechanice eksperymentalnej oraz materiałami magnetycznymi Smart, doprowadziły do rozwoju unikatowej nieniszczącej techniki pomiarowej nazwanej magnetowizją (analogicznie do np. terminu termowizja w pomiarach pól temperatur).

Magnetowizja, najkrócej, to stosunkowo nowa metoda pomiaru i wizualizacji pola magnetycznego wokół badanego obiektu. Terminu tego użyto prawdopodobnie po raz pierwszy w 1996 roku [1–3], przy czym chronologicznie prawdopodobnie pierwszą była praca [3]. Definicję tę wprowadzono też do wydawnictwa encyklopedycznego McGraw-Hill 2000 Yearbook of Science and Technology [4]. Dzięki

analizie literatury przedmiotu można wykazać, iż zagadnienie magnetowizji stało się swoistą polską specjalizacją. Wieloletnie prace zaowocowały powstaniem kilku konstrukcji aparatury pomiarowej i licznymi przykładami ich aplikacji, niezależnie w dwóch ośrodkach: warszawskim i wrocławskim. W tym pierwszym trudne do przecenienia są szczególnie osiągnięcia zespołu S. Tumańskiego [3–10]. Na uwagę zasługują też prace [5, 11]. Natomiast dorobek zespołu wrocławskiego, którym kieruje autor, omówiono sukcesywnie w dalszej części.

W rozdziale zaprezentowano budowę i możliwości pomiarowe systemów magnetowizyjnych, czyli różnych skanerów pola magnetycznego najnowszej generacji, o cechach użytkowych umożliwiających szybkie uzyskiwanie obrazu magnetycznego różnorodnych obiektów płaskich i walcowych.

Znaczna miniaturyzacja czujników pola magnetycznego, w postaci np. magnetorezystorów, umożliwiła budowę sondy do quasi-ciągłego, powierzchniowego pomiaru natężenia pola magnetycznego badanego obiektu. Pierwszy model powstał w roku 1996 [1]. Wadą prototypu była bardzo mała szybkość pracy – uzyskanie jednego obrazu trwało bowiem kilkanaście minut. Spowodowane to było wykorzystaniem tylko jednego czujnika pola magnetycznego i stosunkowo prostego układu pozycjonowania. Przetwarzanie zebranych danych odbywało się w trybie off-line, po zakończonym eksperymencie. W kolejnych latach opracowano kolejne generacje urządzenia, które miały zapewnić:

- równoczesny pomiar dwóch, a następnie trzech składowych natężenia pola magnetycznego (H_x, H_y, H_z), z wykorzystaniem kilku lub kilkunastu czujników,
- przyśpieszenie procedury przetwarzania otrzymanych danych,
- udoskonalenie sposobów przetwarzania (eliminacja wpływu tła, „odszumianie” danych, zwiększenie czułości, równoczesna – ze zbieraniem danych – ich wizualizacja).

Wspólną cechą nowej generacji kamer było zastosowanie układu DSP (ang.: *Digital Signal Processing*, zaawansowanego systemu umożliwiającego „integrację” pomiaru) i wykorzystanie komputera PC.

W rezultacie stworzono kilka odmian głowic, kamer i skanerów z zastosowaniem układów pomiarowych zarówno zawierających pasywne czujniki magnetorezystancyjne, jak i wykorzystujących np. efekt Halla. Opracowano też metodykę badań pól magnetycznych z użyciem wymienionych urządzeń. W literaturze przedmiotu znaleźć można nieliczne dotąd przypadki konstruowania i zastosowania takiej aparatury. Wykazano, iż system pomiarowy pola magnetycznego może być wykorzystywany zarówno jako układ całkowicie autonomiczny, jak i sprzężony, w tym przez wspólne sterowanie, np. z typową maszyną wytrzymałościową do badań statycznych i zmęczeniowych.

Przyjęto, iż głównym celem jest opanowanie pomiaru za pomocą odpowiedniego sensora, tzw słabych pól magnetycznych (porównywalnych z ziemskim), występujących wokół obciążonego (odkształconego) ferromagnetyka. Za szczególnie obiecujące uznano następujące zastosowania:

- badanie zjawisk magnetomechanicznych i identyfikacja ich modeli,
- lokalizacja pól odkształceń oraz miejsc występowania deformacji plastycznych (naprężenia resztkowe, granica plastyczności, kumulacja uszkodzenia w procesie quasi-statycznego i cyklicznego obciążania),
- detekcja nieciągłości struktury (np. wtrącenia, tekstura, mikropęknięcia, identyfikacja faz),
- identyfikacja historii obciążania materiału,
- badanie kinetyki przemian fazowych (np. atermiczna przemiana martenzytyczna, badanie materiałów z pamięcią kształtu),
- analiza i optymalizacja procesów technologicznych (np. badania jakości wyrobów w procesach tłoczenia blach itp.),
- badanie niejednorodności namagnesowania,
- badania efektów poligrafii magnetycznej,
- badanie materiałów magnetycznych Smart (patrz rozdz. odpowiednio 3 i 4) i harvesterów (patrz rozdz. 8) i wiele innych.

7.2. Efekt Villariego i jego zastosowania w mechanice eksperymentalnej

7.2.1. Metody magnetyczne w nieniszczących badaniach materiałów

Magnetyczne metody badania materiałów należą do grupy nieniszczących (ang.: *Nondestructive Evaluation* – NDE) i zazwyczaj nie wymagają szczególnych zabiegów związanych z przygotowaniem kontrolowanego materiału do testów. Za pomocą metod magnetycznych można ocenić zachowanie się pewnych elementów (np. odcinka stalowej rury) w ich naturalnych warunkach pracy. Stąd metody magnetyczne stosuje się chętnie w warunkach przemysłowych do szybkich pomiarów jakościowych. Magnetyczne metody NDE znajdują zatem zastosowanie, np:

- w badaniach struktury i właściwości materiałów (wielkość ziarna, wartość naprężeń wewnętrznych, przewodność cieplna, twardość itp.),
- podczas wykrywania defektów w elementach wykonanych z materiałów magnetycznych (np. pęknięcia, wady połączeń spawanych i wiele innych defektów o charakterze szeroko rozumianych nieciągłości).

Do najczęściej stosowanych magnetycznych metod wykorzystywanych w badaniach wewnętrznych zaliczamy [12–14]:

- metodę szumów Barkhausena (ang.: *Magnetic Barkhausen Emission* – MBE),
- magnetoakustyczną emisję (ang.: *Magneto-Acoustic Emission* – MAE),
- metodę wykorzystującą analizę krzywej histerezy magnetycznej.

Do często używanych metod magnetycznych, wykorzystywanych z kolei w wykrywaniu defektów, zalicza się:

- metodę cząstek magnetycznych (ang.: *Magnetic Particle Inspection* – MPI),
- metodę prądów wirowych.

Przykładowo duże znaczenie w diagnostyce obiektów mają strefy koncentracji naprężeń (SKN), które są podstawowym źródłem rozwoju pęknięć w konstrukcjach stalowych, dlatego ważna jest odpowiednia diagnostyka w celu uniknięcia uszkodzeń i ich konsekwencji. Wykrywanie stref koncentracji naprężeń w pracujących konstrukcjach nie może odbywać się kosztem naruszenia struktury materiału, co dyskwalifikuje metody badań niszczących. Obszary materiału, w którym koncentrują się naprężenia, zmieniają silnie swoje parametry magnetyczne. Spowodowane jest to tworzeniem się i umiejscowieniem granic domen magnetycznych na ściankach dyslokacji w strefach koncentracji naprężeń. Zależność tę wykorzystuję się w badaniach nieniszczących, np. metodą magnetycznej pamięci metali, rozwijanej przez zespół autora [12, 13, 15].

7.2.2. Efekt Villariego jako zjawisko o charakterze magnetomechanicznym

W roku 1842 James Joule zauważył właściwość ferromagnetyków, która polegała na zmianie ich wymiarów zewnętrznych pod wpływem działania pola magnetycznego (tzw. magnetostrykcja liniowa) [14, 16]. Magnetostrykcja (ang.: *magnetostriction*) jest zjawiskiem polegającym na sprężystym odkształcaniu się ciała magnetycznego podczas magnesowania. Przyczyną jest zmiana orientacji domen ferromagnetycznych pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego, która powoduje zmianę położenia równowagi atomów, a w konsekwencji deformację sieci krystalicznej i zmianę rozmiarów ciała. Magnetostrykcja jest bądź dodatnia, bądź ujemna, zależnie od tego, czy mamy do czynienia z rozciąganiem czy ściskaniem. Dla niektórych stopów, jak np. permaloju o składzie 82% Ni i 18% Fe (ang.: *Permalloy*), magnetostrykcja równa jest prawie zeru i stąd taki materiał służy do budowy czujników pola magnetycznego [14, 15, 17].

Wraz z magnetostrycją liniową, jak również samodzielnie, może wystąpić magnetostrykcja objętościowa nazywana zjawiskiem Barnetta, która polega na wzroście lub zmniejszaniu objętości materiału.

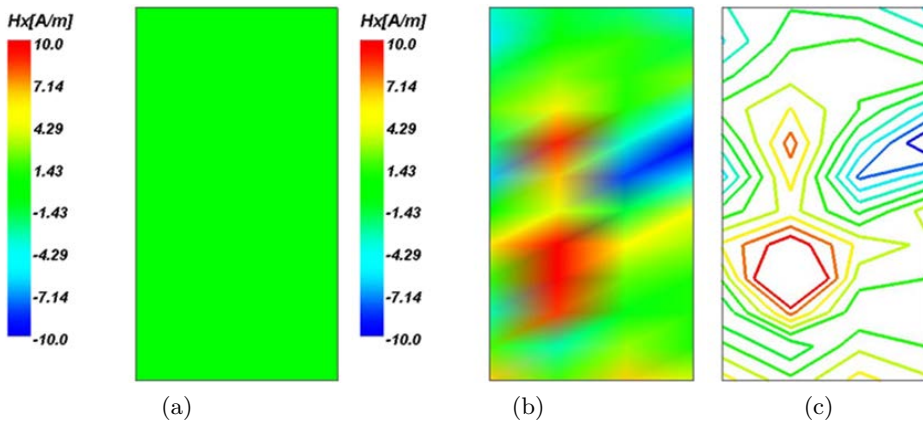
Poza opisanymi zjawiskami magnetomechanicznymi jest jeszcze wiele innych, jak np.:

- Zjawiska Guillemina i Wiedemanna (pochodne efektu Joule'a). Pierwsze zjawisko polega na dążeniu do wyprostowania zginanych sprężyste lub trwale prętów umieszczonych w polu magnetycznym, a drugie na skręcaniu swobodnego końca zamocowanego pręta namagnesowanego wzdłużnie, przez który równocześnie przepływa prąd elektryczny powodujący powstawanie obwodowego pola magnetycznego.
- Zjawiska Barnetta i Einsteina–de Haasa, które opierają się na związku między momentem magnetycznym a momentem pędu elementarnych nośników magnetyzmu (atomów lub cząsteczek) określonym współczynnikami magneto-mechanicznymi lub giromagnetycznymi. Przykładem zjawiska Barnetta jest pręt ferromagnetyczny szybko obracający się wokół swej osi, w którym powstaje moment magnetyczny i który zostaje namagnesowany nawet wtedy, gdy brak jest zewnętrznego pola magnetycznego.
- Zjawisko Einsteina–de Haasa jest odwrotnym zjawiskiem Barnetta, w którym pod wpływem zmiany magnetyzacji pręt obraca się wokół osi pokrywającej się z kierunkiem zewnętrznego pola.
- Zjawisko Barkhausena spowodowane przesuwaniem się ścian domenowych i obrotem wektorów magnetyzacji domen.

Szczególnym przypadkiem magnetostrykcji jest piezomagnetyzm. W praktyce zjawisko to obserwuje się w materiałach magnetostrykcyjnych spolaryzowanych magnetycznie, a w postaci czystej w niektórych antyferromagnetykach. Z magnetostrycją związana jest mechanostrykcja i efekt ΔE polegający na zmianie modułu sprężystości podczas przejścia od stanu rozmagnesowania do stanu nasycenia technicznego. Zjawiskami pochodnymi związanymi z magnetostrycją są także: zależność magnetyzacji spontanicznej, przenikalności i temperatury Curie od ciśnienia hydrostatycznego, a także opóźnienie magnetyczne, tłumienie fal akustycznych i tarcie wewnętrzne.

Ponad dwadzieścia lat po odkryciu J. Joule'a włoski badacz Emilio Villari, dysponując bardzo czułym aparatem pomiarowym, stwierdził, że zachodzi również odwrotne zjawisko do magnetostrykcji. Polega ono na wytwarzaniu pola magnetycznego przez obciążony mechanicznie materiał ferromagnetyczny. Efekt ten został nazwany efektem Villariego, ale często można też znaleźć w literaturze przedmiotu takie synonimy jak mechanostrykcja lub odwrotna magnetostrykcja [15, 17]. Na odwrotną magnetostrycję wpływ mają: kierunek i wielkość siły obciążającej, częstotliwość obciążania, rodzaj materiału, historia obciążania, geometria próbki oraz pole zakłóceń. Wizualizacje pola magnetycznego obciążanego ferromagnetyka przedstawiono na rysunku 7.1.

Jak wskazano wcześniej, coraz szerzej do poznania procesów zachodzących w materiale, w następstwie przyłożonego pola odkształceń, stosuje się krzyżowe



Rys. 7.1. Obraz magnetyczny płaskiej próbki ferromagnetycznej:
 a) materiał jednorodny (po obróbce cieplnej) nieobciążony,
 b) ten sam materiał po odkształceniu (powyżej granicy plastyczności),
 c) izolinie pola magnetycznego odpowiadające obrazowi b) [18]

zjawiska magnetomechaniczne. Dlatego budowę kamery i jej liczne aplikacje poprzedziły prace z zakresu wykorzystania efektu Villariego w mechanice eksperymentalnej. Chodziło wówczas o przypadek, kiedy badany obiekt nie jest podmagnesowany, a zmiany jego pola magnetycznego są następstwem zmian jedynie pola mechanicznego.

Związki między właściwościami wytrzymałościowymi materiałów konstrukcyjnych, polem mechanicznym i polem magnetycznym stworzyły nowe możliwości badania materiałów w warunkach obciążeń statycznych, cyklicznych, ale także badania przemian fazowych indukowanych odkształceniem, wyznaczania naprężeń resztkowych, identyfikacji tekstury w następstwie przeróbki plastycznej i wielu innych. W zaawansowanej fazie badań tych zjawisk i procesów niezbędne stało się stworzenie narzędzia, które zapewni wizualizację pola magnetycznego i to skorelowanego w czasie ze zmianami głównie pola mechanicznego.

7.2.3. Efekt Villariego w procesie zmęczenia ferromagnetyków

Zagadnienie opisu procesu zmęczenia komplikuje się szczególnie w obszarze wysokocyklowej i nieograniczonej wytrzymałości. Zakresy te charakteryzują się często niemierzalnymi (tradycyjnymi metodami) lub bardzo małymi odkształceniami plastycznymi. Na rynku pojawia się też coraz więcej materiałów konstrukcyjnych, których właściwości cykliczne są trudno mierzalne, jak np. stale spiekane. Powoduje to konieczność poznania procesów zmęczenia w zakresie odkształceń plastycznych, często rzędu 10^{-6} i mniejszych, co wymaga nowych idei i technik pomiarowych.

Sklania to z kolei badaczy do stosowania różnorodnych zjawisk fizycznych jako miar stopnia uszkodzenia materiału.

Cyklicznemu obciążaniu materiałów towarzyszą zmiany różnych właściwości fizycznych. Zmiany te charakteryzują pośrednio zarówno poziom obciążenia, jak i stopień uszkodzenia materiału. Z tego też powodu mogą być przydatne w badaniach zmęczeniowych. Znaczne nadzieje wiąże się z wykorzystaniem zjawisk sprzężonych, zwanych także krzyżowymi, przez które rozumie się układ wzajemnie oddziałujących różnorodnych pól fizycznych. W ostatnich latach prowadzi się w świecie udane próby z wykorzystaniem krzyżowych efektów magnetomechanicznych towarzyszących zmęczeniu ferromagnetyków. Do tej grupy materiałów zaliczyć można większość stali konstrukcyjnych, zarówno konwencjonalnych jak i spiekanych, oraz wiele innych stopów żelaza, niklu i kobaltu.

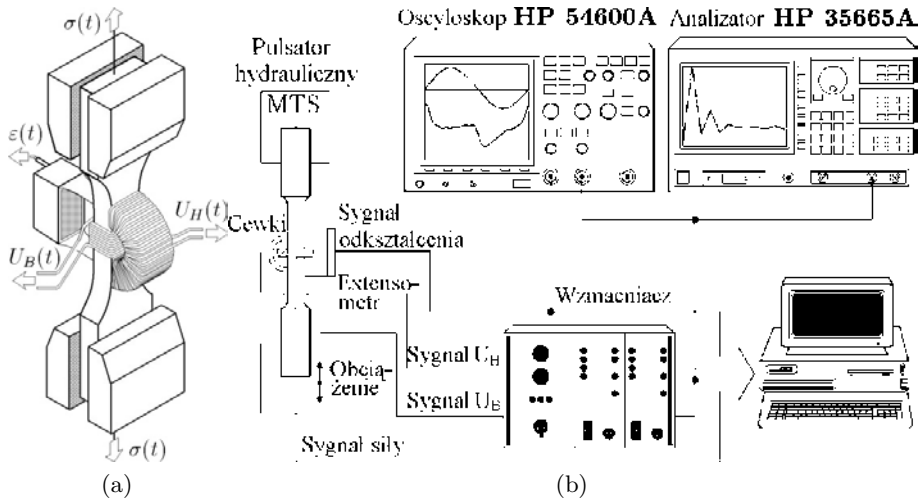
Spośród kilku znanych efektów magnetomechanicznych za szczególnie przydatne uznano zjawisko odwrotnej magnetostrykcji zwane często efektem Villariego.

Dalej zaprezentowano zestaw wybranych charakterystyk magnetomechanicznych i przeanalizowano ich podatność na proces zmęczenia. W odróżnieniu od prac podejmowanych w innych laboratoriach [19–21], jedynym wzbudzeniem, jakie zastosowano, było cykliczne obciążenie mechaniczne. Brak stymulacji zewnętrznym polem magnetycznym utrudnia co prawda pomiar (bardzo małe wartości mierzonych sygnałów magnetycznych), ale nie wpływa na proces zmęczenia i daje szansę rejestracji „czystego” efektu Villariego.

Materiał. Obiektem badań była zarówno szeroka reprezentacja stali konwencjonalnych (np. St3M, 18G2A), jak i stopowych stali spiekanych (np. KA, KB) oraz niklu. Dalej dla ilustracji zaprezentowano wyniki dla stali spiekanej KA, szczególnie trudnej pomiarowo z powodu bardzo małych odkształceń plastycznych uzyskiwanych w trakcie obciążeń zmęczeniowych.

Metodyka badań, wielkości mierzone. Próbkę płaską poddano wahadłowemu ($R = -1$), jednoosiowemu rozciąganiu, ściskaniu w szerokim zakresie żywotności. Widmo obciążenia miało charakter sinusoidalny o częstotliwości $f = 25$ Hz. Eksperyment prowadzono dla kontrolowanej amplitudy naprężenia zarówno ustalonej, jak i narastającej. Schemat pomiaru przedstawiono na rysunku 7.2. Metodykę pomiaru, konfigurację aparatury oraz oprogramowanie przedstawiono w pracach [22–26].

W trakcie eksperymentu rejestrowano sygnał naprężenia $\sigma(\phi)$ i odkształcenia $\varepsilon(\phi)$. Za pomocą cewki walcowej (nawiniętej bezpośrednio na próbce) rejestrowano z kolei wartość napięcia proporcjonalnego do pochodnej indukcji $U_B = dB/dt$. Rejestrowano również napięcie proporcjonalne do pochodnej natężenia pola magnetycznego $U_H = dH/dt$. Do tego celu służyła druga cewka w kształcie półpręścienia. Przebiegi $\sigma(\phi)$, $\varepsilon(\phi)$, $U_B(\phi)$ oraz $U_H(\phi)$ rozkładano w szereg Fouriera.



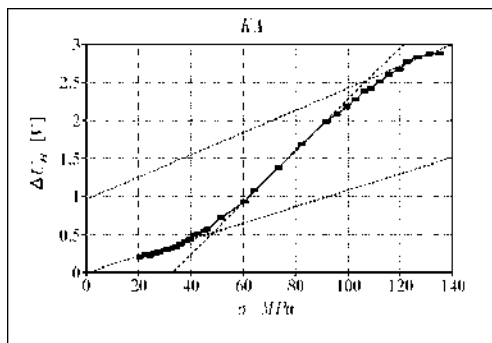
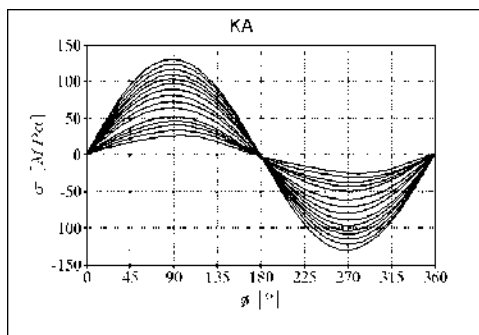
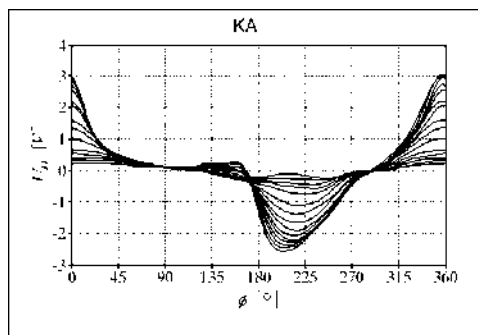
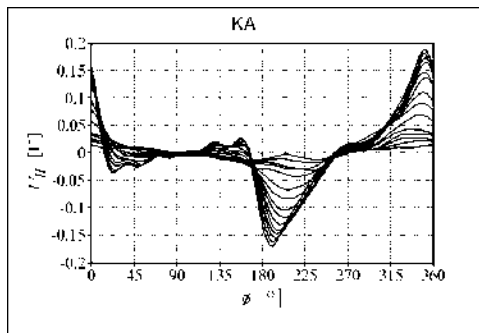
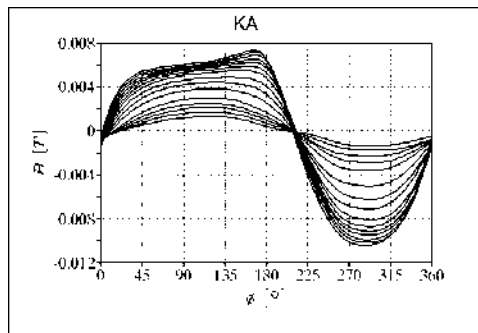
Rys. 7.2. Próbkę oraz schemat układu pomiarowego [22–29]

Sygnaly $B(\phi)$ oraz $H(\phi)$ uzyskano w wyniku całkowania i skalowania sygnałów $U_B(\phi)$ i $U_H(\phi)$. Wykorzystując składowe harmoniczne sygnałów mechanicznych i magnetycznych, analitycznie wyznaczono wartości energii mechanicznej ΔW i magnetycznej ΔM [30, 31].

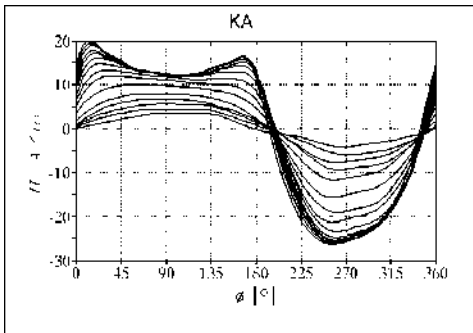
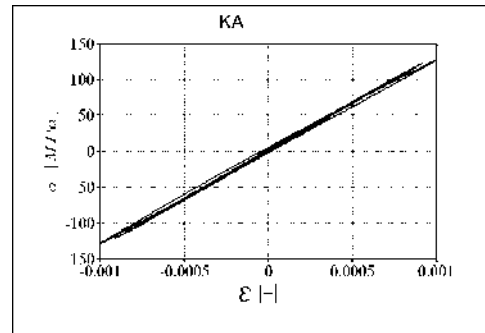
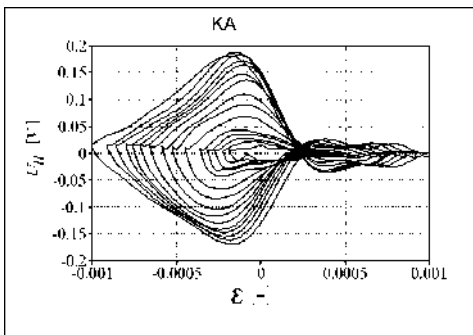
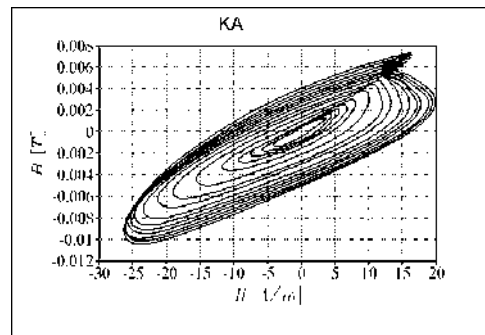
Cykliczna granica plastyczności. W trakcie badań [22, 24, 25, 27, 28, 32, 33] wyznaczono granicę zmęczenia oraz cykliczną granicę plastyczności ($Z_{rc} = 110$ MPa, $\sigma_{cpl} = 80$ MPa). Na rysunku 7.3 pokazano zależność $\Delta U_B = f(\sigma_a)$. Opisany przebieg przypomina typową krzywą, tzw. logistyczną. Zasadne jest wyróżnienie trzech przedziałów naprężenia. Pierwszy ($0 < \sigma_a < 40$ MPa, odpowiada magnetycznie sprężystemu zachowaniu się materiału. Drugi z kolei ($60 < \sigma_a < 90$ MPa) charakteryzuje silna liniowa zmienność sygnału ΔU_B w obszarze mechanicznie sprężystego zachowania się materiału. Odgięcie funkcji od stycznej zachodzi w miejscu wystąpienia cyklicznej granicy plastyczności ($\sigma_{cpl} = 80$ MPa). Trzeci przedział ($\sigma_a > 110$) wiąże się z wyraźnym zakrzywieniem funkcji, co ma związek z silnym wystąpieniem odkształceń plastycznych o wartości typowej z kolei dla granicy zmęczenia. Dla wielu ferromagnetyków, w których możliwe jest uzyskanie znacznych odkształceń plastycznych, wartość funkcji $\Delta U_B = f(\sigma_a)$ ulega w tym przedziale nasyceniu, a nawet wyraźnemu spadkowi.

Wrażliwość sygnałów magnetycznych na poziom obciążenia. Przebieg naprężenia $\sigma(\phi)$, napięcia $U_B(\phi)$, $U_H(\phi)$, indukcji magnetycznej (ϕ) oraz natężenia pola magnetycznego $H(\phi)$ przedstawiono na rysunkach 7.4–7.8.

Na rysunkach 7.9–7.11 za pomocą odpowiednio pętli mechanicznej (w układzie $\sigma-\varepsilon$), magnetomechanicznej (w układzie $U_H-\varepsilon$) oraz magnetycznej (w układzie

Rys. 7.3. Zależność $\Delta U_{B-\sigma_a}$ [22, 24, 25, 27–29, 32, 33]Rys. 7.4. Przebiegi $\sigma(\phi)$ [24, 29]Rys. 7.5. Przebiegi $U_B(\phi)$ [24, 29]Rys. 7.6. Przebiegi $U_H(\phi)$ [24, 29]Rys. 7.7. Przebiegi $B(\phi)$ [24, 29]

$B-H$) zilustrowano wpływ poziomego naprężenia. Łatwo zauważyć, że w przypadku stali spiekanej pętle histerezy mechanicznej (rys. 7.9) są praktycznie nie do zaobserwowania (pole pętli bliskie zeru). Zdecydowanie lepiej wykształcona jest pętla magnetomechaniczna oraz magnetyczna. Już przy najniższych stosowanych naprężeniach ($\sigma_a = 20$ MPa) pętle te są bardzo dobrze mierzalne. Łącznie, rysunki

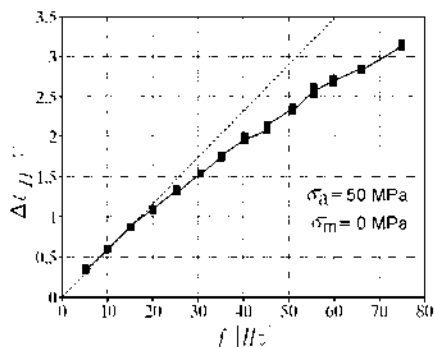
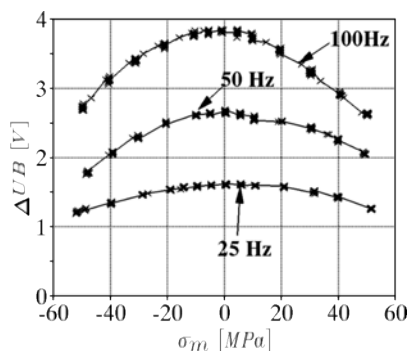
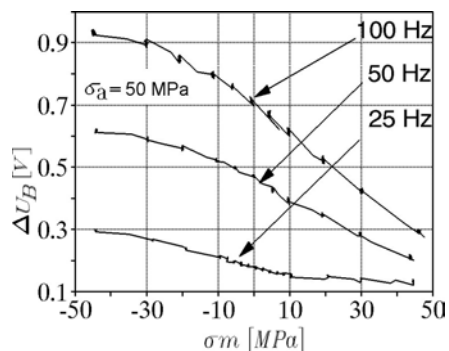
Rys. 7.8. Przebiegi $H(\phi)$ [24, 29]Rys. 7.9. Pętle σ - ε [24, 29]Rys. 7.10. Pętle U_H - ε [24, 29]Rys. 7.11. Pętle B - H [24, 29]

7.5–7.11, ilustrują dużą podatność efektu Villariego na zmiany poziomu obciążenia mechanicznego i potencjalną przydatność efektu w badaniach materiałów i konstrukcji.

Wpływ częstotliwości. Celem badań było sprawdzenie wpływu częstotliwości f obciążenia mechanicznego na efekt Villariego. Na rysunku 7.12 zaprezentowano zależność $\Delta U_H(f)$ dla niklu [15]. Funkcja ma charakter monotonicznie rosnący, początkowo liniowy, aby dla wartości $f = 18$ Hz ulec wyraźnemu zakrzywieniu.

Wpływ naprężenia średniego. Na rysunkach 7.13 i 7.14 zaprezentowano z kolei wpływ naprężenia średniego σ_m na wartość sygnału ΔU_B , odpowiednio dla niklu i stali spiekanej. Badania przeprowadzono dla trzech wartości częstotliwości ($f = 25, 50, 100$ Hz) w szerokim zakresie zmienności naprężenia średniego σ_m , natomiast dla stałej amplitudy obciążenia $\sigma_a = 50$ MPa. Zasadniczo różny charakter zależności $\Delta U_B(\sigma_m)$ dla obu materiałów wynika z istotnych różnych właściwości magnetycznych niklu i żelaza.

„Rozseparowania” rdzenia i naskórka. Sygnały magnetyczne zawierają informację o procesie zmęczenia zachodzącym zarówno w tzw. rdzeniu, jak i w war-

Rys. 7.12. Zależność amplitudy U_B od częstotliwości f (nikiel) [15, 29]Rys. 7.13. Zależność amplitudy U_B od naprężenia średniego σ_m (stal spiekana) [28, 29]Rys. 7.14. Zależność amplitudy U_B od naprężenia średniego σ_m (nikiel) [15, 29]

stwie naskórkowej próbki zmęczeniowej. Analiza niezależnych sygnałów magnetycznych U_B oraz U_H ułatwia swego rodzaju rozseparowanie procesów naskórkowych i rdzeniowych. Innymi słowy, tak opanowana metodyka pomiaru umożliwia szczegółowe badanie stref powierzchniowych, decydujących o przebiegu procesu [29].

Kontrola propagacji szczeliny zmęczeniowej. Stwierdzona duża podatność natężenia pola magnetycznej H na stan warstwy powierzchniowej [23, 25] ułatwia kontrolę propagacji mikropęknięć w próbkach z karbem.

Wcześniej skrótowo pokazano możliwości zastosowania zjawiska odwrotnej magnetostrykcji w badaniach zmęczeniowych. Następujące rezultaty uznano za szczególnie ważne:

- opracowana, oryginalna metodyka pomiaru małych wielkości magnetycznych B i H umożliwiła rejestrację efektu Villariego, nawet bez stosowania stymulacji zewnętrznym polem magnetycznym lub elektrycznym [22, 25]. Możliwa jest zatem rejestracja pola magnetycznego wywołanego jedynie obciążeniem

mechanicznym. Zastosowany sposób pomiaru natężenia pola magnetycznego H jest w pełni oryginalny w badaniach zmęczeniowych,

- opanowano i udokumentowano metodę wyznaczania cyklicznej granicy plastyczności w badaniach przyspieszonych, opierając się na efekcie Villariego [22–24, 26, 32]. Parametry efektu Villariego wykazują silnie liniowy charakter w odkształceniach sprężystych, a więc tam, gdzie mechaniczna pętla histerezy redukuje się praktycznie do linii. Fakt pojawienia się odkształceń plastycznych sygnalizowany jest z kolei wyraźnym odgięciem przebiegu,
- efekt Villariego wykazuje silną zależność od amplitudy naprężenia i liczby cykli zadawanego obciążenia mechanicznego, np. [24, 26, 32],
- przydatność efektu jest szczególnie duża w przypadku ferromagnetyków wykazujących bardzo małe odkształcenia plastyczne (np. stale spiekane) [24, 26],
- wartość energii magnetycznej ΔM jest około pięć rzędów mniejsza od wartości energii mechanicznej ΔW dostarczanej do materiału (dla $\sigma_a = Z_{rc}$) [22, 26],
- efekt Villariego umożliwia założenie, iż zasadna byłaby budowa sond pomiarowych do analizy stopnia uszkodzenia zmęczeniowego w ferromagnetykach.

Badania wykazały ponadto wrażliwość efektu Villariego na geometrię próbki, jakość powierzchni, strukturę materiału itp. [32, 33]. Powoduje to, iż wykorzystane zjawisko można było uważać za czuły indykator w procesie zmęczenia. Szczegółowa charakterystyka badań statycznych i cyklicznych materiałów opisana została w dalszej części, w tym z użyciem już kamery magnetowizyjnej.

Pomiary z użyciem cewek, mimo swoich zalet, mają też istotne ograniczenia. Jednym z nich jest dość znaczna powierzchnia, z której zbierany jest sygnał oraz konieczność przetwarzania sygnału (zazwyczaj całkowania). Procesy uszkodzenia czy zmian właściwości fizycznych w materiale, w następstwie np. obciążeń statycznych czy cyklicznych, zachodzą lokalnie (odkształcenia plastyczne, mikropeknięcia). Do ich badania konieczne było zatem stworzenie narzędzia z czujnikami o dużej czułości (większej w rzędach od sondy Halla), które zapewniałyby ponadto łatwe skanowanie powierzchni i tworzenie map magnetycznych. Stąd pojawił się pomysł budowy kamery magnetowizyjnej. Pewne inspiracje i skojarzenia brały się również z wiedzy o układach o podobnym charakterze, wykorzystywanych efektywnie w detekcji uszkodzeń pamięci komputerowych zarówno dyskowych, jak i taśmowych.

7.3. Prototyp systemu magnetowizyjnego do badań materiału w płaskim stanie naprężenia

Dalsze efektywne wykorzystanie zjawiska odwrotnej magnetostrykcji w badaniach zmęczeniowych uzależnione jest głównie od znalezienia funkcyjnych związków

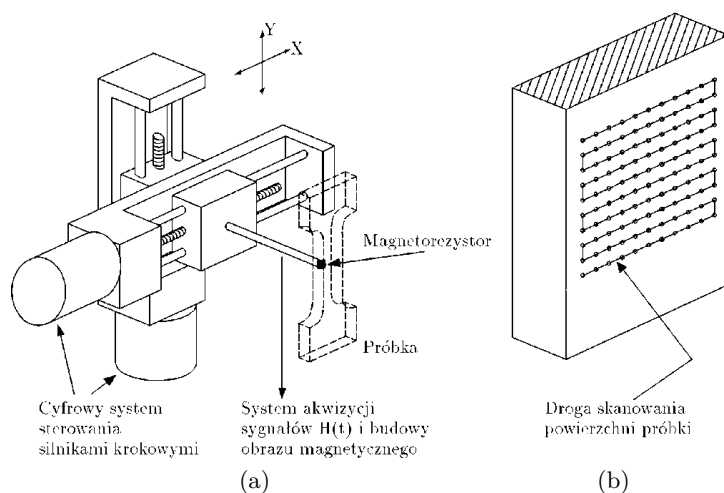
między składowymi pola mechanicznego i magnetycznego, powtarzalności pomiarów oraz możliwości lokalnego pomiaru efektu. Znaczna miniaturyzacja czujników pomiarowych (magnetorezystory) [12, 24, 34] stworzyła realną szansę budowy sondy do quasi-ciągłego, powierzchniowego pomiaru natężenia pola magnetycznego próbki. Możliwe stało się w rezultacie uzyskanie magnetowizyjnego obrazu powierzchni (mapy magnetycznej) próbki. Stwarzało to z kolei szansę detekcji nieciągłości struktury (wtrącenia, tekstura), detekcji mikropęknięć w próbkach gładkich, a także oszacowania wpływu obróbki cieplnej i powierzchniowej obróbki plastycznej.

Aby to zbadać, zdecydowano się na skonstruowanie układu umożliwiającego pomiar natężenia pola magnetycznego H wokół próbki ferromagnetycznej poddanej cyklicznemu (lub statycznemu) obciążeniu.

7.3.1. Opis aparatury pomiarowej

Układ pomiarowy składał się ze sterowanego numerycznie zespołu pozycjonującego, zespołu akwizycji sygnałów pomiarowych oraz tworzenia obrazu magnetycznego (rys. 7.15). Układ przystosowano szczególnie do analizy płaskiego stanu naprężenia.

Zespół pozycjonujący składał się z dwóch połączonych prostopadle pozycjonerów liniowych, z których każdy napędzany był śrubą pociągową połączoną z silnikiem krokowym. Uzyskano następujące parametry techniczne zespołu po-



Rys. 7.15. Schemat układu pomiarowego: a) sterowany numerycznie zespół pozycjonujący i pomiarowy, b) droga skanowania powierzchni próbki [12, 24, 34]

zycjonującego: maksymalne pole pomiaru: 100×100 mm, skok śruby: 0,8 mm, obciążenie wzdłużne jednego pozycjonera: ± 30 N, masa: 6,5 kg.

Zastosowane silniki krokowe wykonują 200 kroków na obrót, co w połączeniu ze skokiem śruby (0,8 mm) zapewniało dokładność pozycjonowania 0,004 mm. W razie potrzeby istniała możliwość zwiększenia tej dokładności do 0,002 mm lub po zmianie silników nawet do 0,001 mm. Cyfrowe sterowanie realizowane było za pomocą karty firmy Optel i komputera klasy PC.

W skład zespołu pomiarowego, w wersji pierwotnej, wchodził czujnik natężenia pola magnetycznego, którym jest magnetorezystor (lub zestaw magnetorezystorów), karta pomiarowa A/C f-my Ambex oraz komputer PC. Sposób mocowania umożliwia pomiar magnetorezystorem wartości H zarówno w kierunku osi obciążenia próbki (H_y), jak i poprzecznie (H_x). Opracowano program, który umożliwiał sterowanie zespołem pozycjonującym, wykonanie pomiaru i wstępną obróbkę danych. Numeryczny układ przetwarzania, wykorzystujący pakiet matematyczny MATLAB, zapewniał z kolei możliwość uzyskania quasi-ciągłego, magnetycznego obrazu obiektu lub jego mapy w postaci izolinii H . Algorytm sterowania, pomiarów i przetwarzania wykorzystywał fakt, że w rzeczywistych procesach, szczególnie w zakresie żywotności wysokocyklowej (i nieograniczonej), proces zmęczenia przebiega powoli w porównaniu z czasem niezbędnym do skanowania próbki, pomiaru i przetwarzania danych. Umożliwiało to utworzenie mapy natężenia pola magnetycznego, składającej się z kilku tysięcy punktów z wykorzystaniem wielu cykli obciążenia.

Pakiet ułatwia animację elementów natężenia pola magnetycznego w czasie jednego cyklu obciążenia.

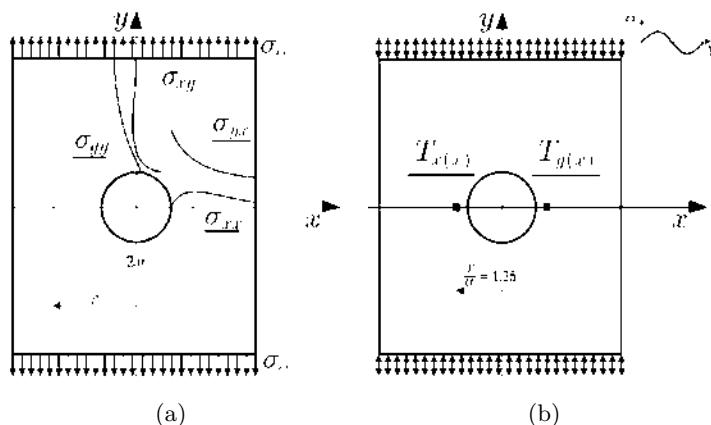
7.3.2. Techniczne możliwości identyfikacji modelu magnetostrykcji

Próby znalezienia związków między składowymi naprężenia a składowymi natężenia pola magnetycznego – zwykle w zakresie sprężystym – są ciągle aktualnym zagadnieniem podstawowym i aplikacyjnym. Znalezienie poprawnego modelu umożliwiłoby także uzyskanie pełnej odpowiedzi o stanie naprężenia obiektu na podstawie obrazu magnetycznego. Innymi słowy, obraz magnetowizyjny dałoby się interpretować w języku pola mechanicznego.

Literatura przedmiotu z tego zakresu jest obszerna. Próbę rozwiązania tego zagadnienia spotkać można na przykład w pracach Sablika [29], gdzie rozważa się relacje między obu polami. Przyjęto tam, że pojawienie się efektu magnetycznego w następstwie obciążenia mechanicznego związane jest tylko z odkształceniem postaciowym. Nie wchodząc w szczegóły, można wówczas stwierdzić, iż składowe wektora natężenia pola magnetycznego H_x , H_y , H_z , są proporcjonalne do składowych tzw. naprężenia efektywnego, czyli odpowiednio σ_{Efx} , σ_{Efy} , $\sigma_{E fz}$.

Model Sablika jest chętnie wykorzystywany w wielu pracach ze względu na możliwość założenia wprost proporcjonalności składowych wektora natężenia pola magnetycznego H od poszczególnych elementów tensora naprężenia T [29, 31]. Stworzenie technicznych możliwości identyfikacji tej klasy modeli jest zatem zagadnieniem ważnym. Dlatego zaprojektowano eksperyment, który miał wykazać przydatność kamery magnetowizyjnej do tego typu badań.

Uznano, iż w testach szczególnie przydatna jest próbka w kształcie tarczy prostokątnej z otworem kołowym w środku (rys. 7.16a), która obciążana jest wzdłuż osi y zarówno statycznie, jak i cyklicznie. W warunkach obciążenia statycznego rozpatrywany przypadek znany jest w teorii sprężystości jako zagadnienie Kirscha i ma ścisłe rozwiązanie analityczne, co jest ważnym atutem. Wykresy odpowiednich naprężeń wzdłuż osi x oraz y , po unormowaniu do wartości naprężenia nominalnego, przedstawiono również na rysunku 7.16a. Na próbce zamontowano dwa tensometry wzdłuż osi x , po obu stronach otworu, w miejscu o współrzędnych $r/a = 1,25$ (rys. 7.16b). Tensometry umożliwiały między innymi rejestrację momentu osiągnięcia lokalnie przez materiał stanu sprężysto-plastycznego.



Rys. 7.16. Próbką pomiarowa: a) geometria próbki i rozkład naprężeń wzdłuż obu osi, b) miejsce usytuowania tensometrów [15, 24, 34]

Próbkę wykonano z technicznie czystego niklu klasy NE0. Dobór materiału uwarunkowany był dużym współczynnikiem magnetostrykcji, dzięki czemu uzyskano metrologicznie wartościowe wyniki. Materiał poddano uprzednio rekrytalizacji w celu zlikwidowania tekstury. Gotowe próbki zmęczeniowe wygrzewano w temperaturze Curie, w celu zlikwidowania magnetyzmu szczątkowego wywołanego operacjami skrawania. Właściwości statyczne i cykliczne badanego materiału opisano w [15, 34].

Zasadniczą, zmęczeniową część badań przeprowadzono zarówno w obszarze wyłącznie sprężystym, jak i sprężysto-plastycznym. W tym celu próbkę poddano wahadłowemu ($R = -1$) jednoosiowemu rozciąganiu-ściskaniu. Widmo obciążenia miało charakter sinusoidalny o częstotliwości 25 Hz. Metodę pomiaru, konfigurację aparatury i oprogramowanie przedstawiono w [15, 24, 34].

W pracy założono wstępnie, iż składowe wektora H są proporcjonalne do odpowiednich dewiatorów stanu naprężenia. Przykładowo dla osi x , w prostokątnym układzie współrzędnych, przyjęto następujące zależności, a mianowicie:

$$\begin{aligned} H_{xx} &= \alpha \sigma'_{xx}, & \text{gdzie} & & \sigma'_{xx} &= (2\sigma_{xx} - \sigma_{xy})/3 \\ H_{yx} &= \alpha \sigma'_{yx}, & \text{gdzie} & & \sigma'_{yx} &= (2\sigma_{yx} - \sigma_{xx})/3 \end{aligned}$$

Podobne związki można wyrazić dla osi y (odpowiednio H_{xy} i H_{yy}). Mapę modelu dewiatora stanu naprężenia wzdłuż osi obciążenia dla próbki Kirscha zaprezentowano na rysunku 7.17a.

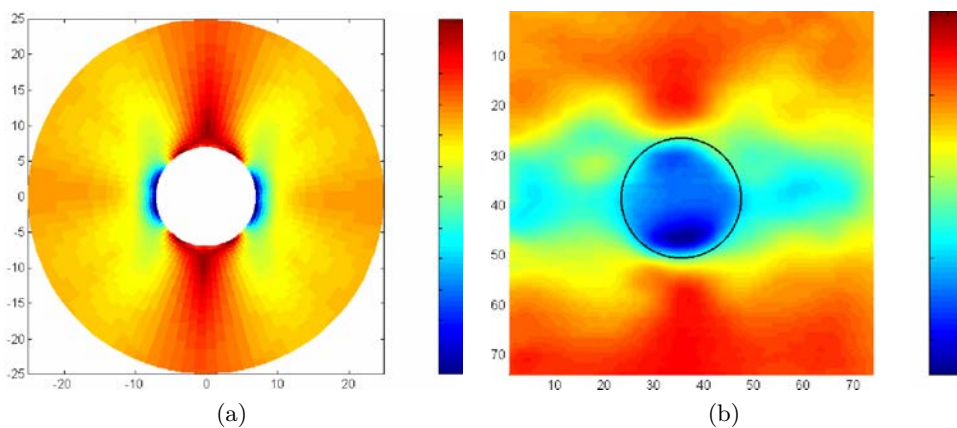
W trakcie eksperymentu pomierzono stan odkształcenia odpowiednio wzdłuż osi x oraz y , a następnie wyznaczono składowe naprężenia. Wartości porównano z wynikami uzyskanymi z modelu Kirscha, uzyskując zadowalającą zgodność. W punktach usytuowania tensometrów, ale po drugiej stronie próbki, dokonano pomiaru obu składowych natężenia pola magnetycznego.

Następnie próbkę obciążano cyklicznie, pozostając wyłącznie w obszarze sprężystym. Korzystając z zestawu magnetowizyjnego, metodą skanowania przeprowadzono pomiary obu składowych natężenia pola magnetycznego. Rejestrowano amplitudy składowych wektora natężenia. Obraz pola magnetycznego (H_y) obciążonej próbki przedstawiono na rysunku 7.17b. Należy podkreślić, że dokładność pomiaru wyniosła 0,2 A/m.

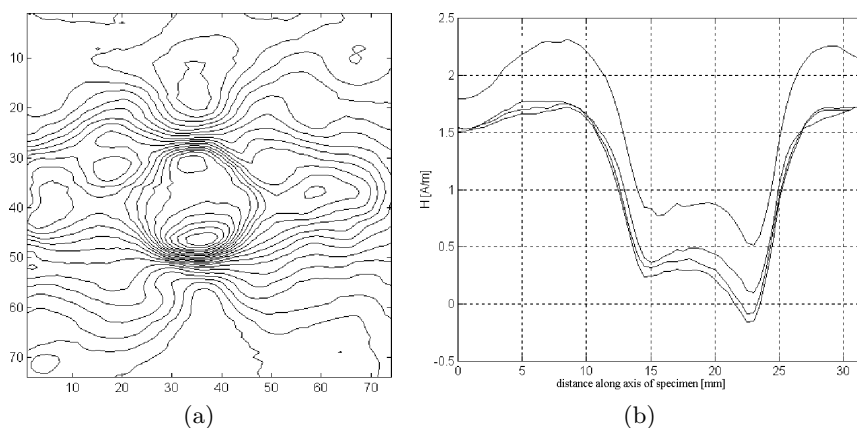
Układ pomiarowy umożliwił również uzyskanie magnetycznej mapy w postaci izolinii, co przedstawiono na rysunku 7.18a. Pakiet oprogramowania ułatwił też analizę rozkładu pola wzdłuż wybranego przekroju. Przypadek przekroju przez oś otworu zaprezentowano z kolei na rysunku 7.18b. Zaprezentowany system pomiarowy wykorzystano efektywnie również do lokalizacji miejsc lokalnie odkształconych plastycznie.

Analiza rezultatów zaprezentowanych skrótowo powyżej umożliwia sformułowanie następujących wniosków, a mianowicie:

- Skonstruowany układ udostępnił zautomatyzowany pomiar natężenia pola magnetycznego H w otoczeniu próbki ferromagnetycznej poddanej cyklicznemu (lub statycznemu) obciążeniu. Aparatura pomiarowa składała się z precyzyjnego pozycjonera X - Y sterowanego komputerowo oraz zasadniczego układu, którego głównym elementem jest magnetorezystor (lub zestaw magnetorezystorów).



Rys. 7.17. a) mapa modelu dewiatora stanu naprężenia wzdłuż osi obciążenia dla próbki Kirscha, b) obraz pola magnetycznego (H_y) obciążonej próbki [15, 24, 34]



Rys. 7.18. a) rozkład izolinii H_y odpowiednio do obrazu pola magnetycznego z rysunkiem 7.17b, b) rozkład natężenia pola H_y dla przekroju przechodzącego przez środek otworu tarczy [15, 24, 34]

- Wykazano możliwość aplikacji zjawiska odwrotnej magnetostrykcji (zwanego też efektem Villariego) w budowie aparatury. Nie stosowano zewnętrznej stymulacji polem magnetycznym.
- Układ pomiarowy przystosowano szczególnie do analizy płaskiego stanu naprężenia.
- Numeryczny układ przetwarzania zapewnia uzyskanie quasi-ciągłego, magnetycznego obrazu obiektu lub jego mapy w postaci izolinii H .

W dalszych pracach [35, 36] stworzono bibliotekę rozwiązań dla tarcz z różnymi otworami oraz dla kilku modeli związków między wektorem natężenia pola magnetycznego i tensorem naprężenia. Próba identyfikacji tych modeli wymusiła stworzenie kolejnych wersji kamery magnetowizyjnej i oprogramowania, co omówiono w jednym z kolejnych podrozdziałów.

7.4. Założenia w zakresie budowy własnych przyrządów i głowic do pomiaru pola magnetycznego

Dalsze prace na rzecz magnetowizji i jej zastosowania wymagały rozważenia wielu kwestii szczegółowych i sformułowania stosownych założeń. Dlatego dalej zaprezentowano kolejno koncepcję bezkontaktowych pomiarów pola magnetycznego pasywnym czujnikiem, rozważono zagadnienie pomiarów w zakresie słabych pól magnetycznych, w tym w szczególności z użyciem magnetorezystorów oraz omówiono zestaw własnych rozwiązań w zakresie przyrządów i głowic pomiarowych. Zagadnienia te omówiono sukcesywnie w dalszej części.

7.4.1. Idea bezkontaktowego pomiaru pola magnetycznego czujnikiem pasywnym

Na wstępie przyjęto, iż wyznaczenie dystrybucji pola magnetycznego ma dotyczyć rzeczywistych elementów, będących bądź fragmentami konstrukcji, bądź odpowiednio przygotowanych próbek, stąd nie rozważano sposobów pomiarów „mikromagnetycznych”, czyli w obrębie ani pojedynczych domen magnetycznych, ani technik pomiarowych czerpiących swe założenia z nanomagnetycznych właściwości sensorów przemagnesowywanych polem obiektów makroskopowych [37].

Założono natomiast, że natężenie pola magnetycznego wokół badanego obiektu powinno być mierzone bez kontaktu z nim. Chodzi zarówno o wyeliminowanie kontaktu galwanicznego (brak stymulacji przez przepływ prądu elektrycznego) i trwałego przymocowania czujnika do obiektu w jednym miejscu. Pomiar ma odbywać się przez przesuwanie quasi-punktowego czujnika w tak zwanej płaszczyźnie skanowania, nad obiektem, w znanych współrzędnych geometrycznych i pomiarze składowych H_x , H_y , H_z wektora pola magnetycznego, początkowo w najmniejszej możliwej odległości (ok. 0,1 mm). Wraz ze wzrostem odległości następuje bowiem utrata szczegółów w dystrybucji pola magnetycznego na skutek utraty lokalnego strumienia magnetycznego. Jednakże przez serię wykonanych sukcesywnie skanowań, zaczynając od d_{\min} , z krokiem Δd w kierunku prostopadłej osi Z , staje się możliwe zarówno określenie cech strumienia magnetycznego bezpośrednio z kształtu dystrybucji, jak i przez wykonanie operacji rotacji czy

dywergencji wektora pola magnetycznego. Graficzną interpretację opisywanej metody przedstawiono na rysunku 7.19a.

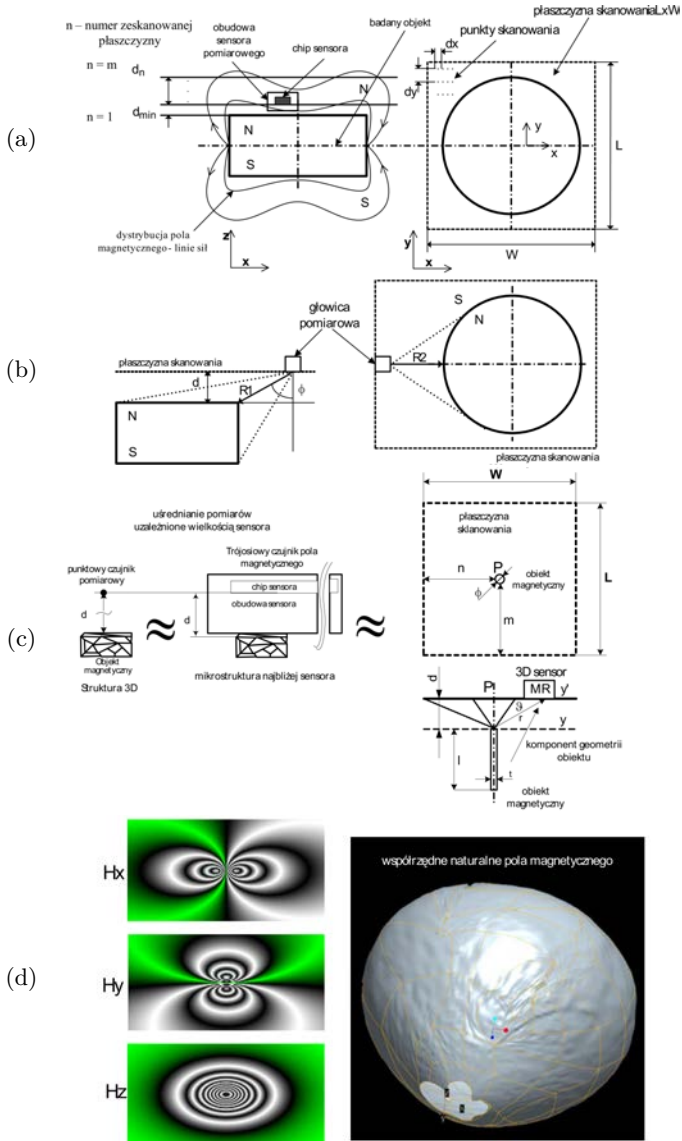
Wyniki skanowania pasywnymi czujnikami znajdującymi się w odległości d od badanego obiektu należy odpowiednio interpretować. W tej technice pomiarowej każda składowa odczytu natężenia pola magnetycznego zawiera zarówno informacje o stanie namagnesowania, jak i geometrii badanego obiektu, w której szczególną rolę odgrywają krawędzie zdolne do koncentracji tego pola. Na rysunku 7.19b przedstawiono schematycznie położenie głowicy pomiarowej w przestrzeni i określono jej pozycję za pomocą odległości R_i oraz odpowiednich kątów ϕ_i . W związku z tym pozyskana mapa dwuwymiarowa, związana z płaszczyzną skanowania i wartościami danej składowej wektora pola magnetycznego, wynika z rzutu stereograficznego badanego obiektu na płaszczyznę skanowania (rys. 7.19c). Ze względu na to bezkontaktowy pomiar trójosiowym sensorem określono jako tzw. stereosferę w przypadku pomiaru punktu magnetycznego wielkości samego sensora, albo mniejszy, co zostało przedstawione z kolei na rysunku 7.19d. Zagadnienie związane z rzutowaniem pola magnetycznego przedstawiono szerzej w [35, 38].

Należy przy tym podkreślić, iż wybór czujników pasywnych, czyli najczęściej czujników magnetorezystancyjnych i czujników Halla, zapewnia brak ingerencji w badany strumień pola magnetycznego wokół testowanego obiektu, albo – jak w przypadku magnetorezystorów z modulacją sygnału – ingerencja ta będzie pomijalna (w stosunku do częstotliwości nośnej). Można zatem przyjąć, iż dzięki zaawansowanym wysokozintegrowanym czujnikom pola magnetycznego obecnie staje się możliwe wyznaczenie składowych wektora natężenia pola magnetycznego w jednym „punkcie” w przestrzeni.

Jak wiadomo, jednostką natężenia pola magnetycznego H jest [A/m] (amper na metr), natomiast indukcji magnetycznej B jest [T] (tesla). Ze względu na wyznaczalny związek natężenia pola magnetycznego H z indukcją magnetyczną B w określonym środowisku, przyjęto stosować jako jednostkę charakteryzującą pole magnetyczne A/m w zakresie słabych pól magnetycznych, w pozostałym przypadku zaś jako jednostki stosowane są tesle. Dla ułatwienia wprowadzono przelicznik $800 \text{ A/m} = 1 \text{ mT}$ (w powietrzu).

Ze względu na cechy pola magnetycznego wyszczególniono rodzaje wykorzystywanych czujników [37, 40, 41]:

- słabe pola magnetyczne WMF (ang.: *Weak Magnetic Fields*) – $1 \mu\text{A/m}$ – 100 A/m – magnetorezystory anizotropowe (AMR),
- średnie pola magnetyczne MMF (ang.: *Medium Magnetic Fields*) – $0,5$ – 100 mT – giant magnetorezystory (ang.: *giant magnetoresistor* – GMR), elementy Halla MEMS,



Rys. 7.19. Idea bezkontaktowego pomiaru pola magnetycznego i rezultat pomiaru kalibracyjnego: a) skanowanie wielokrotne nad badanym obiektem, b) współrzędne geometryczne czujnika determinujące pomiar, c) znaczenie wielkości sensora i kształtu obiektu na identyfikację parametrów pomiarowych, d) izochromatyczne mapy dystrybucji punktowego pola magnetycznego, charakteryzujące orientację sensora względem badanego obiektu oraz wizualizacja pomiaru punktowego pola magnetycznego we współrzędnych naturalnych [37–39]

- silne pola magnetyczne (ang.: *High Magnetic Fields*) – 100 mT–2 T – elementy Halla.

Dostępność zaawansowanych cienkowarstwowych czujników pola magnetycznego oraz wprowadzenie szybkich procesorów ruchu, wyposażonych w system operacyjny czasu rzeczywistego (RTOS), umożliwiło wykonanie systemu zdolnego do wizualizacji 3D wektora pola magnetycznego. Skaner wyposażony jest w wiele dedykowanych głowic pomiarowych oraz niezbędne oprogramowanie. Wytworzono kilka rodzajów skanerów, jak i wieloelementowych głowic zdolnych do obrazowania na bieżąco pola magnetycznego [40–42].

7.4.2. Pomiary w zakresie słabych pól magnetycznych

Poznanie zjawisk magnetycznych zachodzących w materiałach pod wpływem zmiany ich właściwości mechanicznych wymaga stosowania pomiarów w zakresie słabych pól magnetycznych (ang.: *Weak Magnetic Field* – WMF). Rozwój sensorów pola magnetycznego, obserwowany w ostatnim dziesięcioleciu, niewątpliwie przyczynił się do możliwości realizacji badań materiałowych do tej pory nieosiągalnych za pomocą typowych metod magnetycznych. W pomiarach natężenia pola magnetycznego H w zakresie WMF najczęściej używanymi jednostkami są A/m (ampery na metr), wiążące przepływ prądu przez przewodnik z powstaniem pola magnetycznego. Natężenie pola magnetycznego o wartości 1 A/m jest bardzo małe i sprawia wiele trudności w pomiarach ze względu na szумы sensorów [43, 44].

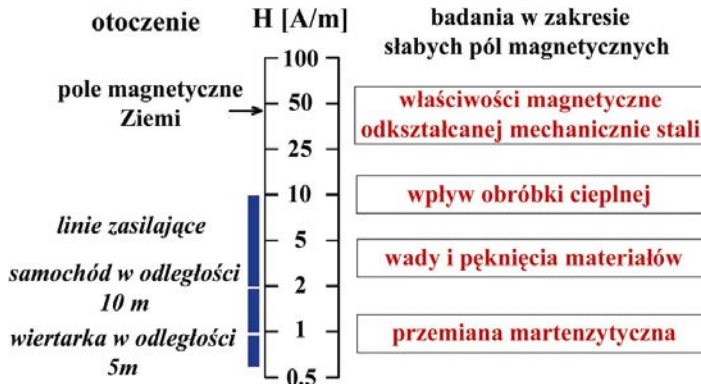
Za górną granicę zakresu słabego pola magnetycznego przyjmuje się zazwyczaj podwójną wartość ziemskiego pola magnetycznego (100 A/m), a za dolną maksymalną rozdzielczość najlepszego sensora przewidzianego do pomiaru WMF (10^{-6} A/m). Zakres słabych pól magnetycznych mieści zatem się w przedziale 10^{-6} A/m–100 A/m. Pola mniejsze niż dolna wartość WMF nazywane są magnetyzmem atomowym, wymagającym stosowania bardzo kosztownych przyrządów nazywanych bolometrami pola magnetycznego.

Na rysunku 7.20 przedstawiono górne granice pola magnetycznego, od których zaczynają się badania właściwości magnetomechanicznych materiałów, na tle utrudniających pomiaru czynników zewnętrznych.

Pomiary słabych pól magnetycznych (10^{-6} –100 A/m), wytwarzanych w wyniku odwrotnej magnetostrykcji ferromagnetyków czy pomiary pola magnetycznego Ziemi lub pól, będących rezultatem płynięcia bardzo małych prądów, wymagają stosowania specjalnych metod z bardzo czułymi detektorami magnetycznymi.

Jako najczęściej stosowane metody pomiaru pola magnetycznego możemy wyróżnić:

- metody indukcyjne:
 - z przesuwaną cewką,



Rys. 7.20. Przykłady możliwych badań w zakresie słabych pól magnetycznych [39]

- z obrotową cewką,
- z cewką wibracyjną,
- z elementem typu „fluxgate”;
- metody oparte na zmianach właściwości materiałów pod wpływem pola magnetycznego:
 - magnetostrykcyjne,
 - z elementem Halla,
 - magnetoptyczne,
 - magnetorezystancyjne;
 - gaussotrony,
 - cienkowarstwowe;
- metody wykorzystujące zjawisko nadprzewodnictwa, SQUID (ang.: *Superconducting QUantum Interference Devices*),
- metody hybrydowe łączące różne wymienione techniki pomiarowe.

Opisy wszystkich wymienionych metod znajdują się na przykład w [14].

W tabeli 7.1 zestawiono typowe parametry tych sensorów, uwzględniając zakres mierzonego pola magnetycznego i częstotliwość pracy.

Należy wyróżnić dwa typy parametrów decydujących o rodzaju sensora, który ma być użyty. Pierwszy (zakres, szerokość pasma, dokładność, rozdzielczość, liniowość, histereza wyjściowego sygnału) odnosi się bezpośrednio do parametrów pomiarowych. Drugi (geometria, tryb pracy i przechowywanie, czułość chemiczna, impedancja, moc elektryczna, cena) uwzględnia warunki otoczenia i aspekty ekonomiczne.

Na podstawie studiów literaturowych oraz wykonanych prac doświadczalnych do najbardziej dokładnych, oraz charakteryzujących się największą czułością, sposobów pomiaru słabych pól magnetycznych w rozpatrywanym obszarze zastosowań zaliczono:

Tabela 7.1. Podstawowe parametry sensorów pola magnetycznego [39]

Typ sensora	H_{\min}	H_{\max}	Czułość	Częstotliwość pracy	Koszt budowy systemu pomiaru
Cewka indukcyjna	10 $\mu\text{A}/\text{m}$	bez ogranicz.	niska	0,1 mHz – 1 MHz	wysoki dla zakresu WMF
Fluxgate	100 $\mu\text{A}/\text{m}$	1 kA/m	wysoka	0 – 100 MHz	wysoki
Element Halla	10 A/m	2 MA/m	średnia	0 – 100 MHz	średni
Gaussotron	50 A/m	5 MA/m	średnia	0 – 100 MHz	średni
Magnetorezystor	1 mA/m	10 kA/m	wysoka	0 – 100 MHz	niski
SQUID	1 $\mu\text{A}/\text{m}$	10 A/m	bardzo wysoka	0 – 100 kHz	bardzo wysoki

- metodę indukcyjną („Fluxgate”) z zastosowaniem elementu typu „Fluxset”,
- metodę dc-SQUID z sensorem hybrydowym,
- metodę z wykorzystaniem czujnika magnetorezystancyjnego.

Pozostałe metody trudno zastosować podczas badań zjawisk magnetomechanicznych, ze względu na konstrukcję detektora lub zbyt małą czułość w zakresie WMF, jak to występuje np. w przypadku sond Halla czy gaussotronów.

7.4.3. Pomiary z zastosowaniem magnetorezystorów

Jednym ze sposobów pomiaru pola magnetycznego jest wykorzystanie magnetorezystorów. Aktualnie, powszechnie stosowane są czujniki magnetorezystancyjne wytwarzane z zastosowaniem mikromechanicznych struktur krzemowych MEMS (ang.: *Micro Electro-Mechanical Systems*) lub napyłania cienkich warstw (ang.: *thin film*). Magnetorezystory w zależności od zjawisk, które wykorzystują, dzielą się na:

- AMR (ang.: *Anisotropic MagnetoResistor*),
- GMR (ang.: *Giant MagnetoResistor*),
- TMR (ang.: *Tunneling MagnetoResistor*).

Czujniki wykorzystujące zjawisko anizotropowej magnetorezystancji wymagają użycia cienkich ferromagnetycznych (permalloy) filmów o grubości warstwy 10–50 nm z magnetyczną anizotropią. Występują w nich dwa kierunki o różnych preferencjach magnetycznych, czyli tzw. trudna i łatwa oś magnetyzacji w płaszczyźnie filmu, określające energię potrzebną do zmiany stanu wewnętrznej magnetyzacji. Anizotropia polega na różnicy między zmianą rezystywności ρ_{\parallel} mierzoną przy przepływie prądu równoległe do wektora momentu magnetycznego M i rezystywności ρ_{\perp} mierzonej przy przepływie prądu prostopadle do M . Rezystywność zależna jest od kąta ϕ między wektorem prądu i momentem magnetycznym w następujący sposób:

$$\rho(\varphi) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \varphi$$

W ferromagnetycznych cienkich filmach wektor momentu magnetycznego układa się wzdłuż łatwej osi magnetyzacji (ang.: *easy axis*). Pod wpływem zewnętrznego pola o natężeniu H moment magnetyczny M obraca się o kąt γ . Jedną z metod otrzymywania cienkowarstwowych czujników jest tzw. *barber poles*, w której napyła się paski metalu o innej przewodności niż materiał bazowy. Dzięki zastosowaniu tej techniki otrzymuje się czujniki o doskonałej czułości, umożliwiające pomiary bardzo małych pól magnetycznych.

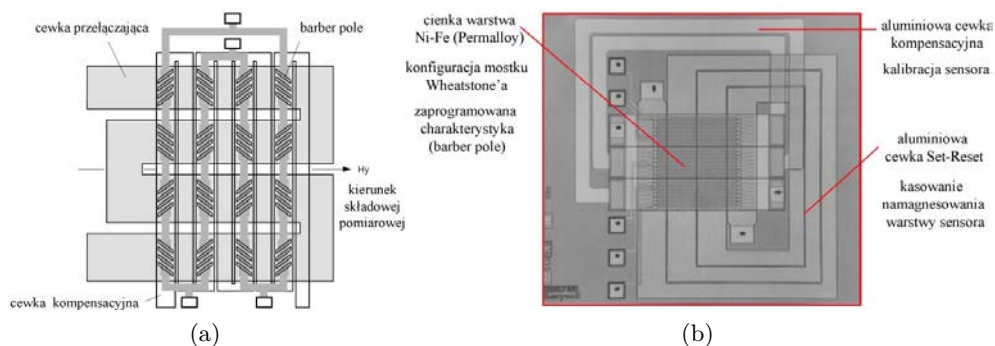
Niewątpliwym liderem w produkcji sensorów AMR są firmy NXP (dawniej: Philips Semiconductors) i Honeywell, które, opanowując technologię masowego ich wytwarzania, zrewolucjonizowały rynek czujników magnetycznych. Serie magnetorezystorów tych firm charakteryzują się, oprócz dużej czułości, także pracą w szerokim zakresie temperatury, przy małym i stabilnym offsecie i małej wrażliwości na udary mechaniczne [45, 46]. Dlatego magnetorezystory, np. AMR, nadają się do pomiarów zarówno liniowych, jak kątowych przemieszczeń w trudnych warunkach otoczenia. Często są też stosowane w mechanizmach nowoczesnych samochodów, np. w skrzyniach biegów, układach ABS czy systemach zapłonu. Są idealnym rozwiązaniem w czytnikach, w magnetycznych czujnikach zapisu (dyski twarde), gradiometrach, elektronicznych kompasach, korektorach pola ziemskiego w telewizorach CRT, monitorowaniu ruchu ulicznego, a także jako detektory biomagnetycznych pól [14, 45, 46]. Sensory te można też efektywnie stosować w badaniach efektu Villariego podczas procesów zmęczenia stali [12] czy kompozytów modyfikowanych ferromagnetykami.

Firma NXP ma w swojej ofercie kilka typów magnetorezystorów umożliwiających dokładne pomiary słabych pól magnetycznych przedstawionych w tabeli 7.2, przy czym najbardziej preferowanym podzespołem dla zakresu WMF jest KMZ51, w którym zastosowano wiele unikatowych rozwiązań. W przypadku firmy Honeywell trójosiowe sensory HMC1043 i HMC1053 służą z kolei do budowy głowic pomiarowych, przystosowanych do pomiaru większego zakresu pola magnetycznego i stanowią podstawę dla budowy nowych przyrządów. W tabeli 7.2 zestawiono najważniejsze produkty obu koncernów.

Opis magnetorezystorów przedstawiono na przykładzie typu KMZ51, pokazanego na rysunku 7.21a. Na rysunku 7.21b zaprezentowano strukturę pojedynczego sensora w układzie HMC1043, jako przykład zastosowania techniki *chip on coil*. W KMZ51 wbudowano cewkę „przerzucającą” i kompensacyjną, dzięki czemu można było wyeliminować offset i wolnozmiennie dryfty temperaturowe, zwiększając w ten sposób rozdzielczość czujnika. Odpowiednie użycie tych cewek wymagało wielu specjalnych zabiegów, co przedstawiono w opisie aparatury pomiarowej, wykorzystującej wspomniany sensor.

Tabela 7.2. Zestawienie AMR do pomiaru słabego pola magnetycznego [45, 46]

Producent	Philips			Honeywell		Jednostki
	KMZ10A	KMZ51	KMZ52	HMC1053	HMC1043	
Obudowa	SOT195	SO8	SO16	LCC16	LPCC16	
Napięcie zasilania	5	5	5	5	3	V
Ilość osi pom.	1	1	2	3	3	
Czułość	16	16	16	12	12	(mV/V)/(kA/m)
Napięcie offsetu	±1,5	±1	±1,5	±1,25	±1,25	mV/V
Temp. dryft offsetu	±6	±3	±3	±1	±1	μV/V/K
Dop. zakres pola (H_y)	±500	±200	±200	±1000	±1000	A/m
Cewka przełączająca	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	
Cewka kompensująca	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	



Rys. 7.21. Struktury magnetorezystorów: a) KMZ51, b) MC1043 [47, 48]

W strukturze sensora, oprócz elementów magnetorezystywnych *barber poles*, można wyróżnić:

- wysokoprądową cewkę „przerzucającą” ułożoną prostopadle do osi pomiaru,
- cewkę kompensacyjną wykonaną z tego samego materiału, co elementy pomiarowe, ułożoną wzdłuż tzw. *barber pole*.

Cewka „przerzucająca” służy do generacji poprzecznego pola H_x zmieniającego kierunek magnetyzacji (orientacji pomiaru) sensora, w celu wyeliminowania skutków offsetu. Zadaniem cewki kompensacyjnej jest z kolei niwelacja wpływów zmian termicznych warstwy czulej, którą stosuje się w układzie sprzężenia elektromagnetycznego, do zerowania pola magnetycznego tła.

W dalszej części pracy zostaną przedstawione, wykonane przez Laboratorium Dynamiki, przyrządy pomiarowe dedykowane do słabych pól magnetycznych, a wykorzystujące nowoczesne magnetorezystory AMR firmy Philips. Ostatecznym celem było opracowanie i wykonanie wieloelementowej głowicy pomiarowej, mogącej pomierzyć zmiany wektora natężenia pola magnetycznego H na po-

wierzchni próbki obciążanej mechanicznie, jak również stworzyć systemy skanujące przeznaczone do zadań w mechanice technicznej.

7.4.4. Rozwój przyrządów pomiarowych i głowic do pomiaru pola magnetycznego

Zastosowanie pomiarów z użyciem pasywnych czujników magnetorezystancyjnych wymagało badań kalibracyjnych. W tym celu wytworzono w Politechnice Wrocławskiej (autor opracowania: Jan Duchiewicz) przyrząd z trójosiową sondą Halla (rys. 7.22). Jest to unikatowe urządzenie, oparte na precyzyjnych hallotronach wytwarzanych jednostkowo. Charakteryzuje się dokładnymi pomiarami pola magnetycznego; błąd pomiarowy wynosi maksymalnie $\pm 0,2\%$. Dzięki zastosowaniu trójosiowej sondy, możliwe stało się określenie wszystkich składowych wektora pola magnetycznego i sprawdzenie poprawności kalibracji wykonanych samodzielnie przyrządów pomiarowych. Jednak ze względu na małą czułość i nieliniowość w zakresie słabych pól magnetycznych, a także budowę głowicy, urządzenie było wykorzystywane w pracach opisanych w rozdziale 4.

Podczas prac wytworzono kilka specjalizowanych, komputerowo wspomaganých, systemów dedykowanych aplikacjom z zakresu mechaniki eksperymentalnej i technik NDE. W wykonanych systemach pomiarowych pola magnetycznego dla zakresu WMF, przeznaczonych do badań związków magnetomechanicznych, podstawową rolę pełniły głowice pomiarowe, których elementami detekcyjnymi były magnetorezystory. Wykorzystując ten typ czujnika, można było, w stosunkowo krótkim czasie i przy rozsądnych nakładach finansowych, zbudować doskonałej klasy przyrządy pomiarowe, zarówno jedno-, dwu- i wieloelementowe. Należy podkreślić, iż opracowanie głowic pomiarowych z wykorzystaniem czujników ma-



Rys. 7.22. Precyzyjny trójosiowy hallotronowy przyrząd do pomiaru natężenia pola magnetycznego i strumienia indukcji wykonany w Politechnice Wrocławskiej

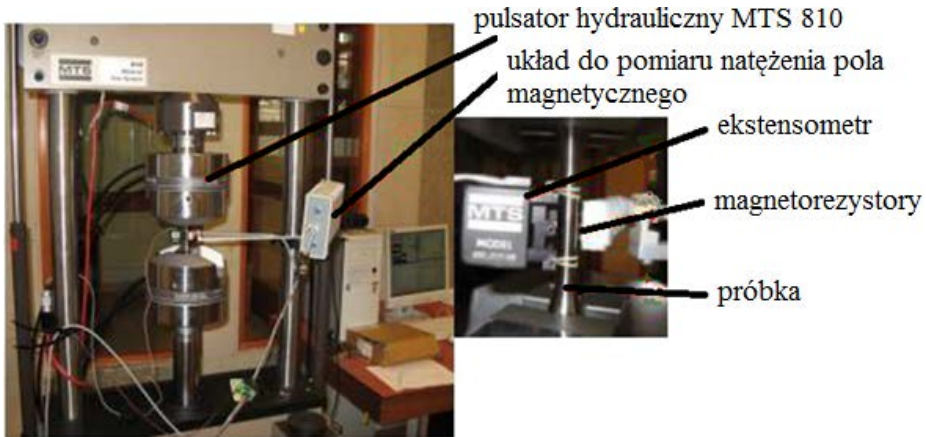
gnetorezystancyjnych wymagało gruntownego poznania typów, funkcji i budowy tych sensorów, a ze względu na to, że elementy te występują w wielu odmianach, należało dokonać ponadto wyboru właściwego podzespołu i opracowania dla niego toru wzmacniającego, w celu dokładnej rejestracji przez cyfrowy system akwizycji danych.

Wybór magnetorezystorów jako podstawowych czujników wynikał także z faktu, iż zastosowanie innych metod pomiarowych wymagałoby dużych nakładów inwestycyjnych na gotowy system (np. typu Hall-SQUID) i to każdorazowo do danego problemu. Mając to na uwadze, wykonano następujące układy pomiarowe:

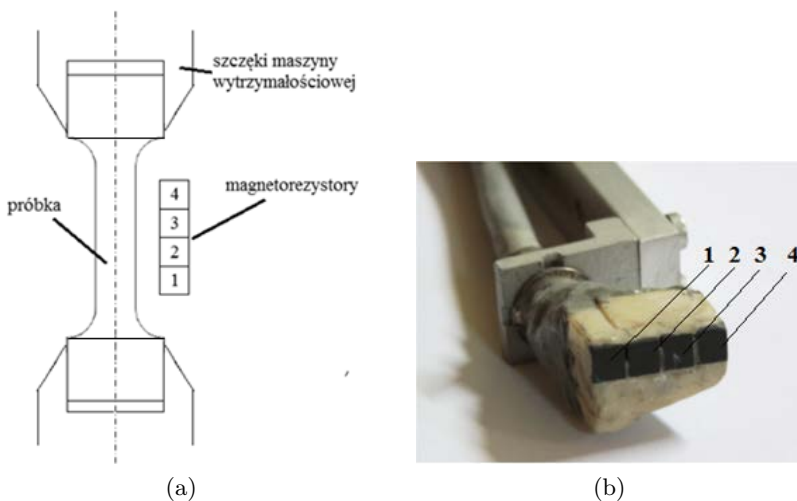
- Systemy bazujące na pojedynczych sensorach magnetorezystancyjnych lub Halla, z możliwością skanowania badanych obiektów za pomocą specjalizowanych pozycjonerów.
- Systemy oparte na wieloelementowych matrycach, zintegrowanych w ramach jednej głowicy pomiarowej przystosowanej do pracy z pozycjonerami.
- Skanery XYZ pola magnetycznego z czujnikami trójosiowymi z możliwością przystosowania do pracy także z maszynami wytrzymałościowymi. Układ napędowy głowicy pomiarowej, pod względem funkcjonalnym, oparty był na takiej samej zasadzie jak w profesjonalnych skanerach optycznych. Roboczy obszar skanowania zawierał się w przestrzeni: $410 \times 180 \times 200$ mm.
- Skanery o osiach obrotowych, przeznaczone do analizy rozkładu pola magnetycznego wokół elementów osiowo-symetrycznych – wałków i rur. W tym przypadku głównym celem była możliwość szybkich testów w aplikacjach przemysłowych. Opracowano np. algorytm testowania wałków magnetycznych i elektrostatycznych, stosowanych w regeneracji kaset z tonerem dla drukarek laserowych, jak również aplikację do kontroli jakości wałków dla przemysłu motoryzacyjnego,
- Specjalizowane zrywarki – urządzenia umożliwiające przeprowadzenie dokładnych pomiarów pola magnetycznego i wielkości mechanicznych dla materiałów w postaci folii w próbach statycznego zrywania. Rozdzielczość przesuwu belki wynosiła $0,25 \mu\text{m}$. Dzięki stosowaniu wzmacniaczy produkcji firmy HBM (klasy 0,1%) uzyskano dużą rozdzielczość pomiaru siły.

Na rysunku 7.23 przedstawiono widok stanowiska do badań efektów magneto-mechanicznych podczas procesu zmęczenia. Ze względu na małe wartości pola magnetycznego wokół próbek użyte przyrządy pomiarowe musiały charakteryzować się dużą czułością, liniowością oraz znaczną stabilnością długoczasową. W dalszych pracach konstrukcyjnych skupiono się na opracowaniu technik poprawiających jakość sygnału z tych elementów.

W urządzeniu do pomiaru natężenia pola magnetycznego w próbce obciążanej zmęczeniowo (rys. 7.23) pomiary przeprowadzano z użyciem czterech magnetore-



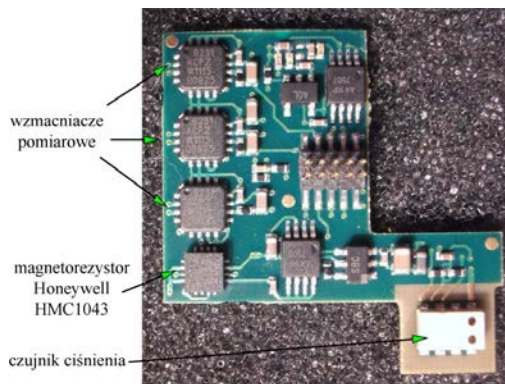
Rys. 7.23. Stanowisko pomiarowe z głowicą magnetorezystancyjną 4-elementową (KMZ10B) [49–51]



Rys. 7.24. Ułożenie magnetorezystorów względem próbki w kierunku działania siły:
 a) próbka masywna umieszczona w szczękach maszyny wytrzymałościowej wraz z rozkładem magnetorezystorów, b) budowa głowicy pomiarowej [49–51]

zystorów firmy Philips z serii KMZ 10B. Przykład ułożenia magnetorezystorów wzdłuż części walcowej próbki przedstawiono na rysunku 7.24a. Na rysunku 7.24b zamieszczono zdjęcie głowicy pomiarowej biorącej udział w eksperymencie oraz zaznaczono poszczególne czujniki.

Poprawa jakości głowic i wytwarzanie ich w różnych dedykowanych konfiguracjach stało się znaczącym zadaniem. Wraz z rozwojem i dostępnością magnetorezystorów trójosiowych, oferowanych głównie przez koncern Honeywell, wykorzystano



Rys. 7.25. Analogowy podsystem pomiarowy oparty na magnetorezystorze Honeywell HMC1043 [48]

w tym celu coraz doskonalsze podzespoły i moduły, takie np. jak przedstawiony na rysunku 7.25.

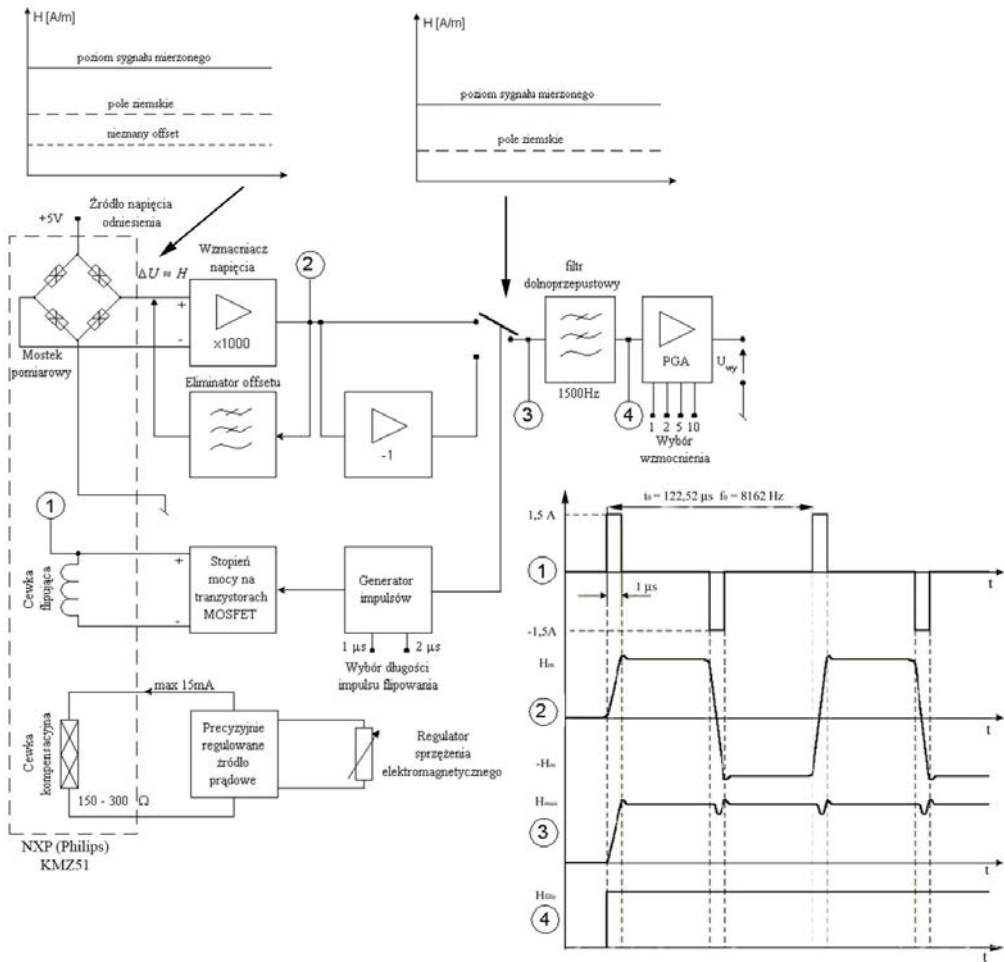
Jednopunktowe systemy pomiaru pola magnetycznego

Do pomiarów natężenia pola magnetycznego w zakresie WMF zbudowano wysokozintegrowany układ pomiarowy, wykorzystując podzespół KMZ51 (Philips). Opracowany analogowy tor pomiarowy, w którym był wspomniany sensor, znacznie odbiegał od licznych propozycji aplikacyjnych jego wytwórcy [45]. Producent bowiem nie uwzględniał zastosowania KMZ51 w badaniach efektów magnetomechanicznych.

Budowa i opis układu z modulacją. Ze względu na to, iż opracowany system elektroniczny z magnetorezystorem KMZ51 miał istotny wpływ na rozwój innych przyrządów pomiarowych, w tym magnetowizyjnych, dalej pokazano sposób obsługi tego sensora. Na rysunku 7.26 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego pola magnetycznego w zakresie WMF.

W zakresie pomiarowym sensora wynoszącym ± 200 A/m (bez wykorzystania wewnętrznej cewki kompensującej) o napięciu zasilania 5 V uzyskiwane sygnały są rzędu kilku miliwoltów. Tak małe wartości sygnału podatne są na wszelkiego rodzaju szumy wynikające z zewnętrznego pola elektromagnetycznego tła, dlatego przyrządy były wykonywane z uwzględnieniem technik redukujących wpływ czynników niepożądanych, w tym przez stosowanie ekranowania torów analogowych.

Bez elektrycznego dostrajania magnetorezystory mogą mieć dużą wartość tzw. napięcia offsetu, nawet rzędu kilkudziesięciu procent sygnału użytecznego. Dodatkowo dochodzą zmiany wskazań sensora pod wpływem temperatury [52], np. w temperaturze pracy wynoszącej 100 °C, bez zewnętrznego pola magnetycznego sensor może mieć napięcie offsetu równe polu magnetycznemu 130 A/m,



Rys. 7.26. Schemat blokowy oraz graficzne przedstawienie sygnałów i poszczególnych funkcji układu pomiarowego do rejestracji pola magnetycznego z wykorzystaniem magnetorezystora KMZ51 [39]

czyli cztery razy silniejszemu niż geomagnetyczne pole Ziemi. Po zastosowaniu magnetorezystorów jako czujników, zabieg niwelacji wpływu offsetu statycznego i termicznego ma zatem ogromne znaczenie w przypadku pomiarów słabych pól magnetycznych.

Ze względu na podane problemy zastosowano oryginalną technikę modulacji, dzięki której uzyskano system pomiarowy o możliwych do zaakceptowania parametrach. Sygnał napięciowy z sensora był modulowany impulsami przechodzącymi przez cewkę „przerzucającą” (ang.: *flip coil*). W prezentowanym układzie

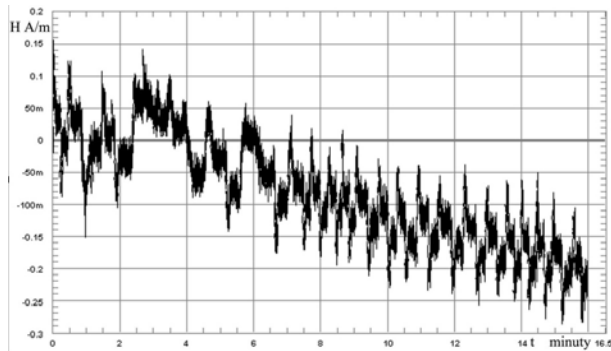
czas trwania impulsów prądowych, generujących pole magnetyczne, wynosi 1 μ s, przy natężeniu prądu dochodzącym do 1,5 A. Liczba impulsów przypadająca na sekundę (częstotliwość nośna) jest ograniczona ze względu na moc elektryczną wydzieloną na cewce, która nie może przekroczyć 50 mW. W przypadku tej głowicy pomiarowej dobrano częstotliwość impulsów $f = 8162$ Hz.

Otrzymany sygnał (rys. 7.26) ma charakter prostokątny o amplitudzie wprost proporcjonalnej do wartości zewnętrznego pola magnetycznego. Po wzmocnieniu (1000 razy) sygnał był demodulowany w następstwie zmiany znaku wzmocnienia (± 1), w zależności od kierunku przepływu prądu przez cewkę „przerzucającą”. W rezultacie otrzymywano sygnał o ustalonym poziomie amplitudy, ale z zakłóceniami cyfrowymi (ang.: *glitch*) pochodzącymi od przełączania multipleksa analogowego. Dlatego dokonano zabiegu filtracji przez dolnoprzepustowy filtr o liniowej charakterystyce typu Bessela 8. rzędu, poczynając od częstotliwości równej 1500 Hz. Następnie sygnał był dodatkowo wzmocniony (odpowiednio: 1, 2, 5, 10 razy), aż do 10 000 razy względem oryginalnego.

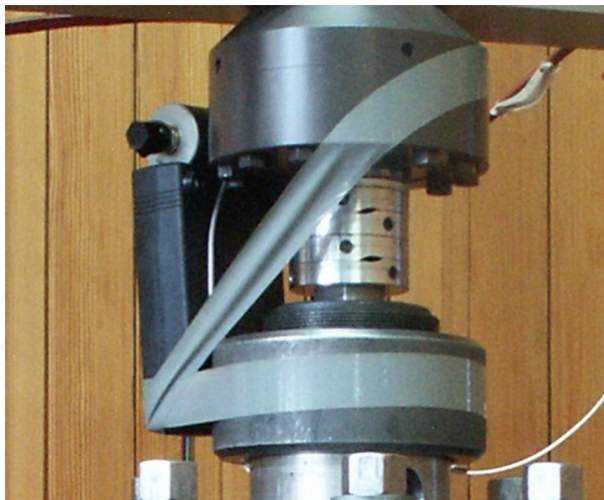
Kompensacja wpływu zewnętrznego pola magnetycznego. Znaczenie cewki kompensacyjnej w magnetorezystorze KMZ51 jest szczególnie istotne. Pierwotne przeznaczenie tej cewki, tj. zredukowanie wpływu temperaturowego dryftu czułości, rozszerzono o zerowanie pola magnetycznego tła (pole ziemskie, pole metalowych przedmiotów w pobliżu sensora itp.). Cewka ta została tak zaprojektowana, by pole magnetyczne wytwarzane przez nią miało przeciwny znak względem pola zewnętrznego, w myśl reguły

$$H_{\text{mierz.}} = H_{\text{zewn.}} - H_{\text{komp.}}$$

Dodatkowym parametrem cewki jest współczynnik wyrażony stosunkiem: pole magnetyczne/prąd; $K = 22 \frac{\text{A/m}}{\text{mA}}$. Maksymalny prąd płynący przez cewkę kompensacyjną wynosi ± 15 mA, co daje pole o wartości: $H_{\text{komp. max}} = AI_{\text{max}} = \pm 330$ A/m. Można zatem rozszerzyć zakres pomiarowy sensora do ± 530 A/m ($\pm 200 \pm 330$ A/m). Dzięki temu stają się możliwe pomiary bardzo małych zmian pola magnetycznego, w otoczeniu stałych ferromagnetycznych obiektów, których wpływ można wyzerować. Jest to istotne w badaniach próbek na maszynie wytrzymałościowej, która ma stalową konstrukcję, czy podczas procesu skanowania, eliminując na bieżąco wpływ pola tła. Warto podkreślić, iż współczynnik K posłużył do skalowania magnetorezystorów KMZ51. Zadając bardzo dokładnie kilka wartości prądu (czyli używając precyzyjnych źródeł prądowych) oraz analizując przyrosty napięcia na wyjściu czujnika, otrzymuje się współczynnik: prąd cewki kompensującej – wartość pola magnetycznego. Na rysunku 7.27 przedstawiono przebieg zmian pola magnetycznego tła po wyzerowaniu cewką kompensującą i jego stabilność w czasie na skutek zmian spowodowanych samonagrzewaniem sensora,



Rys. 7.27. Stabilność długoterminowa wykonanego przyrządu do pomiaru pola magnetycznego [39, 52]

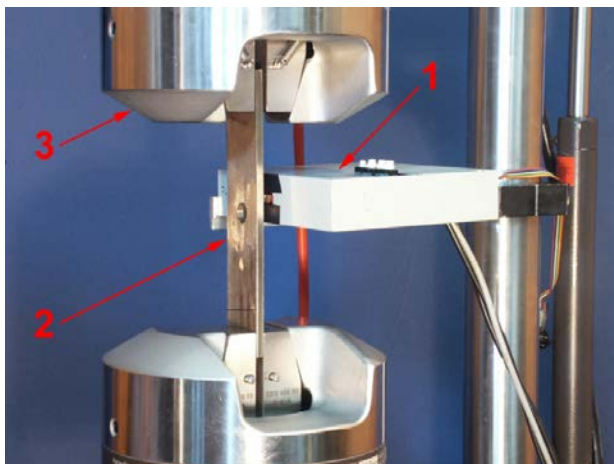


Rys. 7.28. Widok układu pomiaru pola magnetycznego zamocowanego na maszynie wytrzymałościowej w celu niwelacji długości przewodów do odbioru sygnałów z sensora [39]

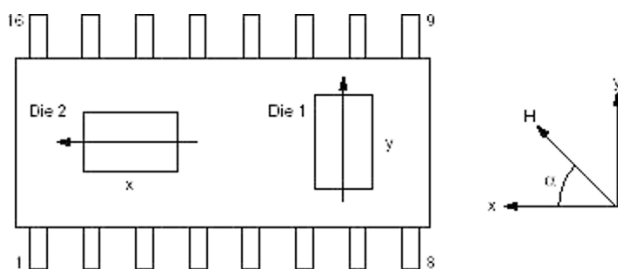
układu, a także czynników zewnętrznych. Zarówno rozdzielczość, jak i stabilność długoterminowa predestynują układ do pomiarów efektów magnetomechanicznych.

Sposób instalacji przyrządów pomiarowych pola magnetycznego przedstawiono na rysunkach 7.28 i 7.29. W skrajnie trudnych warunkach pomiarowych (duże pole „tła”) należało mocować układy możliwie blisko sensorów (rys. 7.28).

Dzięki zastosowaniu opisanej uprzednio trójosiowej sondy Halla możliwe było określenie czułości, nieliniowości i błędu wykonanej głowicy pomiarowej w zakresie słabych pól magnetycznych. Stwierdzono poprawność wyznaczonego współczyn-



Rys. 7.29. Układ pomiarowy: 1 – jednoosiowy układ pomiaru pola magnetycznego, 2 – próbka, 3 – maszyna wytrzymałościowa [18, 39, 53–55]

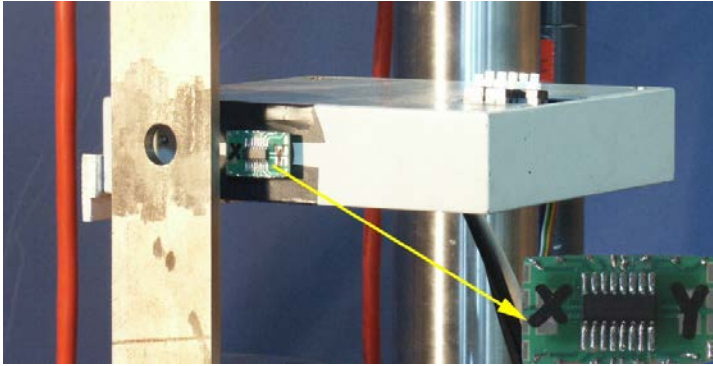


Rys. 7.30. Ułożenie matryc w czujniku KMZ52 [57]

nika (U/H) w całym zakresie WMF oraz znacznie większą liniowość i czułość (17 razy większa).

Przedstawiona głowica pomiarowa, wykorzystana podczas wielu badań [18, 39, 53–55], charakteryzuje się w zakresie słabych pól magnetycznych dużą rozdzielczością pomiaru równą $0,1 \text{ A/m}$ i błędem poniżej 1%. Jest ponadto skompensowana termicznie i zachowuje dobrą liniowość pomiaru w zakresie WMF. Głowicę, w wersji z jednym magnetorezystorem zaprezentowano na rysunku 7.29.

Innym przykładem czujnika, przydatnym w badaniach, był magnetorezystor KMZ52 wprowadzony do ograniczonej sprzedaży przez Philips Semiconductors [56]. Zawiera on w niewielkiej obudowie SO16 dwie oddzielne struktury mogące równocześnie mierzyć pole magnetyczne w kierunku X i Y . W praktyce, KMZ52 to dwa wspomniane uprzednio czujniki KMZ51, obrócone względem siebie o 90° i oddalone od siebie o $0,2''$ (rys. 7.30).



Rys. 7.31. Zdjęcie głowicy pomiarowej z magnetorezystorem KMZ52 [18, 39]

KMZ52 ma identyczne parametry pomiarowe i eksploatacyjne jak KMZ51; zawiera oddzielne cewki przełączające i kompensacyjne dla każdej ze struktur. Wykorzystuje się je też tak samo jak w przypadku KMZ51.

Na rysunku 7.31 pokazano głowicę pomiarową z magnetorezystorem KMZ52.

Warto podkreślić, iż magnetorezystor KMZ52 był pierwszym komercyjnie dostępnym wieloelementowym sensorem pola magnetycznego, dzięki czemu można było zbudować wielosensorowy system, umożliwiający pomiar powierzchniowy wektora natężenia pola magnetycznego.

7.5. Systemy magnetowizyjne

Aby umożliwić badanie zjawiska magnetostrykcji w szerokiej grupie materiałów ferromagnetycznych oraz wykorzystać to zjawisko do opracowania nieniszczących metod testowania materiałów konstrukcyjnych, wytworzono kilka typów kamer magnetowizyjnych. Niektóre przeznaczone były do badania zmian pola magnetycznego o wartościach mniejszych niż magnetyzm ziemski, inne z kolei mogły być użyte do rejestracji pola wokół silnych magnesów trwałych. Systemy umożliwiały szybkie uzyskiwanie obrazu magnetycznego różnorodnych obiektów płaskich i walcowych.

Urządzenia pomiarowe mogły być używane zarówno jako układy całkowicie autonomiczne, jak i sprzężone przez wspólne sterowanie z typową maszyną wytrzymałościową do badań statycznych i zmęczeniowych. Systemy mogły być wykorzystane do badania zjawisk magnetomechanicznych i identyfikacji ich modeli, do lokalizacji pól odkształceń, miejsc występowania deformacji plastycznych, pęknięć, niejednorodności namagnesowania, tekstury, historii obciążania obiektów, badania efektów poligrafii magnetycznej, kinetyki przemian fazowych i wielu innych. Urządzenia zostały przygotowane do komercjalizacji. Stworzono ponadto nową generację oprogramowania, dzięki któremu stała się możliwa dalsza obróbka

map rozkładu pola magnetycznego z pomiaru oraz wizualizacja w programach parametrycznych typu CAD. Duży nacisk położono na sposób prezentacji wyników i optymalizację obliczeń.

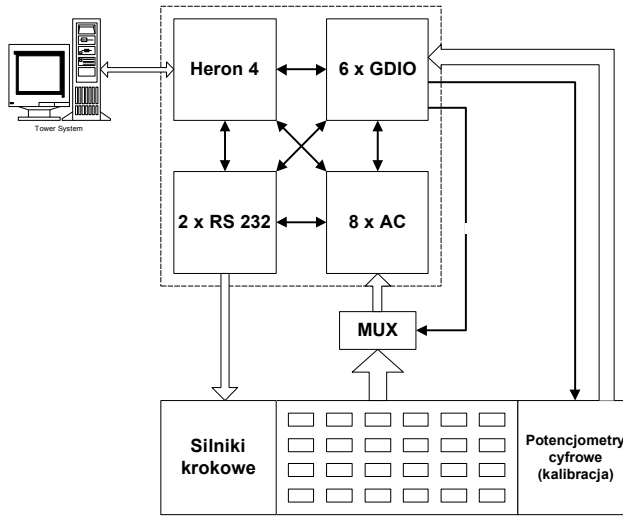
7.5.1. Struktura kamery magnetowizyjnej z użyciem systemu Hunt Engineering

Celem systemu pomiarowego było wyznaczenie wartości pola magnetycznego nad badaną próbką oraz jego wizualizacji. Opracowano wiele rozwiązań głowic pomiarowych pola magnetycznego, które, współpracując z precyzyjnymi pozycjonerami, ułatwiały uzyskanie map poszczególnych składowych pola magnetycznego. Założono, że będzie to obraz o dobrej rozdzielczości, uzależniony od zadanego kroku pozycjonera. Przyjęto też, że kolory poszczególnych punktów będą odpowiadały wartościom natężenia pola magnetycznego danej składowej wektora pola magnetycznego punktu na badanej płaszczyźnie skanowania.

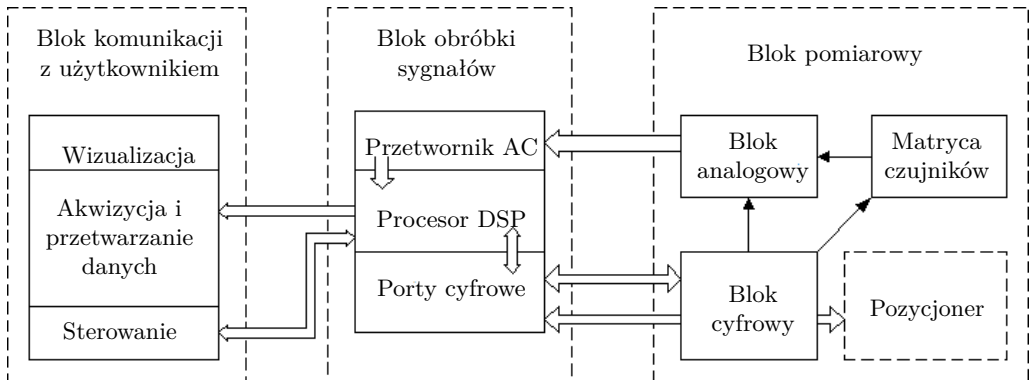
Drugą kamerą (pierwszą opisano w podrozdziale 7.3) był autonomiczny system magnetowizyjny oparty na dwuosioowych magnetorezystorach KMZ52, zdolny dostarczać obraz pola magnetycznego w czasie rzeczywistym z prędkością 360 klatek na sekundę z 48 czujników [18, 39]. Czujników magnetycznych nie można było gęsto „upakować” w postaci matrycy planarnej, tak jak na przykład w czujnikach optycznych CCD, gdzie liczba sensorów na niewielkiej powierzchni rzędu 20×20 mm może wynosić nawet kilka milionów, dlatego w głowicy pomiarowej kamery magnetowizyjnej zastosowano 48 sensorów rozmieszczonych na powierzchni 60×40 mm.

Ze względu na złożony algorytm działania systemu i duże możliwości szybkiego przetwarzania danych oraz dużą liczbę interfejsów wejścia/wyjścia zastosowano kartę z procesorem DSP. Przeniesienie części bloków obróbki danych lub sterowania na platformę PC ograniczyłoby tylko przepustowość systemu. Drugim aspektem wyboru takiego rozwiązania była możliwość przyszłego uniezależnienia karty DSP od platformy PC, a co za tym idzie, uczynienia systemu bardziej mobilnym.

W celu uzyskania obrazu o większej rozdzielczości niż 24 punkty w jednej składowej wektora natężenia pola magnetycznego, należało precyzyjnie przemieszczać głowicę pomiarową nad badanym obszarem za pomocą odpowiednio opracowanego układu pozycjonowania. Sposób realizacji systemu magnetowizyjnego przedstawiono na rysunku 7.32. Blok obróbki sygnałów stanowiła karta HERON firmy Hunt Engineering, zawierająca procesor sygnałowy DSP (Texas Instruments TMS320C6701). Karta ta zawiera również moduł 8 przetworników AC (6 z nich służy do przetwarzania sygnału pochodzącego z magnetorezystorów, pozostałe dwa przetwarzają dane pochodzące z innych czujników) oraz moduł portów cyfrowych stosowany do sterowania blokiem pomiarowym.



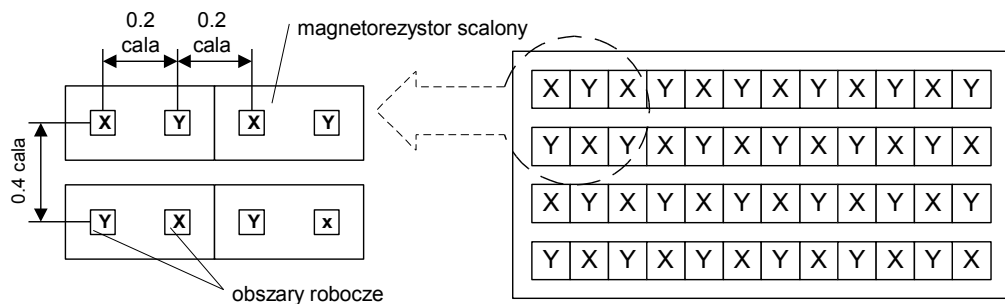
Rys. 7.32. Praktyczna realizacja wielosensorycznego systemu kamery magnetowizyjnej [18, 37, 39]



Rys. 7.33. Struktura wielosensorycznego systemu magnetowizyjnego [18, 39, 42, 58]

Blok pomiarowy składał się z matrycy 48 czujników, po 24 sensory na każdą z dwóch składowych natężenia pola magnetycznego. Zawierał również kompletne analogowe i cyfrowe układy kształtujące sygnał, redukujące szumy oraz zapewniające odpowiednią transmisję danych do bloku obróbki sygnałów. Na rysunku 7.33 przedstawiono przepływ sygnałów do poszczególnych podsystemów kamery.

Ponieważ wynikiowy obraz składać się będzie z serii obrazów małej rozdzielczości, odpowiadających rozmieszczeniu magnetorezystorów na powierzchni pomiarowej głowicy, oraz mierzony sygnał będzie zawierał niepożądane składowe, tj. szumy, offsety, częstotliwości pasożytnicze, konieczne jest zastosowanie bloku pośredniczą-



Rys. 7.34. Rozmieszczenie czujników na powierzchni matrycy [39]

cego między blokiem czujników a blokiem interfejsu użytkownika. Zadaniem tego bloku jest akwizycja i obróbka danych pomiarowych oraz złożenie ich w obraz wynikowy. Blok obróbki sygnałów składał się z modułu przetworników ADC oraz procesora DSP. Zadaniem tej części systemu pomiarowego jest przetworzenie danych pomiarowych na postać cyfrową oraz ich ostateczna obróbka. Przez pojęcie obróbki sygnału rozumie się zagadnienia związane z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów, tj. dekodowanie, filtracja cyfrowa, szybka transformata Fouriera – FFT. Ostatnim elementem takiego systemu powinien być blok komunikacji z użytkownikiem (badaczem). Jest to najczęściej blok wizualizacji lub archiwizacji danych pomiarowych.

Zastosowanie karty DSP umożliwiło:

- dużą elastyczność (wielokrotnie w trakcie realizacji projektu modyfikowano realizowany algorytm pomiarowy),
- podsystem we/wy dużej przepustowości (8 równoległe pracujących kanałów A/C, równoległe porty we/wy, obsługa portów RS),
- dużą moc obliczeniową (niezbędną do dekodowania sygnału pomiarowego).

Budowa wielosensorowej głowicy pomiarowej

Wykonana głowica pomiarowa kamery magnetowizyjnej jest bardzo zaawansowanym technologicznie urządzeniem. Zapewnienie jej niewielkich rozmiarów i małej masy pociągnęło za sobą zastosowanie najnowocześniejszych technik montażu, natomiast przyjęte wymagania pomiarowe, użycie odpowiednich podzespołów.

Matryca czujników ma kształt prostokątny i składa się z 24 scalonych czujników magnetycznych umożliwiających pomiar pola magnetycznego w osi X oraz Y , grupowanych po 6 w każdym z 4 wierszy, tak jak na rysunku 7.34. W celu redukcji szumów magnetorezystorów, są one zasilane z precyzyjnego źródła napięciowego, a także buforowane za pomocą niskoszumnego wzmacniacza operacyjnego OPA4132 firmy Burr-Brown.

Aby zmniejszyć wzajemny wpływ cewek kompensujących sensorów w wierszach parzystych, czujniki scalone są odwrócone o 180 stopni ($Y-X$, zamiast $X-Y$). Odstępy pomiędzy obszarami roboczymi czujników w osi X wynoszą 0,2 cala (5,08 mm), a w osi Y – 0,4 cala (10,16 mm). W tym właśnie obszarze ((0, 0)–(5,08, 10,16)) poruszała się głowica kamery, zapewniając pomiary pomiędzy obszarami roboczymi (rys. 7.34).

Opierając się na doświadczeniach z układem pomiarowym pola magnetycznego z jednym magnetorezystorem KMZ51 i KMZ52, w głowicy pomiarowej przekonstruowano analogowy tor pomiarowy, osiągając:

- większą rozdzielczość i dokładność mierzonego pola magnetycznego,
- kilkukrotnie mniejsze szумы,
- mniejsze dryfty,
- większą stabilność długoczasową – ważny parametr podczas długotrwałych pomiarów.

Wybrane parametry pomiarowe głowicy magnetowizyjnej pokazanej na rysunku 7.35, to odpowiednio:

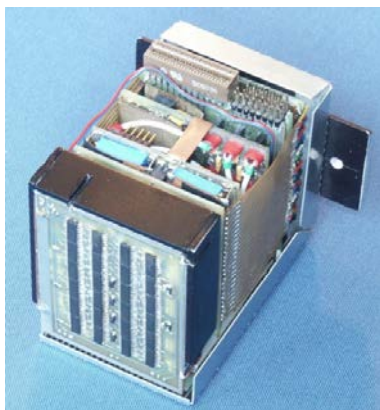
- 48 sensorów pola magnetycznego, 24 skierowane na składową X wektora pola magnetycznego i 24 na Y ,
- zakres mierzonego pola magnetycznego: ± 520 A/m,
- rozdzielczość 0,01 A/m w całym zakresie pomiarowym,
- maksymalna częstotliwość mierzonego pola magnetycznego: 8000 Hz,
- temperatura pracy -10 °C $+80$ °C.
- wymiary geometryczne: $90 \times 80 \times 100$ mm, masa 400 g.

Na rysunku 7.35 przedstawiono widok wieloczujnikowej głowicy systemu magnetowizyjnego. Matrycę pomiarową zbudowano, wykorzystując magnetorezystory KMZ52 [10] firmy Philips. Układ KMZ52 jest niedostępny w standardowej ofercie firmy Philips i tylko dzięki życzliwości jego dystrybutora było możliwe wykorzystanie tych elementów. KMZ52 ma unikatową budowę, zawiera dwie oddzielne struktury mogące równocześnie dokonywać dwuosiowego pomiaru pola magnetycznego w kierunku X i Y .

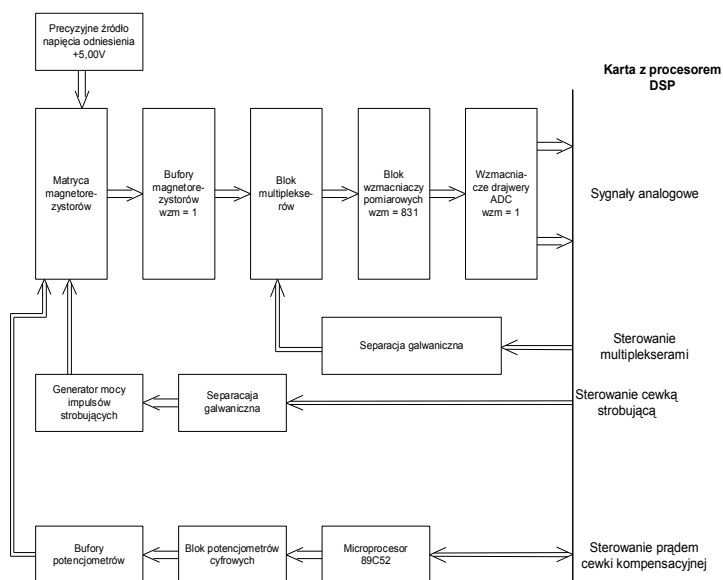
Najważniejszymi elementami składowymi głowicy są moduły (rys. 7.36):

- matrycy czujników,
- multiplekserów,
- wzmacniaczy,
- potencjometrów cyfrowych,
- mikroprocesora/złącz wyjściowych,
- stymulacji pracy magnetorezystorów (moduł „flipowania”).

Wszystkie wymienione moduły zostały wykonane w technologii SMD (montaż powierzchniowy elementów), zapewniającej im niewielkie wymiary, przy dużej



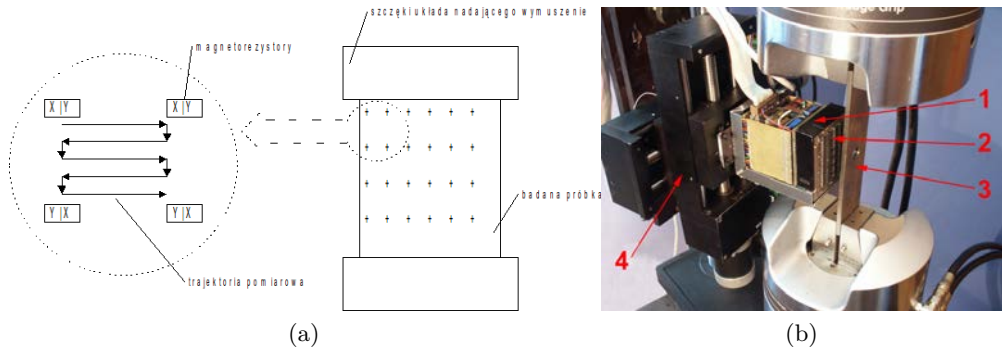
Rys. 7.35. Widok głowicy pomiarowej [18, 37, 39, 55]



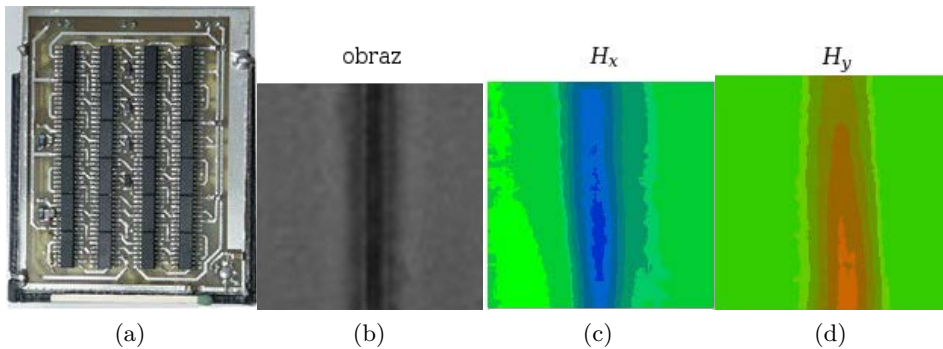
Rys. 7.36. Schemat blokowy głowicy kamery magnetowizyjnej [39]

liczbie podzespołów występujących w nich. Wszystkie moduły wielosensorowej głowicy pomiarowej mają odpowiednie złącza sprawiające, że urządzenie można łatwo modyfikować.

System umożliwił opracowanie bezinwazyjnych metod pomiarów zmęczenia oraz metod detekcji wad lub uszkodzeń samego materiału, dzięki czemu możliwe stało się zbudowanie przyrządów, które mogą znaleźć powszechne zastosowanie w przemyśle. Na rysunku 7.37 przedstawiono sposób realizacji skanowania z zastosowaniem opisywanego systemu magnetowizyjnego.



Rys. 7.37. Proces skanowania systemem magnetowizyjnym: a) trajektoria pomiarowa stosowana przy skanowaniu głowicą wielosensorową, b) widok stanowiska pomiarowego na maszynie wytrzymałościowej MTS 810: 1 – wielosensorowa głowica kamery magnetowizyjnej, 2 – sensory pola magnetycznego (48 magnetorezystorów), 3 – próbka tarczowa z otworem kołowym, 4 – pozycjoner [39, 42, 54, 58]



Rys. 7.38. Widok sensorów w głowicy pomiarowej i uzyskiwane rezultaty rozkładu pola magnetycznego [39]

Osobnym zagadnieniem, wymagającym niezależnych prac, jest dokładna kalibracja i wyskalowanie zbudowanej kamery magnetowizyjnej. W trakcie prac przeprowadzono wstępne badania, według których pomiary uzyskane z kamery odpowiadają wartościom rzeczywistym natężenia pola magnetycznego w tym sensie, że pomiary są zgodne w fazie i proporcjonalne do wartości rzeczywistych. Rezultaty pomiaru połączenia spawanego i stosowne mapy pola magnetycznego przedstawiono na rysunkach 7.38c i 7.38d.

System magnetowizyjny na bazie Hunt Engineering i wielosensorowej głowicy wykazał przydatność w pomiarach pola magnetycznego w zagadnieniach mechaniki technicznej, a także w procesach złożonego stanu odkształcenia (tłoczenie

blach), diagnostyki połączeń spawanych oraz skuteczności ekranów magnetycznych zaimpregnowanych w struktury kompozytowe.

7.5.2. Systemy skanerów pola magnetycznego o dużej rozdzielczości

Rozwój techniki magnetowizyjnej jest obarczony wieloma ograniczeniami sprawiającymi, że nie jest on tak spektakularny jak w przypadku technik termowizyjnych. Wizualizacja wielkości skalarowej, jak temperatura, nie jest również problemem dla samej czytelności rezultatów, podczas gdy prezentacja wektorowej wielkości natężenia pola magnetycznego w postaci płaskich czy przestrzennych map z uwzględnieniem geometrii badanego obiektu jest niemożliwa. Obecnie również nie ma dostępnych czujników pola magnetycznego w postaci macryc podobnych pod względem rozmieszczenia czujników do sensorów optycznych CCD.

W przypadku głowicy kamery magnetowizyjnej omówionej poprzednio dane można było wyświetlać na bieżąco, mając do dyspozycji 24 punkty pomiarowe rozmieszczone na obszarze 60×40 mm lub zastosować układ pozycjonujący w celu skanowania powierzchni. Ze względu na to, że w większości badań zjawisk magneto mechanicznych wymagana była szczegółowa dystrybucja pola magnetycznego, zaprzestano rozwoju systemów wieloczujnikowych i skoncentrowano wysiłki nad budową systemów skanujących dostępnymi trójosiowymi sensorami. Uprościło to również proces kalibracji systemu, ponieważ 48 czujników o różnej charakterystyce wymagało indywidualnej korekcji.

Obecna wersja systemu magnetowizyjnego o nazwie Magscanner-Maglab jest kompletnym narzędziem w mechanice eksperymentalnej do badań efektów magneto mechanicznych. Wprowadzono kilka dodatkowych możliwości obsługi eksperymentów zmęczeniowych na maszynie wytrzymałościowej MTS. Zastosowano dodatkową oś obrotową, która ułatwia precyzyjne skanowanie obiektów osiowo-symetrycznych, np. walcowych próbek masowych.

Prototyp systemu skanera pola magnetycznego z wykorzystaniem procesora ruchu

Założono konieczność stworzenia metody badawczej umożliwiającej uzyskanie dużej szybkości skanowania i rozdzielczości pomiaru oraz obrazu, trójosiowej diagnostyki parametrów magnetycznych (H_x , H_y , H_z), oprogramowania umożliwiającego wizualizację jakościową i ilościową pomiarów. Dążono ponadto do rozwiązania stwarzającego warunki łatwej modyfikacji skanera dla innych obiektów (np. płaskich). Kluczowe znaczenie miała również konieczność pomiaru różnych zakresów wartości natężenia pola magnetycznego, co skutkowało budową oryginalnych głowic pomiarowych.

W celu stworzenia pełnego trójwymiarowego rozkładu natężenia pola magnetycznego niezbędne stało się skanowanie badanej płaszczyzny (powierzchni) pojedynczymi czujnikami w pojedynczej płaszczyźnie odległej o zadany dystans, co zostało już przedstawione w poprzednich podrozdziałach. Ważnym problemem stała się również odległość d czujników od badanej powierzchni, która powinna być możliwie najmniejsza ze względu na utratę szczegółów w rozproszonym strumieniu magnetycznym nad obiektem.

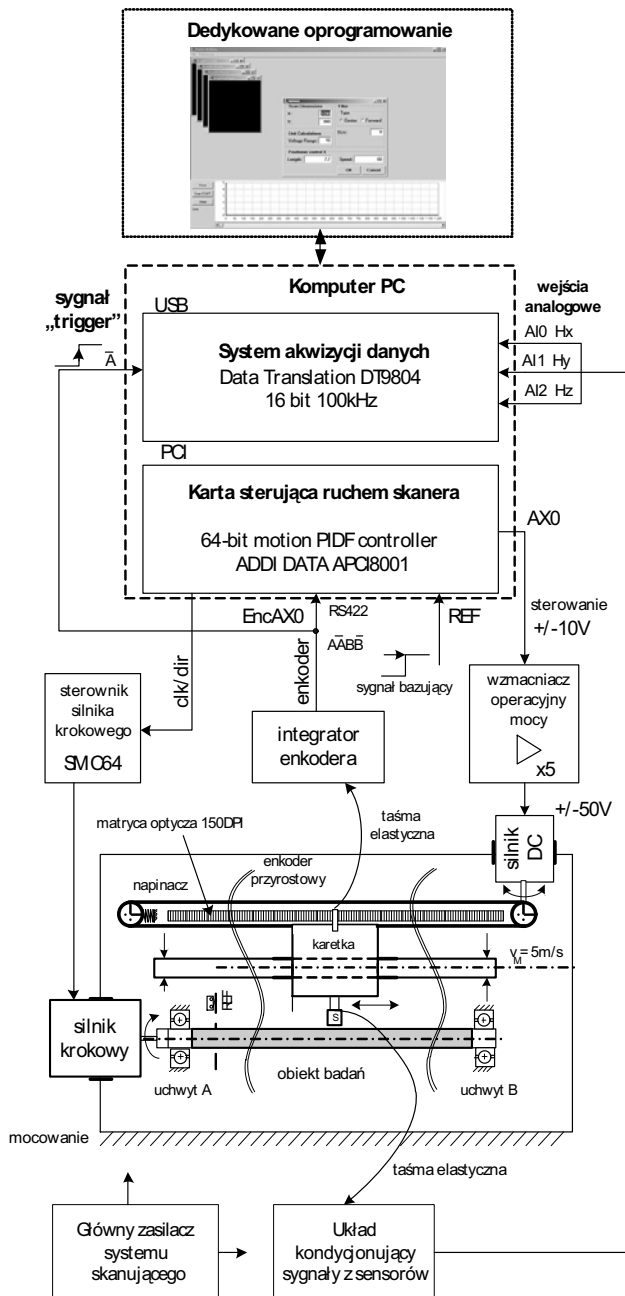
W pierwszym etapie prac opracowano sposób sterowania procesem skanowania i pozycjonowania wraz z niezbędnym systemem akwizycji. Do zadań związanych z pozycjonowaniem sensorów zastosowano zaawansowany system sterowania wykorzystujący procesor ruchu firmy ADDI-DATA APCI8001 (rys. 7.39), głównie stosowany w robotyce, np. [59]. Regulator sprzętowy PIDF zawarty w karcie APCI-8001 zapewnia sterowanie całym procesem dokładności pozycjonowania skanera, a dzięki opracowanym algorytmom interpolacji liniowej, czy kołowej ruchu poszczególnych osi skanera, umożliwia uzyskanie jego dużej szybkości skanowania o nieosiągalnej do tej pory precyzji.

Opis cyklu pomiarowego. Na rysunku 7.40 przedstawiono metodę skanowania i jednoczesnej niezbędnej modulacji czujników magnetorezystancyjnych. Akwizycja danych sprzężona jest z sygnałem z przetwornika pomiaru drogi (enkodera optycznego). Modulacja sygnału magnetycznego potrzebna do likwidacji dryftów i offsetu magnetorezystora również zależy od ruchu karetki z czujnikami. Oznacza to, że w przypadku spoczynku skanera następuje całkowity spadek mocy wydzielanej na magnetorezystorze i w ten sposób zyskuje się stabilniejszy sygnał magnetyczny.

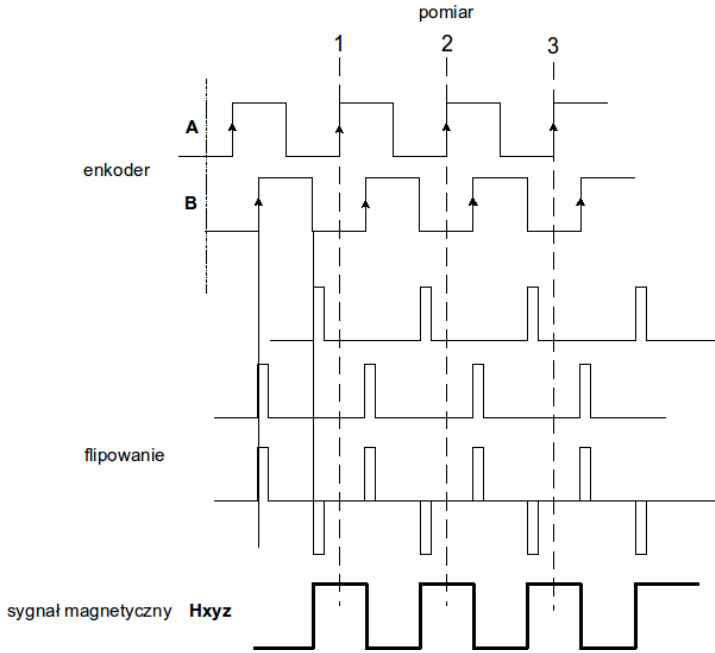
Podany system zastosowano do pomiarów przeprowadzonych na wałkach magnetycznych o wzorcowym zaprogramowanym polu magnetycznym. Wyniki zaprezentowano na rysunku 7.41, który zawiera schemat (rys. 7.41b) rozwinięcia powierzchni bocznej wałka o określonej polaryzacji magnetycznej.

Prace zaowocowały badaniami stanu namagnesowania kompozytowych prętów magnetycznych, w których szczególną uwagę poświęcono możliwości detekcji różnego rodzaju lokalnego odmagnesowania oraz wystąpienia karbów i pęknięć przez porównanie z obrazem wzorcowym dla wałka bez defektów. Całość zagadnienia została opisana w podrozdziale z aplikacjami systemu magnetowizyjnego w przypadku silnych pól magnetycznych.

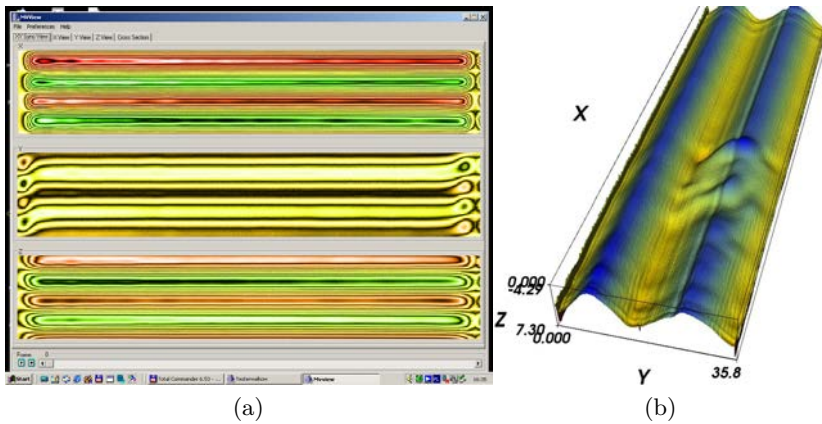
Aktualnie zwarta, modułowa i łatwo adaptowalna głowica pomiarowa ułatwia kolejnej wersji skanerów elementów osiowo-symetrycznych skanowanie w czasie zadawania programowalnych obciążeń badanego obiektów.



Rys. 7.39. Prototyp systemu skanera z procesorem ruchu Addi-Data APCI-8001 [39]



Rys. 7.40. Sposób akwizycji sygnału magnetycznego w systemie skanera z procesorem ruchu [39]

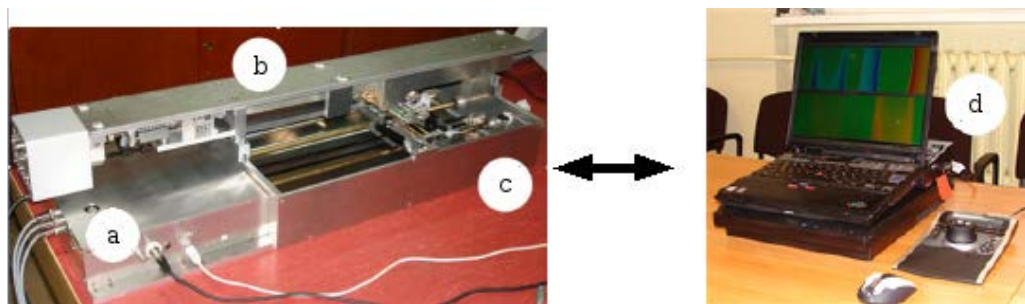


Rys. 7.41. Widok map pola magnetycznego wzorcowego wałka magnetycznego: a) płaskie mapy w programie użytkownika, b) wizualizacja przestrzenna [39, 40]

System skanera pola magnetycznego Magscanner-Maglab

Schemat systemu o nazwie Magscanner-Maglab przedstawiono na rysunku 7.42 [38, 39, 41, 60, 61]. System składał się z następujących elementów:

- mobilnego systemu sterowania i obsługi eksperymentu składającego się z przenośnego komputera ze stacją dokującą obsługującą pełnowymiarowe karty PCI,
- zaawansowanego systemu sterowania ADDI-DATA APIC8001, głównie stosowanego w robotyce sprzężonego z systemem akwizycji danych USB Data Translation DT9804,
- skanera XYZ, zaawansowanego urządzenia, które jest przystosowane do pracy także z maszynami wytrzymałościowymi MTS; roboczy obszar skanowania: $410 \times 180 \times 200$ mm,
- głowicy pomiarowej w postaci trójosiowej głowicy pomiarowej opartej na magnetorezystorach Honeywell HMC1053, możliwość zmiany czujników na hallotrony,
- osi obrotowej przeznaczonej do analizy rozkładu pola magnetycznego wokół elementów osiowo-symetrycznych – wałków i rur,
- zrywarki – urządzenia umożliwiającego przeprowadzenie dokładnych pomiarów pola magnetycznego i wielkości mechanicznych dla materiałów w postaci folii w próbach statycznego zrywania.



Rys. 7.42. Mobilny system magnetowizyjny przystosowany do złożonych zadań wyznaczania rozkładu pola magnetycznego w różnych aplikacjach oraz widok systemu Magscanner, w którym: a) część kontrolno-pomiarowa skanera XY, b) zrywarka, c) skaner XY, d) mobilne stanowisko kamery magnetowizyjnej [38, 39, 41, 60, 61]

System skanera pola magnetycznego, początkowo określany jako Magscanner, został rozbudowany o pakiet oprogramowania dedykowanego o nazwie Maglab. Ze względu na duży nacisk na coraz to nowe funkcje oprogramowania, które stopniowo stawało się najważniejszym modulem, przyjęto określać całość jako

Magscanner-Maglab. Oprogramowanie nie tylko obsługiwało proces pozyskiwania pomiarów, ale zapewniało wizualizację wyników oraz eksport wyników do systemów parametrycznych CAD i wizualizację wektora pola magnetycznego w przestrzeni 3D.

Poniżej przedstawiono dobór podzespołów na głowice w zależności od zakresów pól magnetycznych:

- Philips KMZ51 od 0,01 do 200 A/m – magnetorezystor dla zakresu WMF,
- Honeywell HMC1053 od 1 do 1000 A/m – magnetorezystory dla zakresu WMF,
- Honeywell HMC1043 od 0,1 do 1000 A/m – magnetorezystory dla zakresu WMF,
- Allegro Micro A1321 do 100 mT – elementy Halla dla zakresu HMF,
- Allegro Micro RMT34 do 2,0 T – elementy Halla dla zakresu HMF.

Zestawienie głównych parametrów akwizycji sygnałów, ich przetwarzania oraz wizualizacji wyników:

- zakres pomiaru pola magnetycznego – zależny od głowicy – do 100 mT (hallo-trony),
- prędkość skanowania do 50 000 punktów/s,
- rozdzielczość skanowania – maksimum 2160 DPI (ok. 12 μm),
- uzyskana maksymalna wielkość mapy XY pola magnetycznego 20 mln punktów (20 000 \times 1 000),
- częstotliwość próbkowania karty DT 9804 – 100 kHz, dla rozdzielczości 16-bit.

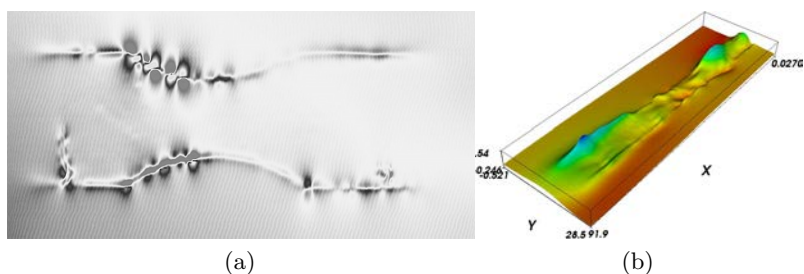
Budowa poszczególnych głowic pomiarowych jest decydująca dla osiągnięcia zadowalającej jakości pomiaru wektora natężenia pola magnetycznego. Nie ma uniwersalnej głowicy pomiarowej, która może być stosowana do pomiarów w całym zakresie pola magnetycznego. Ponadto wielkość i kształt głowicy zależy od specyfiki badanego obiektu, a także od liczby i wielkości zastosowanych czujników, również innych niż magnetyczne (np. fotodiody). Głowica do pomiaru powierzchni płaskich będzie się różnić od tej do określenia rozkładu pola magnetycznego na powierzchniach cylindrycznych. W trójosiowej głowicy trzy czujniki pola magnetycznego powinny być możliwie prostopadłe do siebie i znajdować się możliwie w jednym punkcie w przestrzeni. Na przykład zintegrowany czujnik Halla powstaje w wyniku sklejenia trzech elementów (odpowiednio dla H_x i H_y , H_z), z których każdy ma własny niezależny układ kondycjonowania sygnałów do systemu akwizycji. Dzięki małym wymiarom hallotronów (3 \times 3 \times 2 mm), udało się uzyskać quasi-punkt konieczny w przypadku cylindrycznych powierzchni. Również została opracowana specjalna głowica oparta na czujnikach magnetorezystancyjnych Honeywell HMC1053 (lub HMC1043) dla trójosiowego pomiaru wektora pola magnetycznego dla płaskiej i cylindrycznej powierzchni. Pomiaru mogą być również wykonane za pomocą głowicy z Philips KMZ51 czy KMZ52.

7.5.3. Wybrane przykłady wizualizacji pola magnetycznego przez system skanera pola magnetycznego Magscanner-Maglab

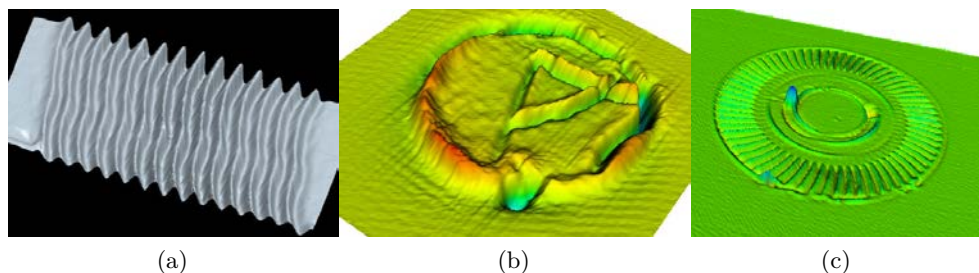
Przykłady zastosowania skanera i wcześniejszych wersji kamery magnetowizyjnej przedstawiono w pracach, np. [18, 50, 62, 63]. Na rysunku 7.43 przedstawiono wynik badania przemiany martenzytycznej na zimno w następstwie odkształcenia plastycznego stali austenitycznej (paramagnetyk) i pojawienia się minimalnych ilości martenzytu α' (ferromagnetyk).

Zastosowania systemu magnetowizyjnego związane są również z wyznaczeniem pola magnetycznego wokół obiektów poddanych zabiegowi technologicznemu, w celu sprawdzenia jego poprawności (np. cięcie, napawanie laserowe, elektrodrążenie, nanoszenie mikrowarstw, jakość poligrafii magnetycznej itp. (rys. 7.44).

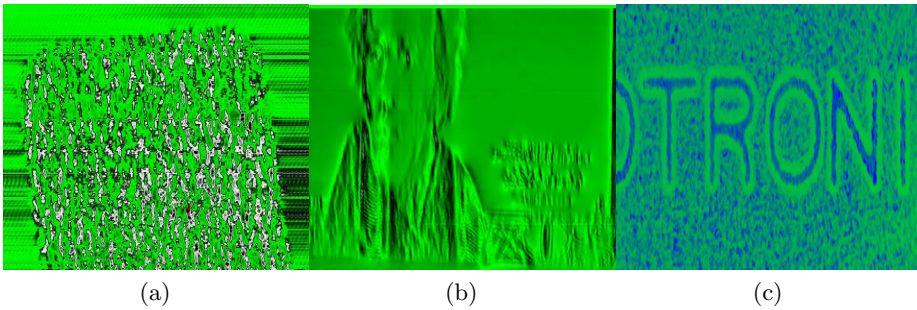
Dokonano też badań tzw. poligrafii magnetycznej z wykorzystaniem modyfikowanych farb magnetycznych z domieszką materiałów Smart (głównie Terfenolu-D), lub przez lokalne namagnesowanie blach; przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 7.45.



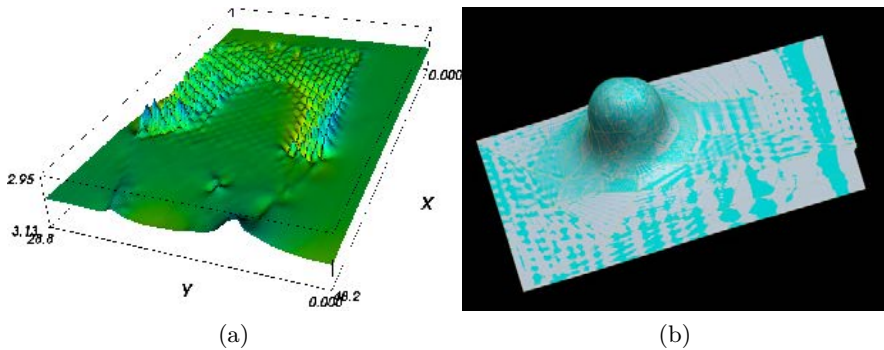
Rys. 7.43. Dystrybucja pola magnetycznego wokół: a) folii austenitycznej, b) folii poddanej rozciąganiu [43, 64]



Rys. 7.44. Przykłady wykorzystania zaburzenia strumienia pola magnetycznego do detekcji zmian na powierzchni ferromagnetyka: a) grawerowanie laserowe, b) rysa na krążku, c) nośnik danych [39, 41, 60, 61]



Rys. 7.45. Przykład poligrafii magnetycznej: a) z wykorzystaniem materiałów typu Smart (Terfenol -D), b) z użyciem farb magnetycznych, c) przez lokalne namagnesowanie stalowych blach [39, 41]



Rys. 7.46. Przykład wizualizacji pola magnetycznego: a) wynik skanowania magnetycznego 3D obiektu, b) wizualizacja we współrzędnych geometrycznych [37, 40]

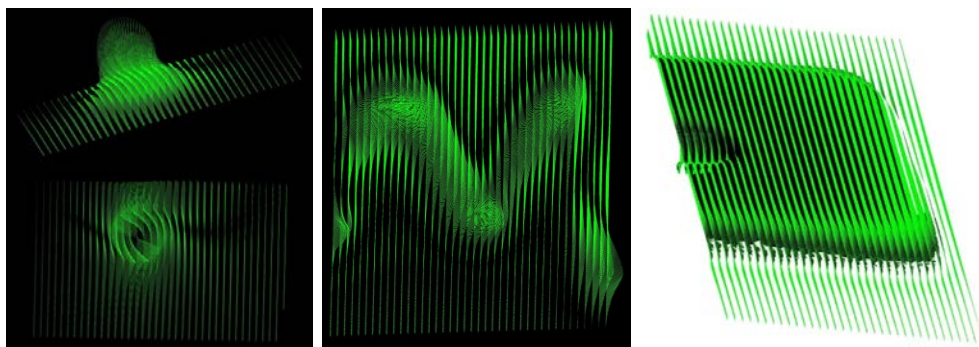
Zapewniono też interfejs do oprogramowań wizualizacyjnych z rdzeniem obliczeniowym (MATLAB, STATISTICA) oraz z interfejsem IGES do oprogramowania CAD i NURBS.

Opracowano wiele metod dedykowanych do wizualizacji pola magnetycznego z procesu skanowania systemem Magscanner-Maglab. Na szczególną uwagę zasługują:

- wizualizacja we współrzędnych magnetycznych – wynik w płaszczyźnie skanowania umieszcza się w przestrzeni H_x , H_y , H_z . Tak powstały twór stanowi unikatową wizualizację zjawisk magnetycznych. Na rysunku 7.46 przedstawiono przykładowy wynik skanowania obiektu i wizualizację pola we współrzędnych geometrycznych. Dodatkowo zaprezentowano też przykład kaustyki magnetycznej ilustrującej linie pola magnetycznego rozchodzące się z ustalonego źródła (rys. 7.47).



Rys. 7.47. Przykład kaustyki magnetycznej dla ustalonego źródła pola:
a) widok z przodu, b) widok z góry [39]



Rys. 7.48. Wizualizacje pola wektorowego utworzonego przez składowe pola magnetyczne z uwzględnieniem geometrii płaszczyzny skanowania [39]

- wizualizacja we współrzędnych geometrycznych – wartości składowych natężenia wektora pola magnetycznego H_x, H_y, H_z uzyskane na płaszczyźnie skanowania umieszczane są w przestrzeni uwarunkowanej, przez co można uzyskać wizualizację pola wektorowego przedstawioną na rysunku 7.48.

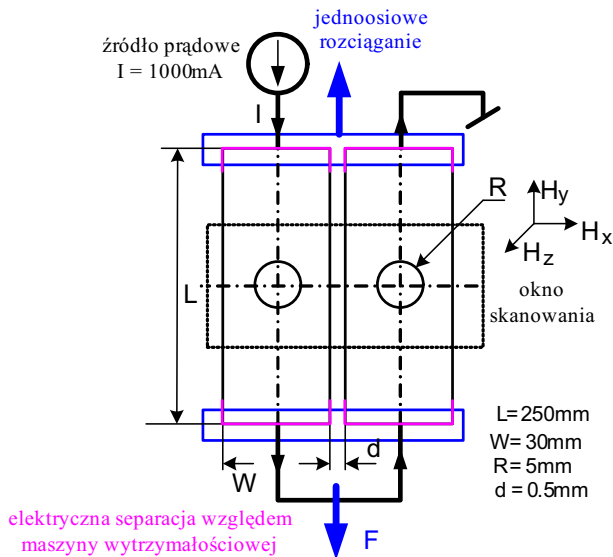
7.5.4. Kierunki rozwoju systemu Magscanner-Maglab

Oprogramowanie Maglab jest głównym składnikiem systemu skanera pola magnetycznego. Proponowane metody badania rozkładu pola magnetycznego wokół różnych obiektów opierają się na wykonaniu procesu skanowania zmodyfikowanymi, pasywnymi, czujnikami firmy Honeywell oraz na wykorzystaniu oprogramowania Maglab, które jest kompatybilne z przemysłowymi, parametrycznymi systemami CAD (np. ProEngineer Wildfire, SolidWorks) i NURBS (Rhinoceros). Technika pomiaru polega na akwizycji danych z punktów leżących na płaszczyźnie, podobnie

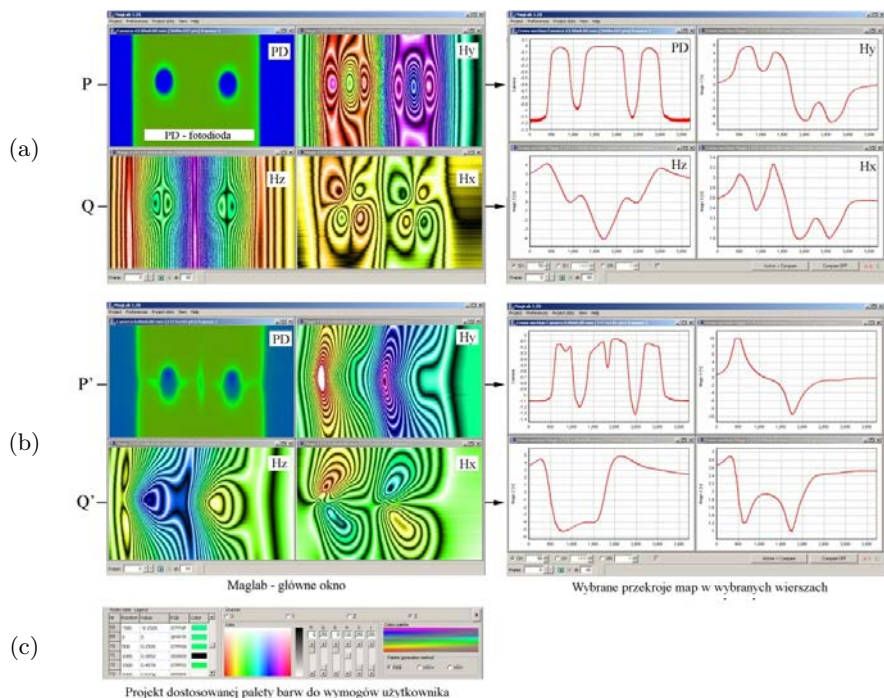
jak na przykład w tomografii. Wizualizacja 3D pola magnetycznego możliwa jest w systemach CAD dzięki zastosowaniu w oprogramowaniu interfejsu IGES.

Złożone możliwości oferowane przez system Magscanner-Maglab zostały wykorzystane w badaniach rozkładu pola magnetycznego wokół obciążanego mechanicznie paramagnetyka, przez który przepływa prąd elektryczny.

Skanowanie pola magnetycznego przeprowadzono na dwóch równoległych aluminiowych tarczach z otworami kołowymi. Płytki poddano quasi-statycznemu procesowi jednoosiowego rozciągania, aż do zerwania. Płytki były podłączone do źródła prądowego o wartości 1 A. Kierunek przepływu prądu był przeciwny w obu płytkach (rys. 7.49). Taki proces, łączący zarówno mechaniczne, magnetyczne i elektryczne zjawiska trudno opisać analitycznie. Wizualizacja rezultatów tak przeprowadzonego eksperymentu z wykorzystaniem systemów dostępnych na rynku jest bardzo trudna lub wręcz niemożliwa. Obecna wersja systemu Magscanner-Maglab jest kompletnym narzędziem do zastosowań w mechanice eksperymentalnej głównie do badań efektów magnetomechanicznych. Wprowadzono kilka dodatkowych możliwości obsługi eksperymentów zmęczeniowych na maszynie wytrzymałościowej MTS. Na rysunku 7.50 przedstawiono wyniki pomiarów opisywanego procesu wraz z funkcją generatora palety barw w oprogramowaniu Maglab oraz z przekrojami obrazującymi zmiany pola magnetycznego wzdłuż otworów.



Rys. 7.49. Schemat pomiaru dystrybucji pola magnetycznego wokół układu paramagnetycznych tarcz z otworem kołowym poddanych procesowi jednoosiowego rozciągania do momentu zerwania, przez który przepływa prąd elektryczny [37, 39]



Rys. 7.50. Widok oprogramowania Maglab w przypadku dla próbki poddanej rozciąganiu, podłączonej do źródła prądowego (rys. 7.49) [37, 39]

Zebrano główne cechy i moduły oprogramowania Maglab:

- cztery mapy dystrybucji: MagnX, MagnY, MagnZ, ukazujące (w zadanej rozdzielczości) dystrybucję trzech składowych wektora pola magnetycznego w skanowanym obszarze, a okno C (Camera) przedstawiające mapę otrzymaną z czujnika optycznego (fotodiody),
- możliwość jednoczesnej pracy na 10 różnych zbiorach przechowywanych w schowku, dzięki czemu możliwe jest ich porównanie,
- duża rozdzielczość map, w zależności od odległości czujnika od badanego obiektu,
- możliwość wyświetlania projektów „Multiframe” jako filmów magnetowizyjnych,
- wbudowany moduł do tworzenia i wybierania najlepszego spektrum kolorów do reprezentacji rozkładów (jak na rys. 7.50c),
- moduł korekcji położenia sensorów, umożliwiający korekcję map pochodzących z czujników umieszczonych w różnych punktach,
- moduł tworzenia przekrojów, w celu uzyskania przebiegów zmian wartości w uzyskanych mapach,

- moduł tworzenia pętli histerezy umożliwiający generowanie przebiegów w określonych współrzędnych i funkcji czasu,
- moduł umożliwiający eksport danych i dalszą obróbkę i wizualizację w innych zewnętrznych programach (CAD, NURBS),
- moduł do szybkiego generowania map rozkładu naprężenia, odkształcenia i energii właściwej dla zagadnienia Kirscha.

7.5.5. Zastosowanie systemu Magscanner-Maglab do identyfikacji efektu Villariego

Ze względu na możliwość wyznaczenia analitycznego modelu efektu Villariego, zagadnienie Kirscha stało się wzorcowym problemem w badaniach eksperymentalnych zjawisk o charakterze magnetomechanicznym. Proponowano również techniki obliczeniowe [15, 24, 34] zdolne do wyznaczenia rozkładów pola magnetycznego dla tarcz nie tylko z otworami kołowymi.

Taka identyfikacja ułatwia zastosowanie pola magnetycznego do opisu stanu odkształcenia materiału, a nawet pola naprężeń w konstrukcjach wykonanych z materiałów ferromagnetycznych, umożliwiając opracowanie skutecznej metody NDE. Istnieje jednak problem z dostatecznie precyzyjnym modelem uwzględniającym lokalne anomalie w bezkontaktowym pomiarze wektora natężenia pola magnetycznego związanego z występowaniem nieciągłości materiału, krawędzi próbki, tekstury czy przemagnesowania. Docelowo powinna być możliwość generowania map pola magnetycznego wokół próbki Kirscha, w zależności od przyjętego modelu magnetomechanicznego efektu Villariego, i rozkładu pola naprężeń. Model powinien też umożliwiać identyfikację stanu naprężenia czy odkształcenia na podstawie dystrybucji pola magnetycznego.

Ostatecznie za pomocą pakietu oprogramowania Maglab możliwe staje się określenie teoretycznego rozkładu dla takich przypadków, jak:

- płaski stan naprężenia,
- przestrzenny stan odkształcenia,

a także wyznaczenie:

- energii właściwej,
- tensora naprężenia – aksjatora i dewiatora.

Aplikacja Maglab może symulować proces cyklicznego obciążania próbki Kirscha w zakresie sprężystym. Za pomocą elementarnych modeli magnetomechanicznych, opisanych w [35, 36, 65], opracowano sposób uzyskiwania trójwymiarowego rozkładu pola magnetycznego dla tarcz z otworem kołowym. Ze względu na rozptylowy charakter pola magnetycznego, można wyznaczyć również dystrybucję pola magnetycznego wewnątrz otworu próbki Kirscha oraz poza jej krawędziami.

Na rysunku 7.52a przedstawiono okno w programie Maglab służące do definiowania wymiarów geometrycznych próbki, jej digitalizacji, zakresu sił obciążających. Określone wymiary próbki $W \times L$ i otwór na środku o średnicy $2R$.

Użytkownik definiuje następujące parametry:

- L – długość próbki [mm],
- W – szerokość próbki [mm],
- T – grubość próbki [mm],
- A – pole powierzchni przekroju $A = WT$ [mm²],
- R – promień otworu [mm],
- D – średnica otworu [mm].

Po podstawieniu wartości siły F otrzymujemy wynik w oknie naprężenia nominalnego. Dla próbki Kircha, o promieniu $R > 0$, na krawędzi otworu występuje naprężenie $3S_{(\sigma)}$, które nie może przekroczyć granicy sprężystości R_e podawanej w oknie przez użytkownika, czyli:

$$\sigma_{\text{nom}} = 3S < R_e$$

Wartość domyślna R_e wynosi 210 MPa (jak dla stali).

Stąd

$$F < \frac{1}{3} WTR_e \left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \text{m}^2 \right]$$

Prawidłowo podane parametry skutkują wygenerowaniem rozkładu stanu naprężenia: σ_x , σ_y , τ_{xy} , oraz aksjatora stanu naprężenia i dewiatorów we współrzędnych kartezjańskich XY :

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y) = A_\sigma$$

$$X : D_{\sigma_x} = \sigma_x - \sigma_m$$

$$Y : D_{\sigma_y} = \sigma_y - \sigma_m$$

$$Z : \tau_{xy}$$

$$C : D_{\sigma_z} = -\frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y) = -\sigma_m$$

gdzie X, Y, Z, C – oznaczenie mapy w programie Maglab, w tabeli 7.3 wypisano, jakie wielkości obliczane są przez program.

W celu wygenerowania modelowego rozkładu pola magnetycznego wokół próbki Kirscha, należy wskazać model magnetomechaniczny [35, 36, 65].

Założono, że uzyskany model dystrybucji pola będzie zgodny z ogólnym schematem przedstawionym na rysunku 7.51, gdzie przez naprężenie efektywne rozumie się szczegółowy model zależny od składowych wektora naprężeń, a z kolei α to elementarna dystrybucja pola magnetycznego w punkcie. Można też przyjąć, że α

Tabela 7.3. Wielkości stanu mechanicznego generowane dla próbki Kirscha według Maglab

1. Projekt	Naprężenia			
Mapa	X	Y	Z	C
parametr	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_m
2. Projekt	Odkształcenia			
Mapa	X	Y	Z	C
parametr	ε_x	ε_y	ε_z	γ_{xy}
3. Projekt	Dewiator naprężenia			
Mapa	X	Y	Z	C
parametr	D_{σ_x}	D_{σ_y}	τ_{xy}	$-\sigma_m$
4. Projekt	Dewiator odkształcenia			
Mapa	X	Y	Z	C
parametr	D_{ε_x}	D_{ε_y}	$\frac{1}{2}\gamma_{xy}$	D_{ε_z}
5. Projekt	Energia właściwa			
Mapa	X	Y	Z	C
parametr	$W_{\sigma}^{(o)}$	$W_{\sigma}^{(d)}$	W_{ε}	W_{σ}

$$\underbrace{H}_{\text{pole magnetyczne}} = \underbrace{\sigma_{\text{EF}}}_{\text{naprężenie efektywne}} \cdot \underbrace{\alpha_{\text{DCM}}}_{\text{elementarna dystrybucja pola magnetycznego w punkcie}}$$

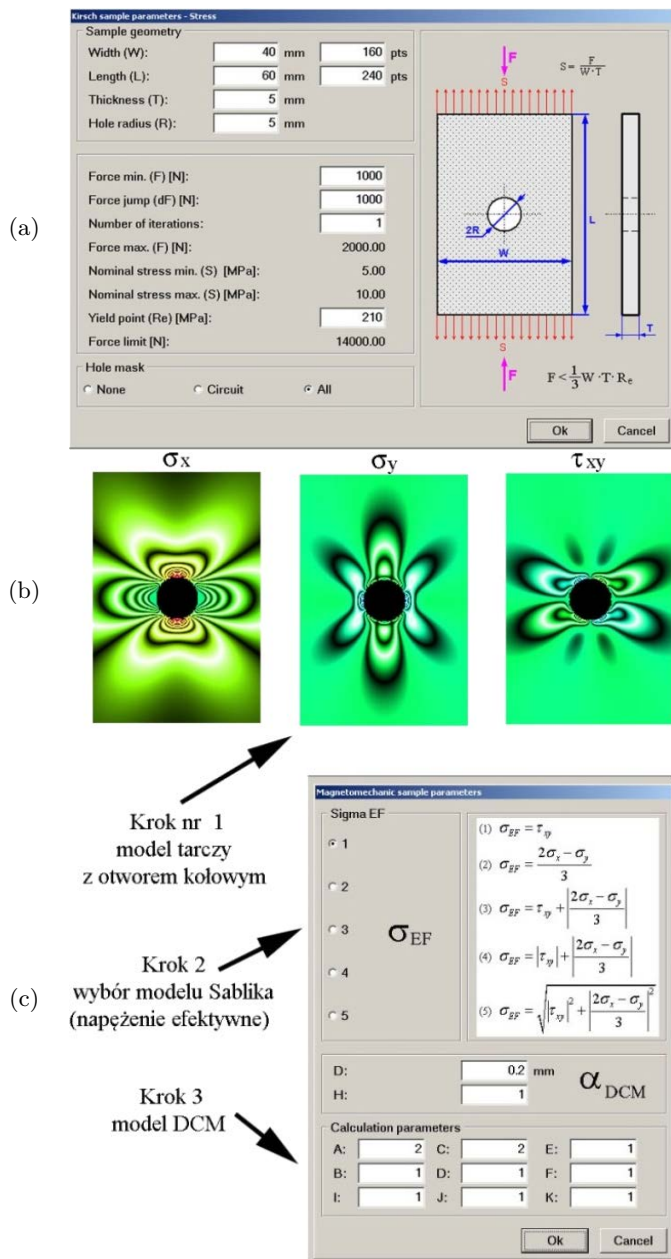
H_x, H_y, H_z

Rys. 7.51. Diagram przedstawiający główne założenia modelu wyznaczonej dystrybucji pola magnetycznego H [35, 36]

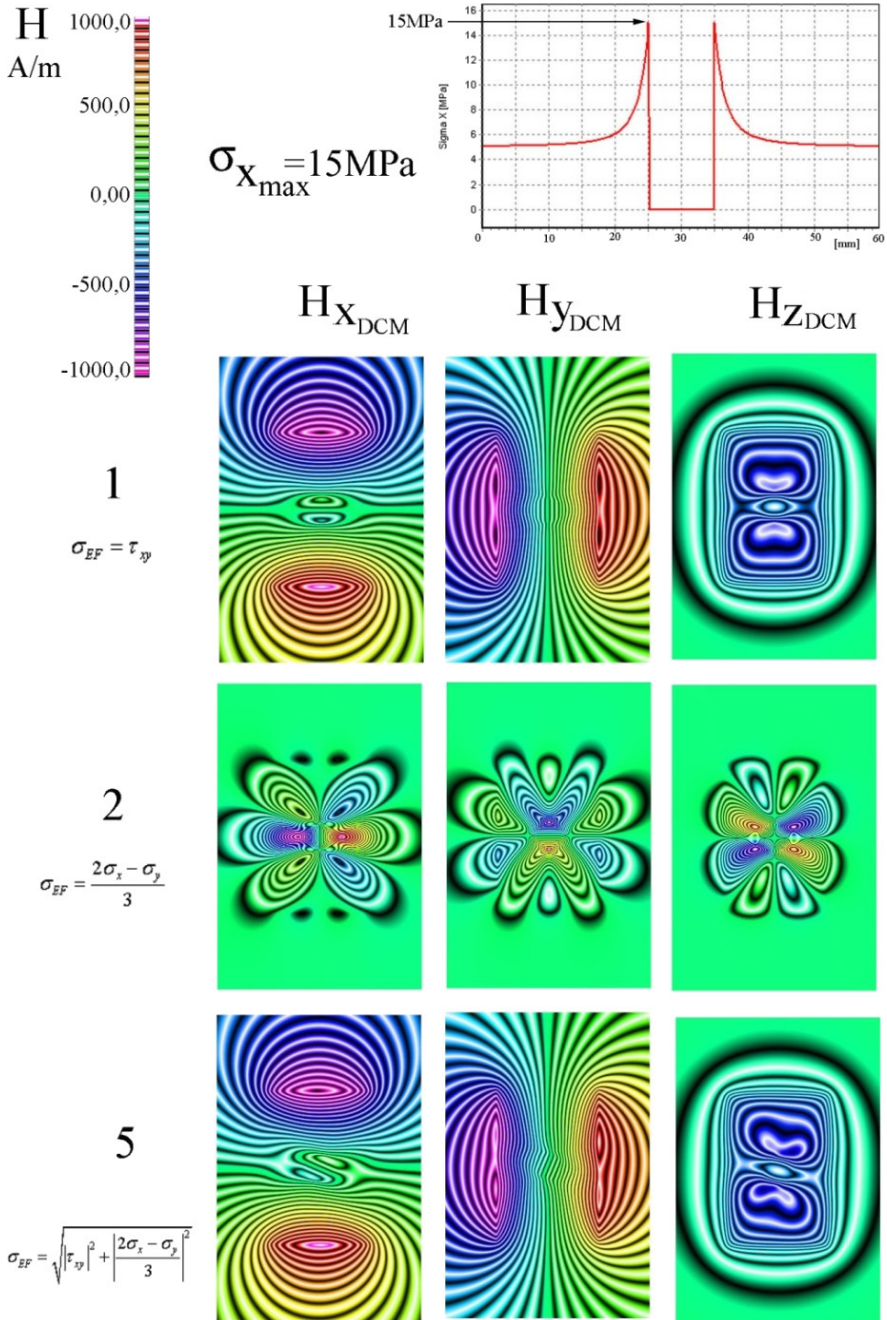
jest swoistym współczynnikiem skalowania między natężeniem pola magnetycznego i naprężeniem [35, 36].

Na rysunku 7.52b zaprezentowano mapy stanu naprężenia w palecie izochromatycznej, na rys. 7.52c zaś ukazano poszczególne kroki w budowie modelu dystrybucji pola magnetycznego dla zagadnienia Kirscha.

Z kolei na rysunku 7.53 zaprezentowano przykład wygenerowania określonych makroskopowych modeli (zaznaczonych numerami z rys. 7.52) dystrybucji pola magnetycznego wokół tarczy z otworem kołowym. Umożliwia to w rezultacie porównanie pomierzonych i wygenerowanych rozkładów pola magnetycznego, czyli identyfikację efektu Villariego dla badanej tarczy. Można założyć, iż poprawna identyfikacja efektu Villariego, dla tak znanego obiektu jak tarcza z otworem



Rys. 7.52. Zaimplementowany model DCM dla tarczy z otworem kołowym (próbka Kirscha): a) parametry geometrii próbki i obciążenia do generowania rozkładu naprężenia, b) uzyskany rozkład naprężeń, c) wybór modelu magnetomechanicznego oraz parametrów DCM [35–37, 39, 60]



Rys. 7.53. Dystrybucja pola magnetycznego wokół tarczy z otworem pod wpływem obciążenia wyznaczona w oprogramowaniu Maglab, z wykorzystaniem modeli magnetomechanicznych [35–39, 41, 60, 61]

kołowym (próbka Kirscha), umożliwia identyfikację pola odkształceń elementu konstrukcji na podstawie jego obrazu magnetycznego.

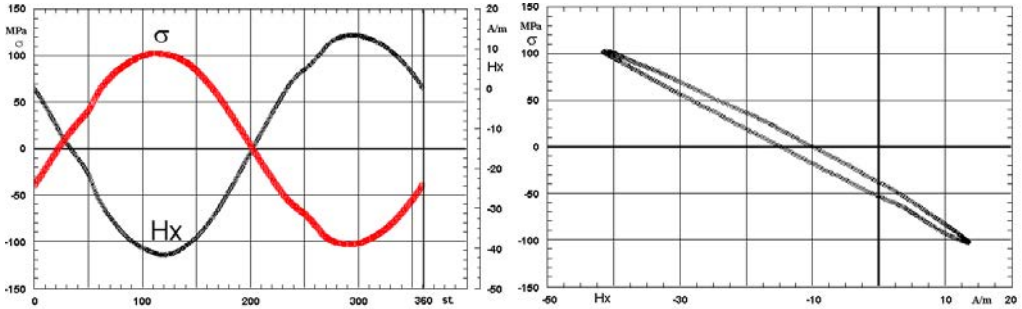
Jak przedstawiono na rysunku 7.53, każda z uzyskanych trójwymiarowych dystrybucji pola magnetycznego prezentuje odmienne cechy, szczególnie jest to widoczne w rozplywie symulowanego pola magnetycznego w obrębie otworu. Jednakże należy uwzględnić, że prezentowane wyniki dotyczą wyłącznie pola pochodzącego od efektu statycznego obciążenia mechanicznego. W modelu nie ujęto właściwości związanych z fazą pola magnetycznego względem obciążenia mechanicznego.

7.5.6. Doświadczalna weryfikacja uzyskanych modeli magnetomechanicznych

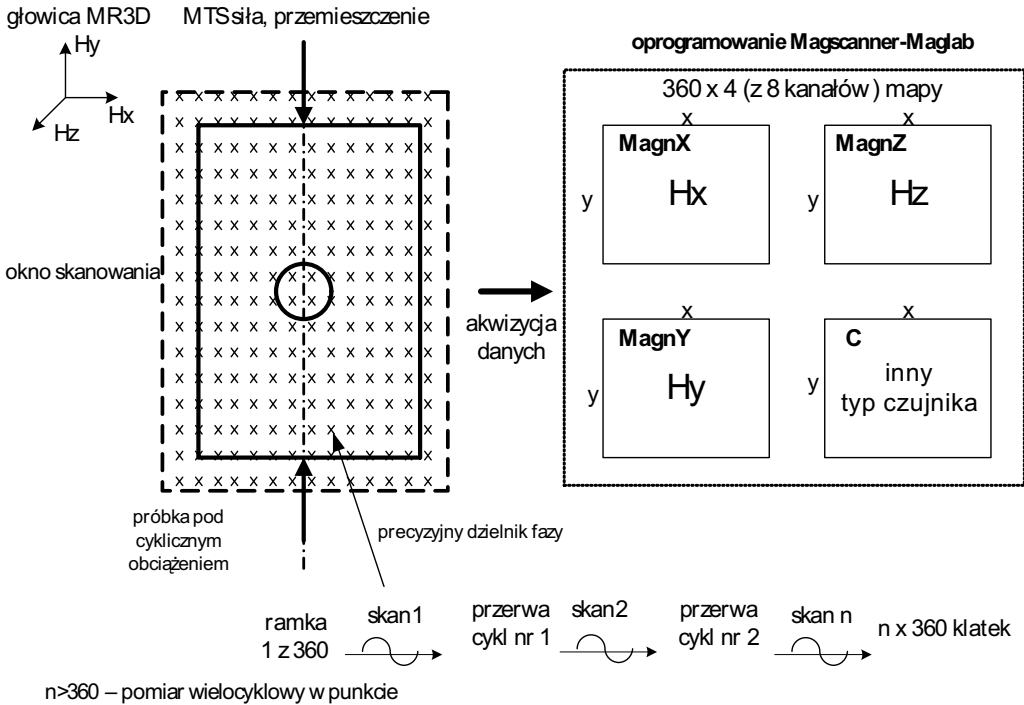
Obecnie system Magscanner-Maglab może rejestrować cykliczne zmiany pola magnetycznego wokół płaskich i cylindrycznych powierzchni w zakresie częstotliwości 0,1–200 Hz z programowaną rozdzielczością rejestracji fazy sygnałów, które są mierzone również względem sygnału synchronizacyjnego. Tak więc dla powtarzalnych warunków w procesie skanowania można otrzymywać mapy pola magnetycznego względem fazy sygnału synchronizacji. Zmienny komponent w sygnale magnetycznym jest „produktem” efektu Villariego. Pomiaru pola magnetycznego 3D dokonywano dla programowalnej liczby punktów na jeden okres sygnału mechanicznego (0–360°), co umożliwiło uzyskanie obrazu zmian pola magnetycznego w postaci „filmu” magnetowizyjnego. Dzięki rozdzielczości geometrycznej pomiarów można uzyskać mapę zawierającą ponad 10 000 punktów pomiarowych (w podziale okresu na 360 klatek). Model efektu poddano doświadczalnej weryfikacji na próbkach m.in. z żelaza Armco i niklu.

W celu określenia rozkładu pola magnetycznego względem fazy sygnału mechanicznego – siły lub przemieszczenia – system Magscanner-Maglab wykorzystuje algorytm skanowania „punkt po punkcie” z jednoczesną rejestracją pełnego okresu fazy obciążania [1, 2, 39, 66, 67], która podzielona jest na określoną liczbę klatek (przeważnie 360 na okres). Na rysunku 7.54 przedstawiono przykładowy przebieg sygnałów magnetomechanicznych z uwzględnieniem akwizycji „punkt po punkcie”. Należy mieć na uwadze, że powstałe przesunięcie fazowe nie jest wytworzone przez podsystem analogowo-cyfrowy skanera (przez układ elektroniczny), lecz pochodzi bezpośrednio ze zjawiska fizycznego.

Na rysunku 7.55 przedstawiono schematycznie sposób zbierania danych przez skanowanie algorytmem „punkt po punkcie”, w wyniku którego są generowane cztery mapy, każda po 360 klatek lub o wyznaczonej liczbie klatek. System może powtórzyć cykl skanowania „punkt po punkcie” po przerwie trwającej ustaloną liczbę okresów sygnału synchronizacyjnego.

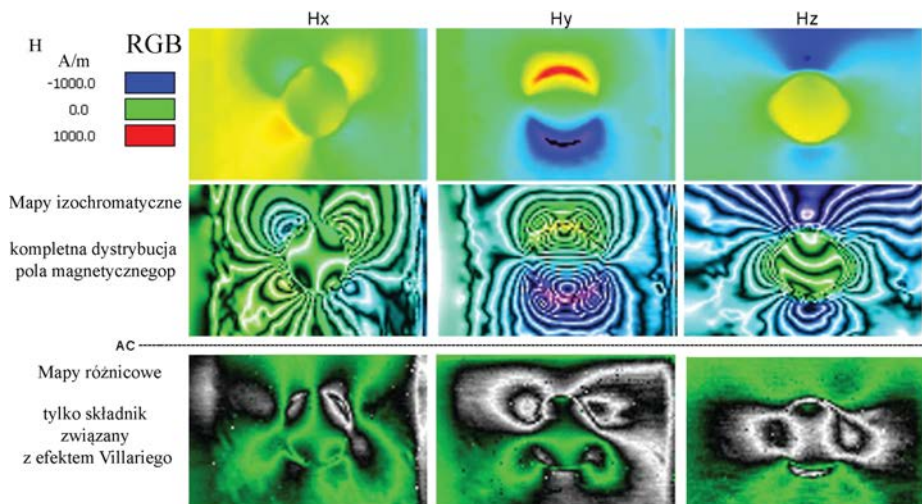


Rys. 7.54. Przykładowy przebieg sygnału naprężenia i składowej wektora natężenia pola magnetycznego w jednym punkcie pomiarowym z podziałem okresu na 360 klatek



Rys. 7.55. Metoda akwizycji wektora pola magnetycznego w czasie sinusoidalnego obciążenia w zakresie sprężystym [39]

Na rysunku 7.56 przedstawiono wyniki pomiaru rozkładu pola magnetycznego wokół tarczy z kołowym otworem, poddanej symetrycznym obciążeniom cyklicznym, ukazane w trzech trybach wyświetlania: kolory z palety RGB oraz mapy izochromatyczne, w których kolory rozdzielone są na przemian czarną i białą



Rys. 7.56. Rozkład pola magnetycznego wokół próbki Kirscha pod wpływem procesu obciążenia cyklicznego, zaprezentowany w trzech różnych trybach: RGB, izochromatycznym i różnicowym [37, 39, 60]

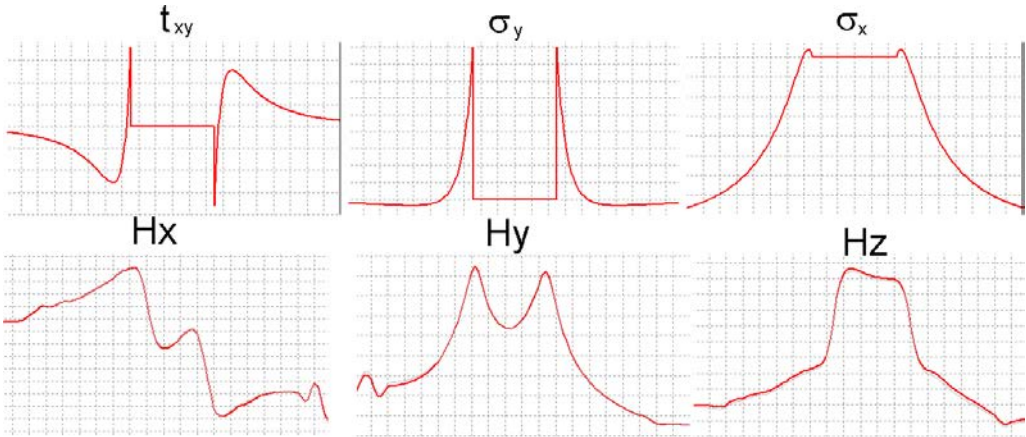
barwą (tworząc wrażenie konturu na mapie). Mapa dystrybucji, określona jako AC, to różnica między pierwszą klatką pomiaru, fazą początkową sygnału oraz wszystkich pozostałych rejestrowanych klatek w ramach tej samej składowej wektora natężenia pola magnetycznego. W konsekwencji, rozkład pola magnetycznego AC jest wynikiem wyłącznie wystąpienia efektu Villariego.

Przykład porównania stanu mechanicznego obciążenia i pojawiającego się w takt pola magnetycznego, związanego ze zjawiskiem odwrotnej magnetostrykcji przedstawiono na rysunku 7.57.

Stworzono w rezultacie system, który umożliwia identyfikację modeli krzyżowych efektów magnetomechanicznych oraz identyfikacji pola odkształceń z obrazów magnetycznych obiektu.

7.5.7. Zastosowanie systemu Magscanner-Maglab w badaniach jakościowych wyrobów przemysłowych

System Magscanner-Maglab w obecnej wersji jest kompletnym narzędziem do badań rozkładu pola magnetycznego w mechanice technicznej. System jest zdolny do analizowania procesów zmęczeniowych dla niskiej częstotliwości obciążenia (0,1–20 Hz), jak i dystrybucji pola magnetycznego wokół próbek poddanych obciążeniom cyklicznym do 200 Hz. Umożliwia rejestrację wektora pola magnetycznego w postaci filmu o 360 klatkach na okres. Opracowano również prototyp podręcznego

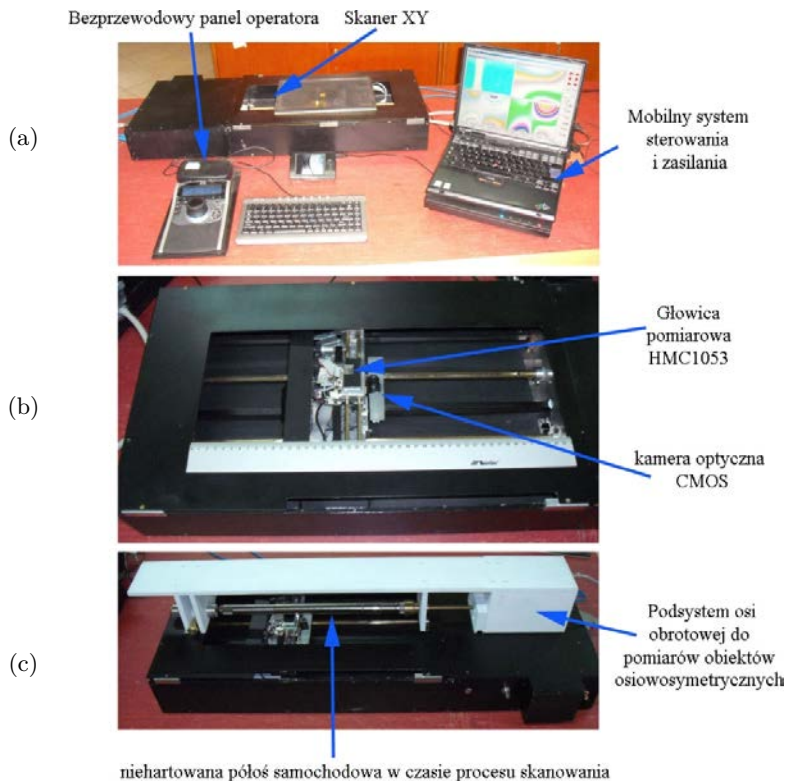


Rys. 7.57. Przebiegi zmian naprężeń t_{xy} , σ_y , σ_x , zgodnie z modelem 1, oraz składowe wektora natężenia pola magnetycznego (H_x , H_y , H_z , zgodnie z eksperymentem rys. 7.56) dla przekroju poprzecznego, przechodzącego przez otwór próbki Kirscha [37, 39, 60]

skanera pola magnetycznego 3D do zadań związanych z magnetopoligrafią i testami farb magnetycznych [39].

Magscanner-Maglab może być zastosowany do kontroli jakości procesu indukcyjnego hartowania. Na rysunku 7.58 przedstawiono system przystosowany do zadań przemysłowych z prezentacją poszczególnych elementów składowych. Zastosowanie osi obrotowej umożliwia precyzyjne skanowanie obiektów osiowo-symetrycznych, np. walcowych próbek masowych, różnego rodzaju wałków. Obracająca się oś nad głowicą pomiarową skanera umożliwia pomiar składowych natężenia pola magnetycznego wzdłuż tworzącej i rozwinięcia powierzchni walca jako płaszczyzny. Na rysunku 7.59 ukazano rozkład pola magnetycznego na cylindrycznej powierzchni wałka półosi w postaci rozwinięcia fragmentu powierzchni walcowej obiektu przed i po hartowaniu. Skanowanie magnetyczne dostarcza dodatkowych informacji o poprawności procesu hartowania, co ma duże znaczenie w przemyśle. W tzw. strefach krytycznych, gdzie występują anomalie magnetyczne, występuje największe ryzyko nieprawidłowego procesu hartowania, który przejawia się większymi wartościami pola magnetycznego, w porównaniu do średniego rozkładu pola magnetycznego na wałku w sąsiadujących powierzchniach. Dzięki zastosowaniu systemu do skanowania osi i wałków, może być kontrolowany proces technologiczny, w tym hartowanie indukcyjne.

Przykłady zastosowania skanera w przypadku obiektów poddanych obróbce technologicznej (cięcie, wiercenie, spawanie itp.) można znaleźć w pracach [37, 39, 60].

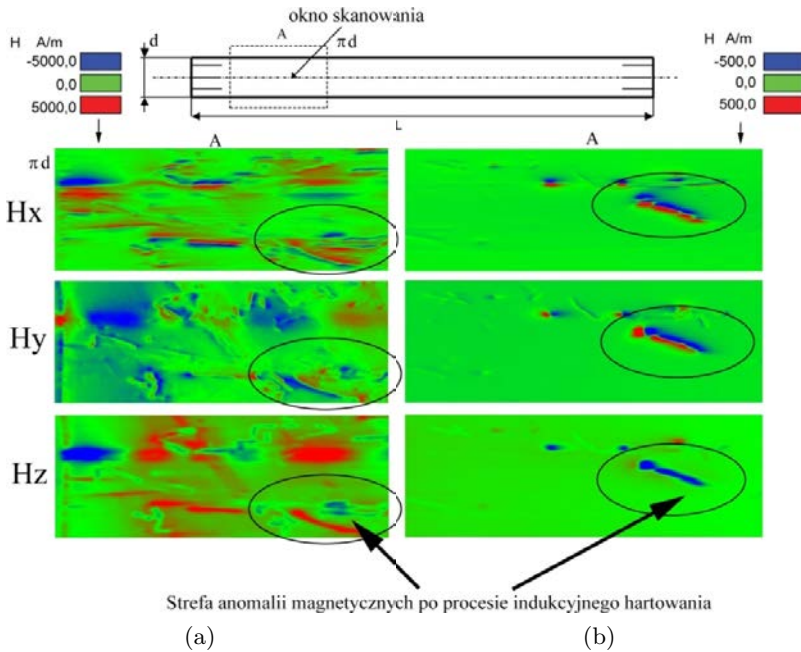


Rys. 7.58. Widok systemu Magscanner-Maglab do zadań przemysłowych:

- a) konfiguracja skanera XY, b) widok głowicy pomiarowej i kamery optycznej CMOS, c) proces skanowania przemysłowej półosi samochodowej [37, 60]

Reasumując, można stwierdzić, że:

- Zaprezentowano nowy skaner magnetyczny do różnorodnych zastosowań w zagadnieniach mechaniki eksperymentalnej. Skaner umożliwia równoczesne wyznaczenie trzech składowych natężenia pola magnetycznego H_x , H_y , H_z dla obiektów płaskich i walcowych. Pomiar odbywa się bezkontaktowo w zadanej odległości d od powierzchni badanej. Układ pomiarowy wyposażono w system oprogramowania Magscanner-Maglab, który umożliwia akwizycje sygnałów, przetwarzanie i wizualizacje [38, 39, 41, 60, 61].
- Na przykładzie tarczy z otworem kołowym, poddanej cyklicznemu obciążaniu, zaprezentowano możliwości wykorzystania układu pomiarowego do identyfikacji efektu Villariego.
- Zaprezentowano liczne przykłady wykorzystania skanera magnetycznego, w tym do badania lokalizacji odkształceń plastycznych oraz pęknięć i niejednorodności magnetycznych, magnetopoligrafii i innych.

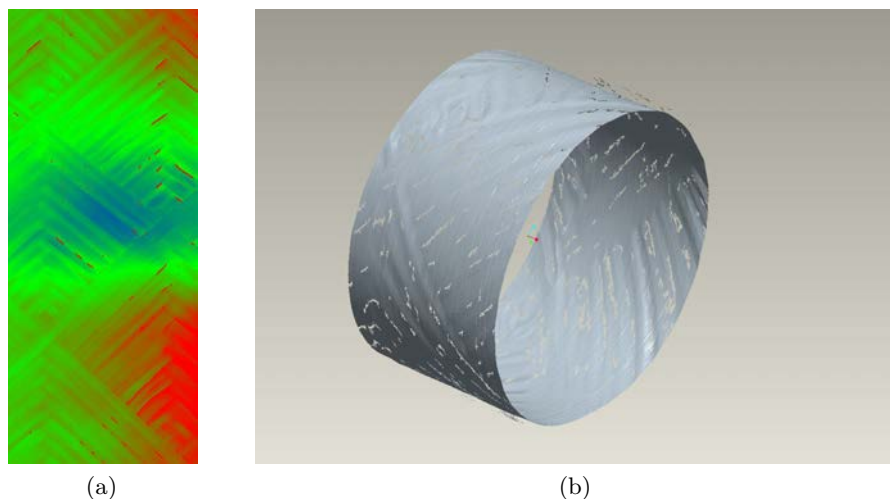


Rys. 7.59. Mapy rozkładu pola magnetycznego półosi samochodowej:
 a) niehartowanej, b) po hartowaniu indukcyjnym [37, 39, 60]

7.5.8. Zastosowanie systemów skanujących do wizualizacji zewnętrznej struktury badanych obiektów

Ze względu na łatwość podmiany głowic pomiarowych uznano za zasadne przystosowanie systemów skanerów, które obsługiwały czujniki magnetyczne również do innych pomiarów. Skaner, który początkowo umożliwiał pomiary magnetyczne, może zostać wyposażony w nowe funkcje takie, jak pomiar struktury na badanej powierzchni (optyczny skaner 3D), podatność powierzchni na zjawiska elektryczne, takie jak zmiana właściwości dielektrycznych, w tym podatność na przebicia. W tym podrozdziale przedstawiono inne metody pomiarowe z wykorzystaniem istniejących systemów skanujących.

Przez prostą modyfikację głowicy i zastosowanie laserowego przyrządu do pomiaru odległości między punktem zerowym, zaprogramowanym w głowicy laserowej i skanowanym aktualnie punktem, można otrzymać optyczne skanery 3D. Ponieważ program Maglab jest w istocie wizualizatorem danych, nie ma znaczenia źródło ich pochodzenia, musi być jedynie spełniony standard w zapisie danych.



Rys. 7.60. Wizualizacja struktury nawijania we wzorcowej rurze kompozytowej, uzyskanej przez zastosowanie czujnika laserowego: a) mapa rozwinięcia powierzchni kompozytowej rury w programie CAD, b) widok struktury na powierzchni walcowej [68]

Dzięki opracowanej metodzie [68] możliwe staje się skatalogowanie nieznanego sposobu nawijania rur czy zbiorników kompozytowych i wprowadzenie tzw. *reverse engineering* w procesie projektowania nowych typów nawojów.

System skanujący, z inną końcówką pomiarową (elektroda do zadawania wysokiego napięcia), wykorzystano również efektywnie do testowania stanu zużycia elektroaktywnych powłok elastomerowych stosowanych w wałkach elektrostatycznych PCR (ang.: *Primary Charge Roller*) w drukarkach laserowych [39].

7.6. Identyfikacja zjawisk o charakterze magnetomechanicznym w blachach

Celem badań było sprawdzenie przydatności efektu Villariego i wytworzonej aparatury pomiarowej w przypadku odkształcania blach ferromagnetycznych, podstawowego surowca w procesie tłoczenia na masową skalę wielu wyrobów. Wybrane aspekty tego problemu omówiono dalej.

7.6.1. Magnetyczny analog krzywej jednoosiowego rozciągania i krzywej umocnienia

Wcześniej wykazano przydatność efektu Villariego do identyfikacji granicy plastyczności, w tym przypadku materiałów, w których (np. stale spiekane) odkształcenia plastyczne trudno mierzyć z użyciem wielkości tylko mechanicznych.

Obiektem pomiaru była próbka ze stali o podwyższonej granicy plastyczności E275D, jej stале materiałowe przedstawiono w tabeli 7.4.

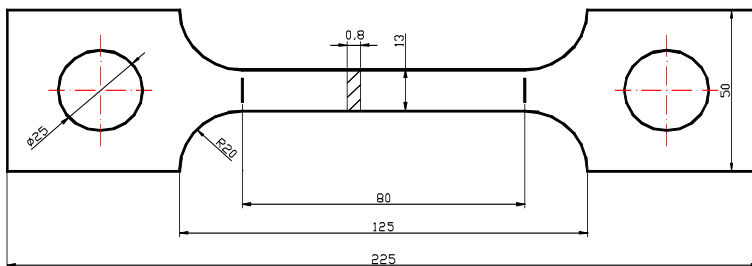
Stal E275D, z której wytwarza się blachy stosowane w procesach tłoczenia, wybrano ze względu na właściwości magnetyczne. Eksperymenty przeprowadzono, używając próbek płaskich z otworami do mocowania o wymiarach przekroju poprzecznego $13 \times 0,8$ mm (rys. 7.61).

W tak dobranym materiale (kształt, sposób wycięcia próbek) można przyjąć, że mierzone bardzo małe zmiany pola magnetycznego nie są ani pochodnymi ziemskiego pola magnetycznego, ani efektem błędu w planowaniu eksperymentu, lecz są następstwem efektu Villariego w odkształcanym materiale.

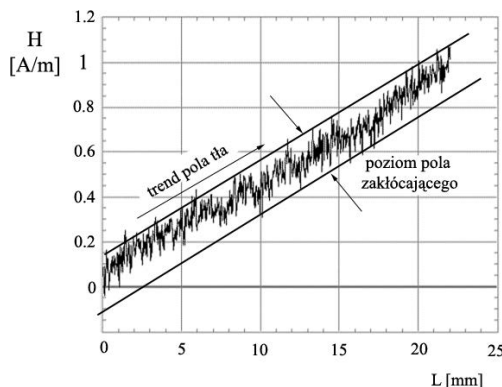
Do pomiaru wykorzystano układ pomiarowy składający się z maszyny wytrzymałościowej MTS model 810, sterowanej za pomocą komputera oraz ekstensometru (firmy MTS) o zakresie pomiarowym $\pm 20\%$.

Tabela 7.4. Wybrane parametry mechaniczne badanej próbki ze stali E275D [39]

Kierunek walcowania	Współczynniki krzywej umocnienia $\sigma = C(\varepsilon + \varepsilon_0)^n$			Współczynnik anizotropii plastycznej R	Moduł Younga E
	C	ε_0	n		
0°	592	-0,00167	0,128	1,16	208860 MPa
45°	586	-0,00011	0,128	0,87	
90°	567	-0,00360	0,122	0,95	



Rys. 7.61. Wymiary geometryczne badanej próbki [18]



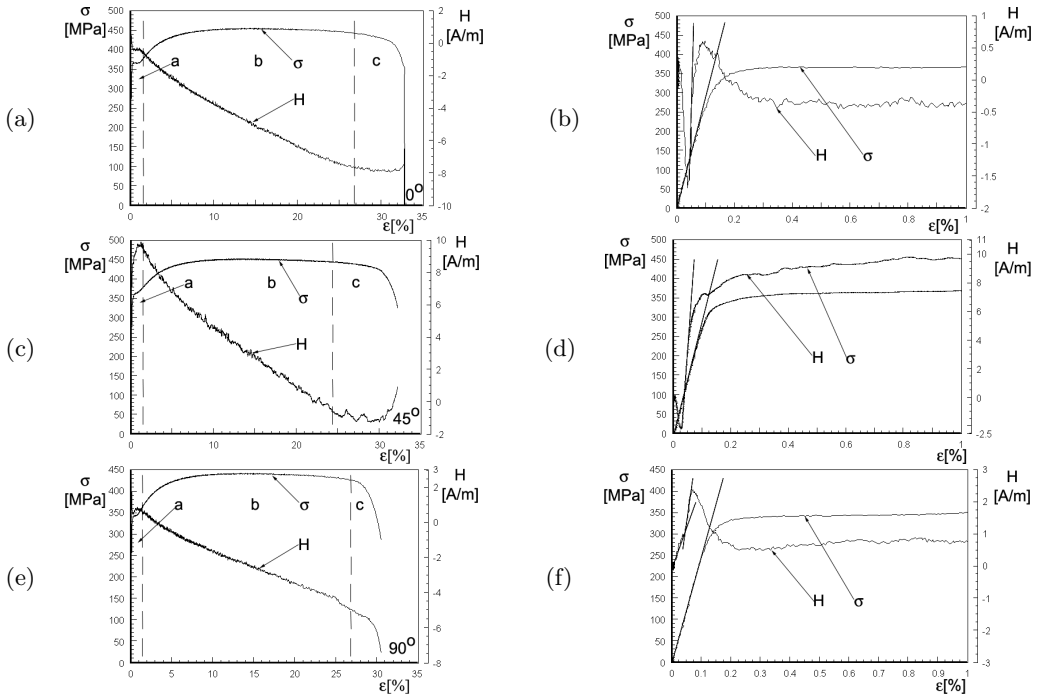
Rys. 7.62. Wartości i trend pola magnetycznego tła [39, 54]

W celu wyznaczenia odpowiedniej składowej wektora natężenia pola magnetycznego użyto układu z magnetorezystorem KMZ 51 firmy Philips. Zastosowany magnetorezystor charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami pomiarowymi i może mierzyć sygnał magnetyczny w zakresie ± 500 A/m z wykorzystaniem cewki kompensującej (pole emitowane przez skorupę ziemską wynosi ok. 30 A/m), z możliwością redukcji pola tła (pole ziemskie i pole otaczających sensor obiektów metalowych). Wartości oraz zmiany pola magnetycznego na skutek ruchów szczęk maszyny MTS przedstawiono na rysunku 7.62 po uprzednim wyzerowaniu wskazań sensora (tzw. statyczne pole tła).

Na rysunku 7.63 w kolumnie lewej zaprezentowano przebiegi sygnałów $\sigma(\varepsilon)$ oraz $M(\varepsilon)$ dla próbek wyciętych z materiału pod następującym kątem w stosunku do kierunku walcowania, a mianowicie: 0° (rys. 7.63a), 45° (rys. 7.63c) oraz 90° (rys. 7.63e). Innymi słowy, kierunek obciążenia materiału w stosunku do kierunku walcowania (czyli też tekstury) wynosił 0° , 45° lub 90° . Przebiegi krzywej rozciągania $\sigma(\varepsilon)$ oraz sprzężonego z nią tzw. magnetycznego równoważnika krzywej rozciągania (MRKR) zaprezentowano dla pełnego zakresu odkształcenia, aż do złomu, który występował dla $\varepsilon \approx 31\text{--}33\%$. W kolumnie prawej z kolei, czyli na rysunkach odpowiednio 7.63b, 7.63d oraz 7.63f zaprezentowano przebieg wykresów w części początkowej zakresu odkształceń, czyli dla $\varepsilon = 0\text{--}1\%$.

Należy podkreślić, iż krzywe rozciągania $\sigma(\varepsilon)$ nie wykazują istotnych różnic w zależności od tekstury. Znaczące różnice, występujące natomiast w przypadku charakterystyki $M(\varepsilon)$, wskazują, iż i w tym przypadku efekt Villario jest czułym indykatorem. We wszystkich przypadkach granica plastyczności zawiera się w przedziale $R_e = 200\text{--}260$ MPa, granica wytrzymałości $R_m = 440$ MPa, a $R_u \approx 350$ MPa.

Podczas ustalania parametrów procesów technologicznych potrzebna jest znajomość krzywej umocnienia. Można ją przedstawić w postaci analitycznej. Najczęściej



Rys. 7.63. Przebiegi sygnału naprężenia σ i natężenia pola magnetycznego H w funkcji odkształcenia [39, 54]

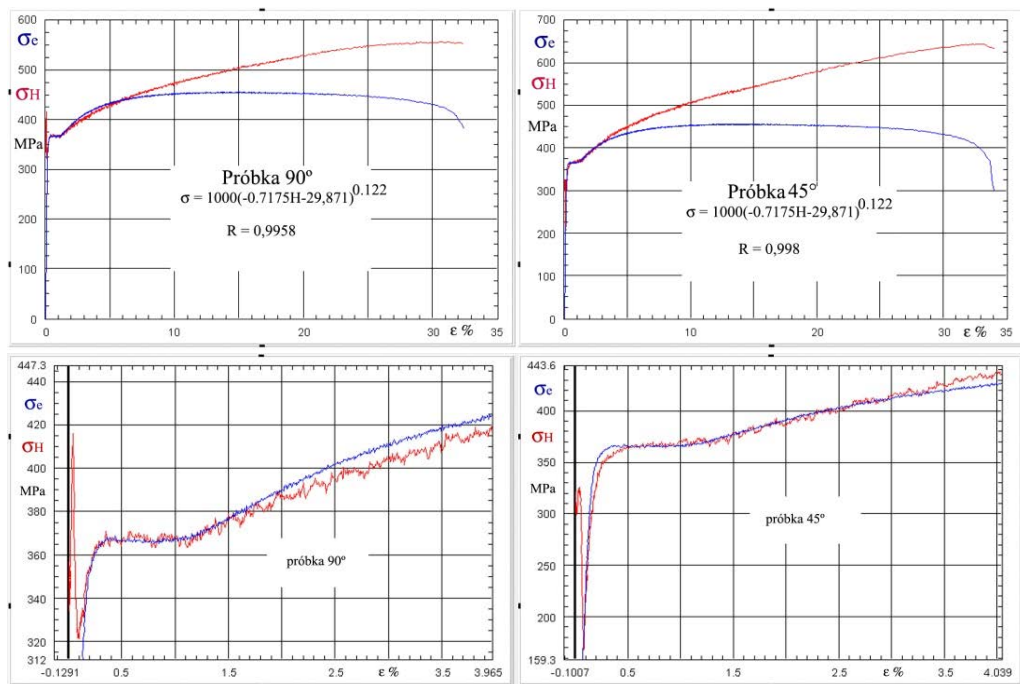
stosuje się równanie Swifta, które ma postać:

$$\sigma_p = C_1(\epsilon_0 + \epsilon_{\text{int}})^n$$

gdzie σ_p jest naprężeniem uplastyczniającym, a ϵ_{int} odkształceniem zastępczym. Właściwości materiału są tu scharakteryzowane przez trzy stałe: C_1 , ϵ_0 , n , które dobiera się w ten sposób, aby funkcja wyrażona wzorem Swifta jak najmniej odbiegała od rzeczywistej krzywej umocnienia.

Pomiary magnetyczne są wrażliwe na czynniki materiałowe związane z wielkością ziarna, zawartością węgla i składem chemicznym materiału, w związku z tym za pomocą analizy sygnałów magnetycznych można wyznaczyć indywidualną krzywą umocnienia blachy stalowej, zakładając powtarzalność tych parametrów na całej powierzchni.

We wszystkich wykonanych próbach jednoosiowego rozciągania próbek płaskich ze stali z pomiarem pola magnetycznego sygnał pola magnetycznego (rys. 7.63 oraz rys. 7.64) w obszarze odkształceń plastycznych zachodzi liniowa zależność między natężeniem pola magnetycznego H a odkształceniami. Dla takiego założenia



Rys. 7.64. Magnetyczna krzywa umocnienia dla próbek 90° i 45° [39]

relację ($H-\varepsilon$) można przedstawić jako

$$H = a\varepsilon + b$$

gdzie a i b są współczynnikami aproksymacji. Tak więc odkształcenie ε można wyrazić za pomocą H

$$\varepsilon = (H - b)/a$$

Wówczas otrzymuje się

$$\sigma_p = C_1 [(H - b)/a + \varepsilon_0]^n$$

Analizując dane eksperymentalne, wyznaczono współczynniki a i b dla zakresu odkształceń plastycznych, pomijając obszar sprężysty ze względu na dużą nieliniowość sygnału magnetycznego. Otrzymaną zależność nazwano „magnetyczną krzywą umocnienia”, a rezultaty przedstawiono na rysunku 7.64.

7.6.2. Badanie tekstury blach ferromagnetycznych metodą magnetyczną

Zaprezentowane wcześniej przebiegi $H(\varepsilon)$ poddano dalszej analizie. Zasadne było w tym przypadku wydzielenie trzech obszarów zaznaczonych na rysunku 7.63, a mianowicie:

- obszar a ($0 \leq \varepsilon \leq 1.5\%$),
- obszar b ($15 \leq \varepsilon \leq 24-27\%$), co odpowiada momentowi pojawienia się szyjki na próbce),
- obszar c ($24-27 \leq \varepsilon \leq 31-33\%$), co odpowiada obszarowi między pojawieniem się szyjki a złomem.

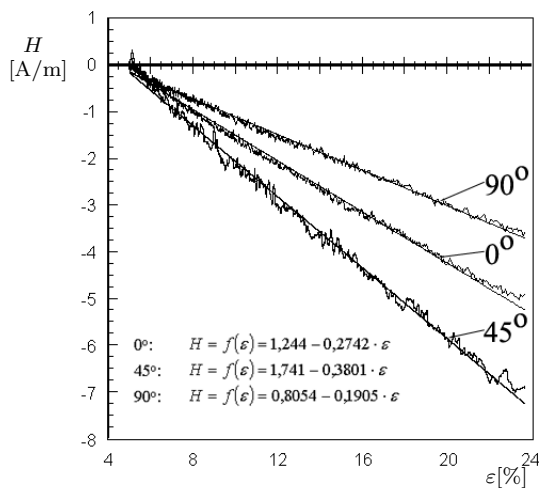
Dalej przeprowadzono analizę przebiegów $H(\varepsilon)$ dla materiałów o zadanej teksturze w zależności od kąta wycięcia względem kierunku walcowania, oddzielnie dla każdego z obszarów.

Obszar a obejmuje zarówno zakres odkształceń sprężystych, jak i sprężysto-plastycznych (do $\varepsilon \leq 1,5\%$). Powiększenie tego zakresu w celu stworzenia możliwości analizy łącznej przebiegów $\sigma(\varepsilon)$ oraz $H(\varepsilon)$ zaprezentowano na rysunkach odpowiednio: 7.63b (dla kąta 0°), 63d (45°) oraz 7.63f (90°). Różnice w przebiegu sygnału magnetycznego $H(\varepsilon)$ są w tym przypadku bardzo wyraźne.

Na rysunku 7.63b (0°) sygnał $H(\varepsilon)$ ma w zakresie $0 \leq \varepsilon \leq 0,1\%$ dwa przebiegi liniowe. Pierwszy z nich (od lewej) kończy się pikiem dolnym, co odpowiada granicy „sprężystości” magnetycznej. Oznacza to taką wartość naprężenia ($\sigma \approx 100$ MPa) i odpowiadającego mu odkształcenia ($\varepsilon \approx 0,04\%$), do których ruch domen jest odwracalny (sprężysty). Poczynając od piku dolnego, obserwuje się kolejny liniowy zakres przebiegu $H(\varepsilon)$, który ulega zagięciu przechodząc, w krzywoliniowy dla $\sigma = 180$ MPa. Z badań wcześniejszych [39, 49] wynika, iż jest to związane z lokalnym pojawieniem się pierwszych odkształceń plastycznych. Należy podkreślić, iż wartość granicy plastyczności wyznaczona dla całej objętości części roboczej próbki leży znacznie wyżej i wynosi $R_e = 250$ MPa.

Na rysunku 7.63d (dla kąta 45°) występuje również pik dolny przebiegu $H(\varepsilon)$ odpowiadający granicy „sprężystości” magnetycznej ($\varepsilon = 0,025\%$, $\sigma = 70$ MPa). Dalszy przebieg liniowy w górę ulega odgięciu dla $\sigma = 180$ MPa (pierwsze lokalne odkształcenia plastyczne). Granica plastyczności wyznaczona dla całej objętości próbki leży znacznie wyżej ($R_e = 260$ MPa).

Istotnie różny przebieg $H(\varepsilon)$ widoczny jest na rysunku 7.63f (dla 90°). Nie występuje pik dolny przebiegu. Widoczna jest natomiast zmiana nachylenia prostej $H(\varepsilon)$ dla $\varepsilon = 0,05\%$ ($\sigma = 80$ MPa), co odpowiada granicy „sprężystości” magnetycznej. Dalszy liniowy przebieg $H(\varepsilon)$ kończy się pikiem górnym, któremu odpowiada pojawienie się lokalnych odkształceń plastycznych ($\varepsilon = 0,07\%$, $\sigma = 180$ MPa). Granica R_e wynosi – podobnie jak poprzednio – 260 MPa.



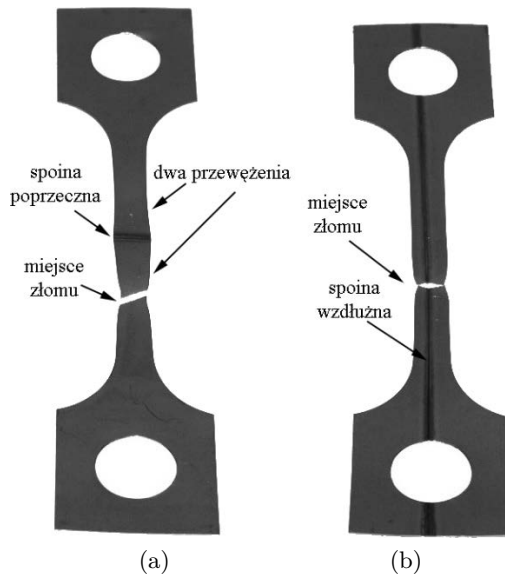
Rys. 7.65. Przebiegi sygnału $H(\varepsilon)$ w obszarze b o zadanej teksturze w zależności od kąta wycięcia względem kierunku walcowania [39, 54]

Obszar b obejmuje przedział znacznych odkształceń plastycznych. Na rysunku 7.65 zaprezentowano przebiegi $H(\varepsilon)$ silnie zależne od tekstury materiału. Do identyfikacji wykorzystano funkcje liniowe, zestawione również na rysunku. Kąty nachylenia przebiegów są istotnie różne i mogą być pomocne w identyfikacji tekstury.

Obszar c prezentuje zachowanie się przebiegu $H(\varepsilon)$ w obszarze największych odkształceń plastycznych towarzyszących pojawieniu się szyjki i lokalnemu płynięciu materiału aż do złomu. Wyraźnie widoczne jest, iż sygnał $H(\varepsilon)$ charakteryzuje się pojawieniem wypukłości ku dołowi w przypadku kątów 0° oraz 45° . Natomiast dla kąta 90° krzywa $H(\varepsilon)$ ma wypukłość ku górze. Należy podkreślić, iż zaprezentowane wyniki są dobrze udokumentowane statystycznie, a zaprezentowane obrazy przebiegów są typowe dla serii próbek dla każdego z analizowanych kątów.

7.6.3. Magnetomechaniczne właściwości blach spawanych laserowo w procesie quasi-statycznego rozciągania

Proces odkształcenia materiału „zaburzony” jest występowaniem strefy spoiny laserowej. Decydującą rolę podczas wyznaczania parametrów, niezbędnych do numerycznego modelowania konstrukcji z blachami spawanymi, odgrywa model materiału, ze szczególnym uwzględnieniem samej strefy połączenia. Dalej zaprezentowano próbę wykorzystania efektu Villariego do badania krzywych umocnienia dla obszaru spoiny oraz strefy wpływu ciepła w blachach spawanych laserowo [39]. Szybka i jednoznaczna diagnostyka w tym zakresie ma duże znaczenie prak-



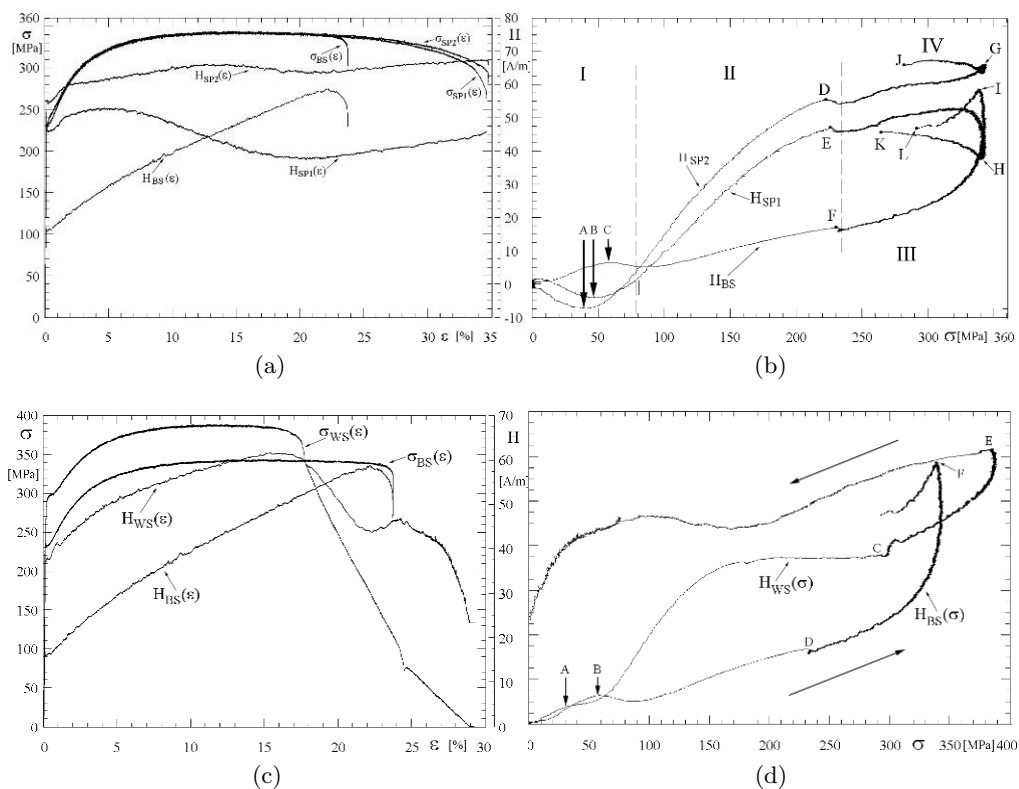
Rys. 7.66. Widok próbek: a) spawanej poprzecznie, b) wzdłużnie [39]

tyczne. Prezentowaną metodę można stosować również do monitorowania wad produkcyjnych (np. pęknięć) w czasie cyklu technologicznego.

Obiektem badań były próbki tzw. wiosłkowe grubości 0,8 mm i szerokości 13 mm. Długość części roboczej wynosiła 80 mm. Do badań użyto dwa rodzaje próbek spawanych laserowo oraz próbki bez spoiny przeznaczone do próby jednoosiowego rozciągania. Próbki wykonano z blachy typu SP E220BH spawanej laserowo (rys. 7.66), ze spawem prostopadłym i równoległym do osi rozciągania próbki. Wycięto je za pomocą specjalnego wykrojnika pod kątem 0° względem kierunku walcowania i odpowiednio przygotowano do precyzyjnego spawania laserowego.

Do pomiaru wykorzystano układ pomiarowy składający się z maszyny wytrzymałościowej MTS model 810, sterowanej za pomocą komputera, ekstenzometru (firmy MTS) o zakresie pomiarowym $\pm 20\%$ oraz przyrządu do pomiaru pola magnetycznego. W czasie pomiaru rejestrowano następujące wielkości: siłę, odkształcenie, przemieszczenie i składową pola magnetycznego wzdłuż kierunku rozciągania próbki, ze względu na fakt, że ta składowa wektora pola magnetycznego jest dominująca, co stwierdzono w pomiarach wstępnych.

Charakterystyczne okazały się miejsca powstawania przewężenia próbek – ze spawem prostopadłym do osi rozciągania, tworzyły się dwa takie miejsca, a dla próbek ze spawem równoległym do osi, jedno takie miejsce. Spoina laserowa,



Rys. 7.67. Przebiegi sygnału naprężenia σ i natężenia pola magnetycznego H w funkcji odkształcenia ϵ [39]

prostopadła do osi rozciągania, ze względu na swoją dużą wytrzymałość podzieliła próbkę na dwie niezależne części, z których jedna tylko pękała.

Na rysunku 7.67 przedstawiono uzyskane rezultaty dla próbek ze spoiną poprzeczną do kierunku obciążania materiału – PS (rys. 7.67a, b) oraz dla próbki ze spoiną wzdłużną, równoległą do kierunku obciążania materiału – WS (rys. 7.67c, d) względem próbki bez spoiny – BS. Kierunek obciążenia materiału, w stosunku do kierunku walcowania (tekstury), wynosił 0° . Analiza porównawcza krzywej rozciągania $\sigma(\epsilon)$ oraz zmian natężenia pola magnetycznego $H(\epsilon)$, wywołanych efektem Villariego, dostarcza dla poszczególnych typów próbek informacji o wpływie spoiny laserowej na umocnienie materiału. Przebiegi krzywej rozciągania $\sigma(\epsilon)$ oraz sprzężonego z nią tzw. magnetycznego równoważnika krzywej rozciągania (MRKR) zaprezentowano dla pełnego zakresu odkształcenia, aż do złomu, który występował dla próbki bez spoiny (BS) $\epsilon \approx 21\text{--}23\%$, dla próbek ze spoiną poprzeczną (PS1, PS2) $\epsilon \approx 33\text{--}35\%$ oraz dla próbki ze spoiną wzdłużną (WS) $\epsilon \approx 16\text{--}18\%$.

W tabeli 7.5 przedstawiono wartości parametrów krzywe rozciągania $\sigma(\varepsilon)$ dla badanych próbek.

Tabela 7.5. Wartości parametrów krzywych rozciągania $\sigma(\varepsilon)$ badanych próbek [39]

Typ próbki	R_e [MPa]	R_m [MPa]	R_u [MPa]
BS	200–260	440	~350
PS	200–260	440	~350
WS	200–260	440	~350

Aby zaprezentować swoisty magnetyczny analog krzywych rozciągania (rys. 7.67a i 7.67b), przedstawiono krzyżową zależność w układzie współrzędnych $H-\sigma$ dla poszczególnych wariantów próbek, co zostało zaprezentowane na rysunkach (7.67b i 7.67c). W „języku magnetycznym” można tutaj również wyrazić historię odkształcenia materiału opisaną charakterystycznymi punktami.

Reasumując, można stwierdzić, iż jak dotąd nie ma prostego sposobu wyznaczenia zarówno parametrów materiałowych spoiny, jak i stref wpływu ciepła przyległych do spoiny. Wiele informacji na ten temat dostarczyło zjawisko odwrotnej magnetostrykcji. Sprawa wymaga dalszych badań, ale już teraz można stwierdzić, iż sygnał magnetyczny jest wartościowym indykatorem zmian w materiale w strefie spoiny laserowej.

7.6.4. Magnetyczna pamięć historii odkształcania materiału ferromagnetycznego

Dalej zaprezentowano poszukiwanie korelacji między sygnałami mechanicznymi (odkształcenie – ε i naprężenie – σ) i magnetycznymi (natężenie pola magnetycznego – H) w statycznej próbie rozciągania z kilkukrotnym odciążeniem. Celem pracy było zatem sprawdzenie, czy historia odkształcania materiału ferromagnetycznego odzwierciedlona jest w przebiegu sygnału magnetycznego $H(t)$, co pozwalałoby mówić o swoistej pamięci magnetycznej. Zaprezentowano w ten sposób kolejną aplikację zjawiska odwrotnej magnetostrykcji (efektu Villariego) w badaniach wytrzymałości materiałów ferromagnetycznych [55].

Opis eksperymentu

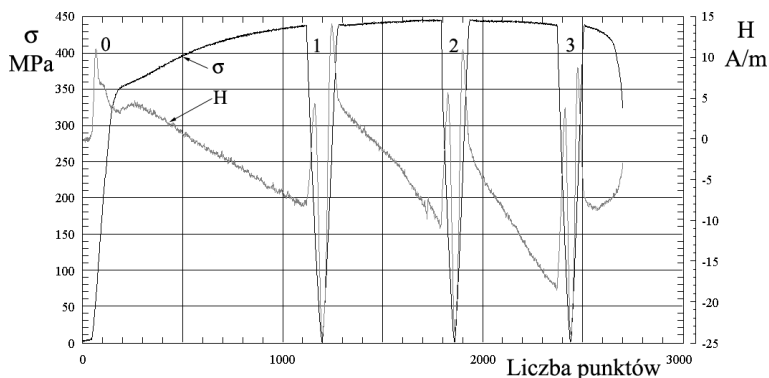
Do badań jednoosiowego rozciągania zastosowano próbki z blachy stalowej o podwyższonej granicy plastyczności E275D. Obiektem badań były próbki tzw. wiosłkowe grubości 0,8 mm i szerokości 13 mm. Długość części roboczej wynosiła 80 mm. W badaniach wykorzystano trzy typy próbek wycięte za pomocą specjalnego wykrojnika pod kątem 0° , 45° i 90° względem kierunku walcowania.

Do pomiaru wykorzystano układ pomiarowy składający się z maszyny wytrzymałościowej MTS-810, sterowanej za pomocą komputera, wraz z układami pomiarowymi odkształcenia $\varepsilon(t)$ i naprężenia $\sigma(t)$ oraz przyrządu do pomiaru pola magnetycznego [18, 69]. W celu wyznaczenia odpowiedniej składowej wektora natężenia pola magnetycznego użyto układu z magnetorezystorem KMZ 51 firmy Philips. Zastosowany magnetorezystor charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami pomiarowymi i może mierzyć sygnał magnetyczny w zakresie ± 500 A/m (pole emitowane przez skorupę ziemską wynosi około 30 A/m), z możliwością redukcji pola tła (pole ziemskie i pole otaczających sensor obiektów metalowych) [18, 30].

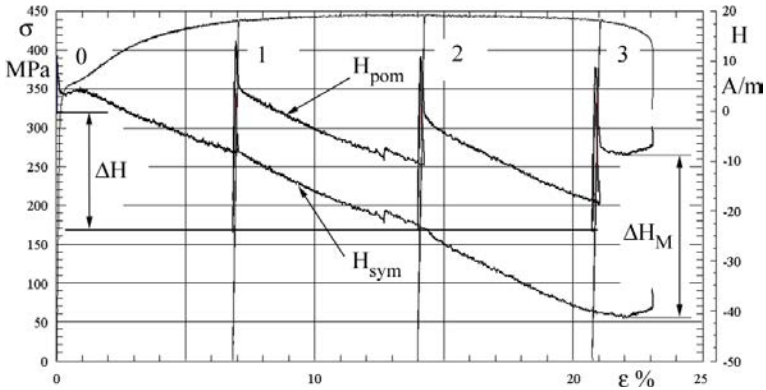
Głównym podzespołem zestawu pomiarowego była głowica, którą przedstawiono na rysunku 7.35. W czasie pomiaru rejestrowano następujące wielkości: siłę, odkształcenie, przemieszczenie i składową pola magnetycznego wzdłuż kierunku rozciągania próbki. Wiadomo, że ta składowa wektora jest dominująca, co stwierdzono w pomiarach wstępnych. Szczegóły dotyczące strony pomiarowej zaprezentowano, np. w pracach [15, 24, 70].

Analiza sygnałów pomiarowych

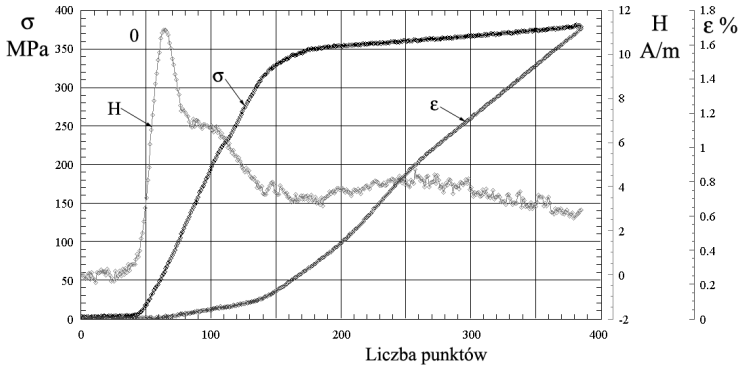
Dalej zaprezentowano uzyskane wyniki dla próbek z blachy wyciętej pod kątem 45° względem kierunku walcowania. Na rysunku 7.68 przedstawiono przebiegi naprężenia σ i natężenia pola magnetycznego H w funkcji liczby punktów pomiarowych dla próby rozciągania z trzykrotnym odciążaniem i ponownym obciążaniem. Ponieważ krok pomiarowy był stały, dlatego oba przebiegi można uznać za czasowe, czyli $\sigma(t)$ i $H(t)$. Poszczególne fazy oznaczono kolejno jako 0, 1, 2, 3. Symbolem 0 oznaczono zatem proces obciążania materiału wyjściowego (czyli bez odkształceń plastycznych).



Rys. 7.68. Sygnały naprężenia σ i natężenia pola magnetycznego H w funkcji liczby punktów pomiarowych [39, 55]



Rys. 7.69. Przebiegi oraz $H_{\text{pom}}(\varepsilon)$, $H_{\text{sym}}(\varepsilon)$ oraz $\sigma(\varepsilon)$ dla próby obciążania z trzykrotnym odciążaniem [39, 55]

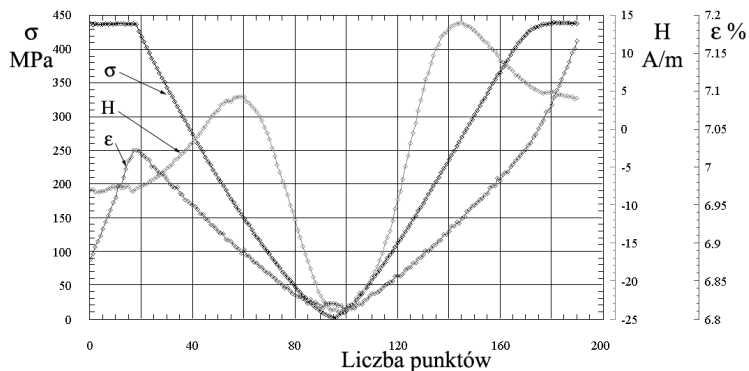


Rys. 7.70. Przebiegi sygnałów $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ oraz $H(t)$ dla fazy początkowej oznaczonej jako 0 [39, 55]

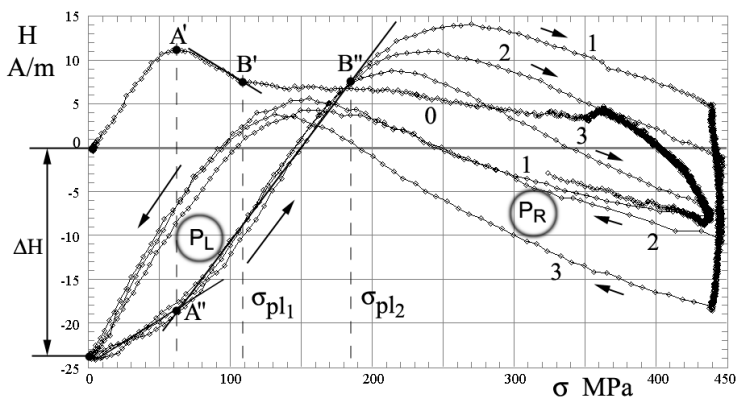
Na rysunku 7.69 z kolei przedstawiono oba przebiegi w funkcji odkształcenia, a mianowicie $\sigma(\varepsilon)$ i $H(\varepsilon)$. Przesunięto tam poszczególne segmenty rzeczywistego przebiegu $H(\varepsilon)$ (oznaczonego tutaj jako H_{pom}), tak by stanowiły one kontynuację $H(\varepsilon)$ w przedziale 0. Uzyskano w ten sposób symulowany przebieg H_{sym} .

Wyraźnie widoczne różnice $H_{\text{pom}} - H_{\text{sym}}$, których wartość rośnie wraz z liczbą odciążań, da się jednoznacznie skorelować z historią odkształcenia. Dla przejrzystości rysunku zaznaczono jedynie wartość ΔH_M , charakteryzującą przedział 3. Można zatem mówić o swoistej pamięci magnetycznej. Znaczenie różnicy ΔH opisano w dalszej części.

Aby ułatwić analizę wyników, na kolejnych rysunkach (rys. 7.70 i rys. 7.71) pokazano w powiększeniu szczegółowe przebiegi sygnałów $\sigma(t)$, $H(t)$ oraz $\varepsilon(t)$ w funkcji czasu odpowiednio dla przedziału 0 oraz przedziału 1.



Rys. 7.71. Przebiegi sygnałów $\sigma(t)$, $\epsilon(t)$ oraz $H(t)$ dla fazy oznaczonej jako 1 [39, 55]



Rys. 7.72. Przebieg $H(\sigma)$ dla próby rozciągania z trzykrotnym odciążaniem [39, 55]

Aby zaprezentować swoisty magnetyczny analog krzywej rozciągania z odciążaniem (rys. 7.68, rys. 7.69), przedstawiono krzyżową zależność w układzie współrzędnych H - σ (rys. 7.72). W „języku magnetycznym” można tutaj również wyrazić historię odkształcenia materiału.

Na osi H zaznaczono odstęp ΔH prezentujący różnicę natężenia pola magnetycznego dla materiału nieobciążonego ($H = 0$ dla przebiegu 0) oraz dolny wierzchołek pętli P_L (dla materiału odkształconego plastycznie, niezależnie od numeru obciążenia – odciążenia).

Z wcześniejszych prac [24, 32, 71] wiadomo, iż na przebiegu 0 koniec drugiego odcinka liniowego punkt B' silnie koreluje z momentem pojawienia się pierwszych odkształceń plastycznych ($\sigma_{pl1} = 110$ MPa) w materiale rodzimym (rys. 7.58). Naprężenie σ_{pl1} nie powinno być utożsamiane z granicą plastyczności (jest znacznie większe) występującej dla całej objętości próbki.

Miejsca oznaczone na rysunku jako A' i A'' oznaczają moment zmiany kierunku magnetyzacji w następstwie obciążania materiału. Odpowiada temu naprężenie $\sigma = 60$ MPa.

Dalszą analizę przeprowadzono odpowiednio dla zestawu pokrywających się pętli P_L (lewy dolny róg) oraz zestawu separujących się pętli P_R (prawy górny róg).

Strzałkami oznaczono kierunek przebiegu funkcji $H(\sigma)$ dla fazy odciążania (\searrow) oraz dla fazy obciążania (\nearrow). Cyframi z kolei przyporządkowano przebiegi $H(\sigma)$ kolejnym fazom obciążania–odciążania widocznym na rysunkach 7.68 i 7.69.

Należy zwrócić uwagę, iż pętli P_L pokrywają się, co oznacza, iż faza odciążania (lewe gałęzie pętli), jak i obciążania w obszarze sprężystym (prawe gałęzie pętli) przebiegają podobnie, niezależnie od stopnia odkształcenia plastycznego materiału. Liniowa część prawej (narastającej) gałęzi pętli P_L ulega zakrzywieniu w miejscu (punkt B''), któremu odpowiada naprężenie $\sigma = 180$ MPa. Z prac wcześniejszych wynika, iż odpowiada to pojawieniu się pierwszych odkształceń plastycznych w materiale uprzednio silnie odkształconym. Naprężenie to oznaczono jako σ_{pl2} i wykazano, iż nie zależy ono od numeru odciążenia–obciążenia.

Należy zauważyć, iż poszczególne pętli histerezy w zestawie pętli P_R różnią się istotnie i mogą być jednoznacznie przyporządkowane kolejnym fazom odciążania–obciążania. Sygnał magnetyczny niesie zatem informację o historii odkształcenia materiału.

Reasumując można stwierdzić, że:

- Wykazano zasadność aplikacji efektu Villariego do badania materiału ferromagnetycznego w obszarze sprężysto–plastycznym.
- Charakterystyka krzyżowa $H(\sigma)$ dostarcza wartościowych informacji o procesie odkształcenia, których nie zapewniają klasyczne charakterystyki mechaniczne, np. $\sigma(\varepsilon)$. Zauważyć można między innymi, iż:
 - Stan magnetyczny materiału nieobciążonego, ale uprzednio silnie odkształconego plastycznie niezależnie od liczby odciążeń, różni się o $\Delta H = 24$ A/m od takiegoż stanu dla materiału pierwotnego.
 - Przebieg $H(\sigma)$ charakteryzuje zachowanie się materiału w fazie odciążania i ponownego obciążenia, umożliwia odtworzenie historii odkształcenia, czego przejawem są „uskoki” między przebiegami H_{pom} oraz H_{sym} . Finalna ich wartość odpowiadająca zerwaniu próbki wynosi ΔH_M . Przydatność przebiegu $H(\sigma)$ jest również widoczna podczas wyznaczania granicy plastyczności materiału pierwotnego i silnie odkształconego. W rezultacie można przyjąć, iż krzyżowe charakterystyki magnetomechaniczne „pamiętają” historię odkształcenia materiału ferromagnetycznego.

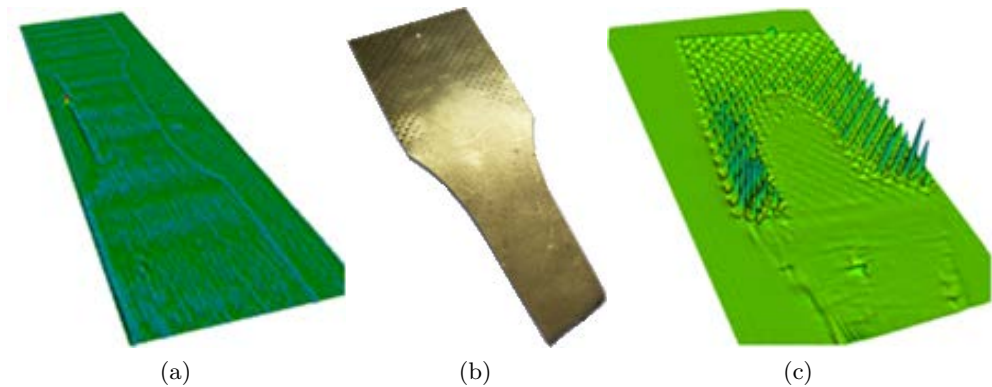
- Zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe do badania natężenia pola magnetycznego w następstwie efektu Villariego wykazało pełną przydatność w badaniach silnie odkształconych ferromagnetyków.

7.7. Badanie przemiany fazowej indukowanej odkształceniem

Istnieją dwa rodzaje przemiany martenzytycznej, przemiana termiczna zachodząca w wyniku przechłodzenia austenitu z dużą prędkością oraz przemiana odkształceniowa, która zachodzi pod wpływem wystąpienia krytycznego odkształcenia plastycznego. Stale austenityczne są materiałami powszechnie stosowanymi, a występująca w nich odkształceniowa przemiana martenzytyczna może mieć zarówno dodatni, jak i ujemny wpływ na elementy wykonane z tego materiału. Jest kilka metod badania przemiany martenzytycznej, między innymi dyfrakcja rentgenowska [72–74], dyfrakcja neutronowa [75, 76], pomiary mikroskopowe [74], pomiary gęstości [72] i twardości [72], jak również pomiary magnetyczne [72–74, 77–80]. Przemiana martenzytyczna indukowana odkształceniem plastycznym, w tym cyklicznym, jest podstawowym „mechanizmem” występującym w materiałach z pamięcią kształtu oraz w metastabilnych stalach austenitycznych umacnianych wydzieleniami martenzytu. Wydzielanie martenzytu, w początkowo jednofazowym materiale (austenit), zmienia ponadto radykalnie wytrzymałość na zmęczenie i pękanie. Tworzenie modeli konstytutywnych i zmęczeniowych dla tej klasy materiałów, np. [81–88], wymaga szacowania udziału ilościowego martenzytu w funkcji liczby cykli obciążenia.

Głównym zamierzeniem było stworzenie nieniszczącej metody badawczej opierającej się na pomiarze zmian natężenia pola magnetycznego, indukowanego w wyniku odkształcenia materiału, w następstwie efektu Villariego. Należy zauważyć, iż badany wyjściowy materiał jest stalą austenityczną, a więc paramagnetykiem, w którym w wyniku przemiany fazowej powstaje faza ferromagnetyczna – martenzyt α' . Założono, że zmiana natężenia pola magnetycznego umożliwi ocenę ilości wydzielanego ferromagnetycznego martenzytu α' w paramagnetycznej osnowie austenitu γ . Dlatego głównym celem prac było zastosowanie magnetowizyjnego systemu, aby wyznaczyć zawartość ferromagnetycznego martenzytu α' , indukowanego odkształceniem plastycznym w tzw. metastabilnych stalach austenitycznych, a w przyszłości szerzej – w grupie metali z pamięcią kształtu. Wybrane przykłady prac własnych z tego zakresu przedstawiono w dalszej części.

Na wstępie, dla ilustracji zagadnienia, zaprezentowano płaską próbkę ze stali austenitycznej 0H18N9T (rys. 7.73) po skanowaniu z użyciem przedstawionego wcześniej systemu magnetowizyjnego Magscanner-Maglab, w celu wykazania różnic w stanie materiału przed i po odkształceniu plastycznym. Na rysunku 7.73a



Rys. 7.73. Wizualizacja pola magnetycznego próbki ze stali 0H18N9T:
 a) po wycięciu próbki z arkusza blachy, b) widok złomu próbki,
 c) wizualizacja pola magnetycznego w miejscu lokalnego odkształcenia plastycznego
 w następstwie zacisku w szczękach maszyny [39]

przedstawiono magnetyczny obraz wyciętej próbki przed badaniami. Widoczne są na nim niewielkie zmiany strumienia pola magnetycznego tylko przy krawędziach próbki, czyli tam, gdzie w wyniku cięcia wystąpiły odkształcenia plastyczne. Na rysunku 7.73b zamieszczono fotografię fragmentu próbki po zniszczeniu, a na rysunku 7.73c przedstawiono obraz magnetyczny próbki po ściśnięciu w szczękach maszyny wytrzymałościowej: w konsekwencji wydzielania się fazy martenzytycznej, w części radełkowanej szczęk, czyli w obszarach silnych odkształceń mechanicznych zmienia się rozkład pola magnetycznego w materiale.

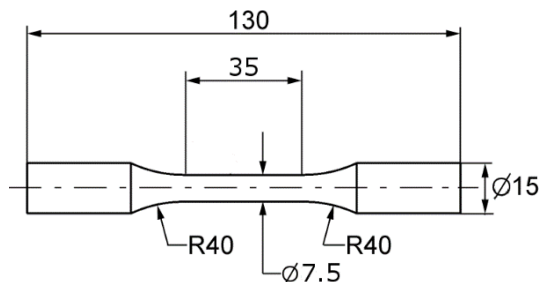
7.7.1. Badanie procesu wydzielania fazy martenzytycznej z rejestracją sygnału magnetycznego w próbkach masywnych

Dalej przedstawiono nieniszczącą magnetyczną metodę badania przemiany martenzytycznej, indukowanej cyklicznym odkształceniem plastycznym, w próbkach masywnych wykonanych z metastabilnej stali austenitycznej AISI 304. W tym celu przeprowadzono serię badań niskocyklowych, w trakcie których zaszła przemiana fazowa austenit $\gamma \rightarrow$ martenzyt α' . Wykazano, iż przez pomiar natężenia pola magnetycznego można wykryć inicjację odkształceniowej przemiany martenzytycznej, a następnie śledzić jej przyrost w trakcie procesu zmęczenia. Pokazano ponadto związek pomiędzy energią odkształcenia plastycznego ΔW oraz sygnałem magnetycznym H_m .

Obiektem badań były próbki walcowe wykonane ze stali austenitycznej AISI 304. Próbkę przestawiono na rysunku 7.74, a skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe w tabeli 7.6. Przed badaniami materiał został poddany obróbce

Tabela 7.6. Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali AISI 304 [50]

Material	Skład chemiczny [%]								Właściwości wytrzymałościowe		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	R_e MPa	R_m MPa	A_5 %
AISI 304	0,018	0,297	1,402	0,032	0,026	18,347	8,757	0,006	593	752	34

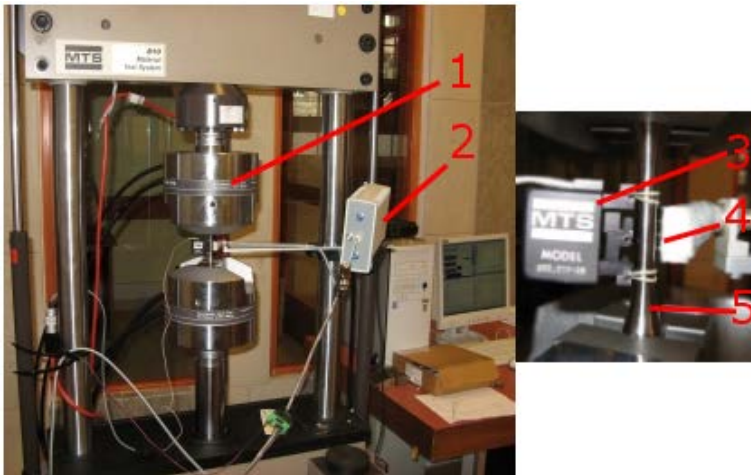


Rys. 7.74. Rysunek próbki [50]

cieplnej, która polegała na wygrzewaniu próbek w temperaturze 1050 °C przez 35 minut, a następnie szybkim chłodzeniu w wodzie. Obróbkę cieplną przeprowadzono w celu uzyskania materiału jednofazowego o strukturze austenitycznej.

Do pomiaru wykorzystano układ składający się z maszyny wytrzymałościowej MTS 810, komputera, ekstensometru oraz przyrządu do pomiaru pola magnetycznego (rys. 7.75). Maszyną wytrzymałościową sterowano za pomocą kontrolera FlexTest GT oraz z wykorzystaniem oprogramowania MultiPurpose TestWare, które umożliwiało rejestrację sygnałów mechanicznych (naprężenie $\sigma(t)$ i odkształcenie $\varepsilon(t)$) oraz magnetycznych (natężenie pola magnetycznego $H(t)$). Do pomiaru natężenia pola magnetycznego użyto oryginalnego układu skonstruowanego w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej. W układzie tym jako sensory zastosowano cztery magnetorezystory KMZ 10B firmy Philips, rozmieszczone w linii wzdłuż długości pomiarowej próbki. Przyjęte sensory charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami pomiarowymi oraz możliwością redukcji pola tła (pole ziemskie i pole wytwarzane przez otaczające sensor obiekty stalowe).

Na tak zestawionym układzie pomiarowym przeprowadzono niskocyklowe badania zmęczeniowe. Procesem zmęczenia sterowano za pomocą amplitudy odkształcenia całkowitego. Badania przeprowadzono dla czterech progów, odpowiednio dla $\varepsilon_a = 0,003; 0,0035; 0,004$ i $0,005$. Na każdym z progów przebadano pięć próbek. Proces realizowano aż do zniszczenia (zerwania) próbki. Widmo obciążenia miało charakter sinusoidalny ($R = -1$), a częstotliwość wynosiła 0,2 Hz. Przy tak

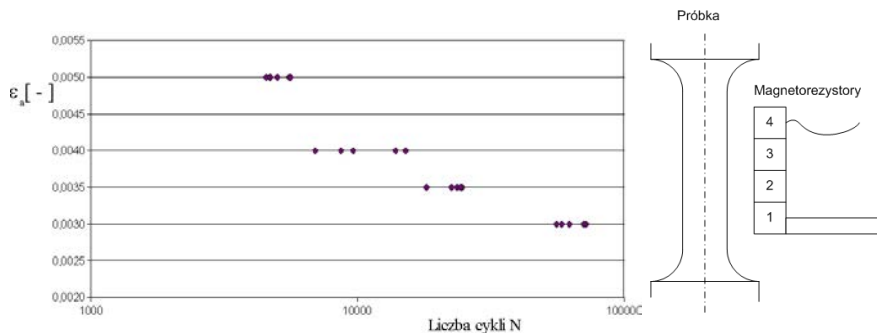


Rys. 7.75. Stanowisko pomiarowe: 1 – pulsator hydrauliczny MTS 810, 2 – układ pomiaru pola magnetycznego, 3 – ekstensometr, 4 – magnetorezystory, 5 – próbka [50, 51]

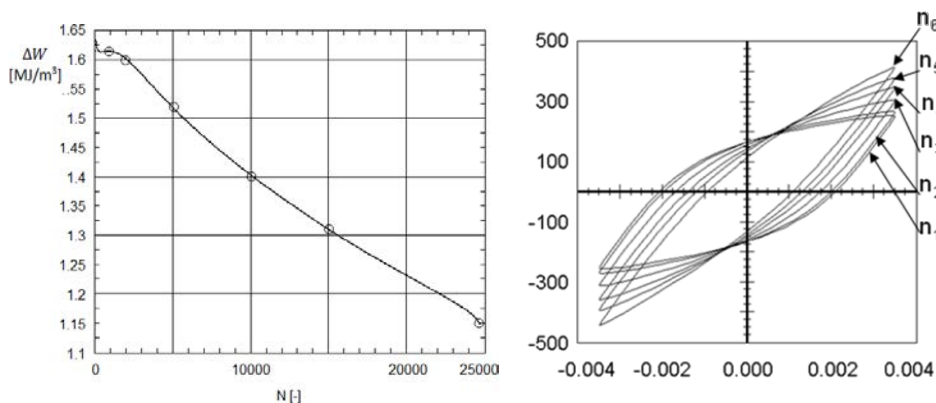
dobranej częstotliwości nie występuje wzrost temperatury na skutek deformacji materiału, co zapobiegało przemianie odwrotnej, czyli martenzyt $\alpha'' \rightarrow$ austenit γ .

Na rysunku 7.76 przedstawiono niskocyklowy fragment wykresu Wohlera oraz rozkład magnetorezystorów po długości próbki. Magnetorezystory były umieszczone równoległe do osi próbki i znajdowały się pomiędzy nożami ekstensometru. Na rysunkach od 7.77 do 7.79 przedstawiono wyniki dla wybranej próbki, dla wymuszenia $\varepsilon_a = 0,0035$. Na rysunku 7.77 przedstawiono zmianę pola pętli histerezy mechanicznej oraz wybrane pętle z całego czasu „życia” próbki. Na rysunku tym naniesiono również symbolicznie punkty odpowiadające wybranym pętlom. Widać, iż pole pętli mechanicznej maleje wraz z liczbą cykli, co podczas sterowania eksperymentem za pomocą odkształcenia całkowitego ε_a , świadczy o umacnianiu się materiału. Umocnienie to związane jest z wydzielaniem się martenzytu α' w osnowie austenitu γ . Badana próbka pękła pomiędzy magnetorezystorami nr 1 i 2, a do momentu pojawienia się pęknięcia została obciążona liczbą $N = 24723$ cykli. W tym obszarze wydzieliło się najwięcej martenzytu, co można stwierdzić na podstawie analizy widma oraz przebiegów średnich sygnałów magnetycznych przedstawionych na rysunku 7.78. Przyjmując, jak poprzednio, iż ilość wydzieleni martenzytu jest silnie skorelowana z wartością bezwzględną sygnału natężenia pola magnetycznego H_m , łatwo zauważyć, iż w przypadku magnetorezystorów 1 i 2 wartość tego sygnału jest największa.

Na wykresach widma magnetycznego z czterech magnetorezystorów (rys. 7.78) można zaobserwować ponadto trzy charakterystyczne obszary; od lewej strony wykresu: pierwszy, w którym materiał jest jednofazowy (paramagnetyczny auste-



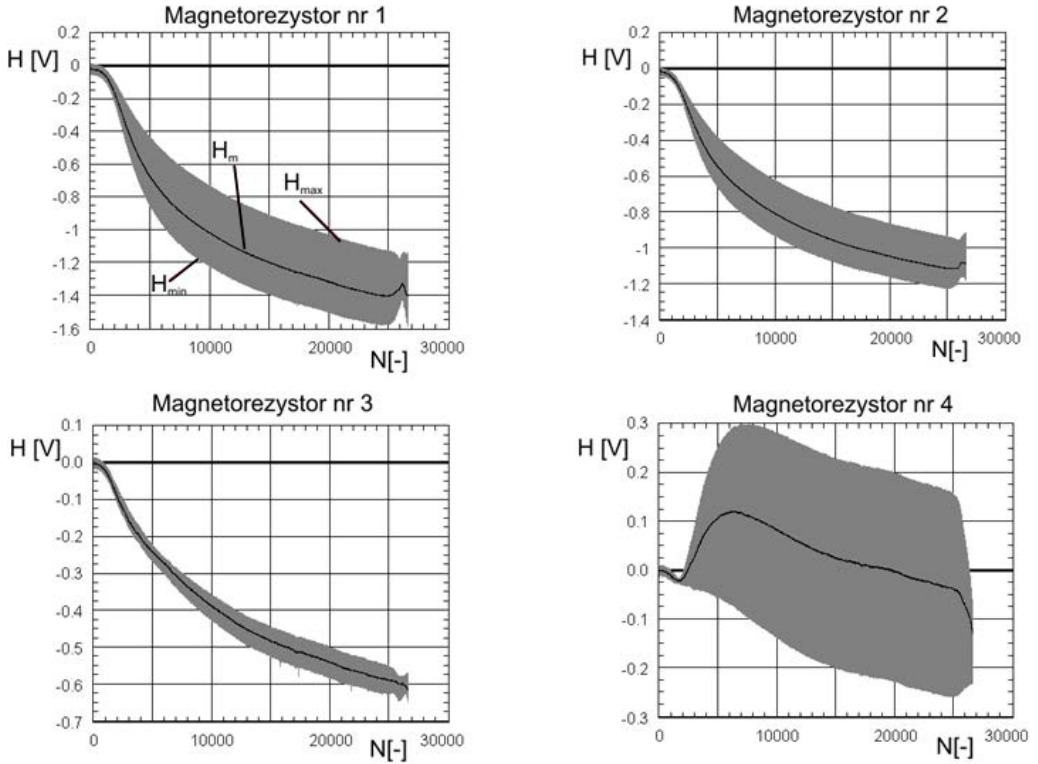
Rys. 7.76. Fragment wykresu Wohlera oraz rozkład magnetorezystorów wzdłuż próbki [51]



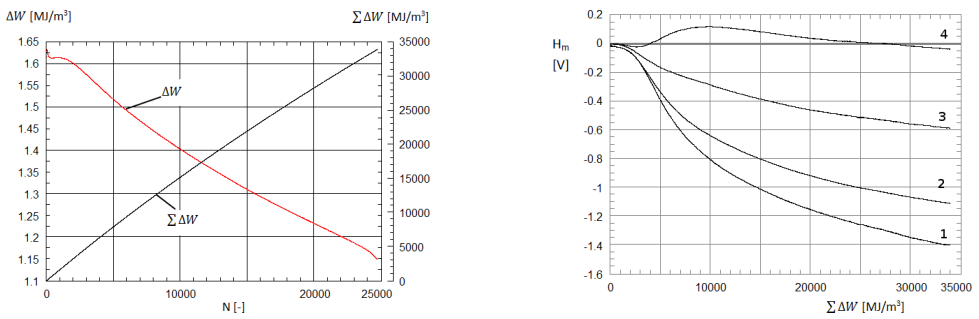
Rys. 7.77. Pole pętli histerezy mechanicznej wraz z wybranymi pętlami ($n_1 = 1000$; $n_2 = 2000$; $n_3 = 5000$; $n_4 = 10000$; $n_5 = 15000$; $n_6 = 24723$) [51]

nit γ) do $N = 1000$ cykli, następnie drugi obszar, w którym następuje wydzielanie się martenzytu α' pod wpływem odkształceń i trzeci obszar, od około 24 000 cykli, czyli od pojawienia się pierwszych pęknięć w próbce, aż do jej zerwania.

Równoległe przeprowadzono pomiar energii odkształcenia plastycznego ΔW oraz jej kumulacji $\Sigma\Delta W$, (rys. 7.79). Pomiar w tym przypadku należy odnieść do całej walcowej części próbki. Utrzymując, iż ilość wydzielenia martenzytu po długości próbki jest skorelowana z dystrybucją energii ΔW i $\Sigma\Delta W$, wyznaczono eksperymentalnie zależność $H_m(\Sigma\Delta W)$ (rys. 7.80). Zależność tę będzie można wykorzystać do modelowania procesu kumulacji energii z uwzględnieniem jej niejednorodności wzdłuż próbki.



Rys. 7.78. Widmo sygnałów magnetycznych dla poszczególnych magnetorezystorów [50, 51]



Rys. 7.79. Pole pętli histerezy oraz suma pól pętli histerezy w funkcji liczby cykli [51]

Rys. 7.80. Natężenie średnie sygnału magnetycznego w funkcji sumy pola histerezy mechanicznej [51]

Wnioski

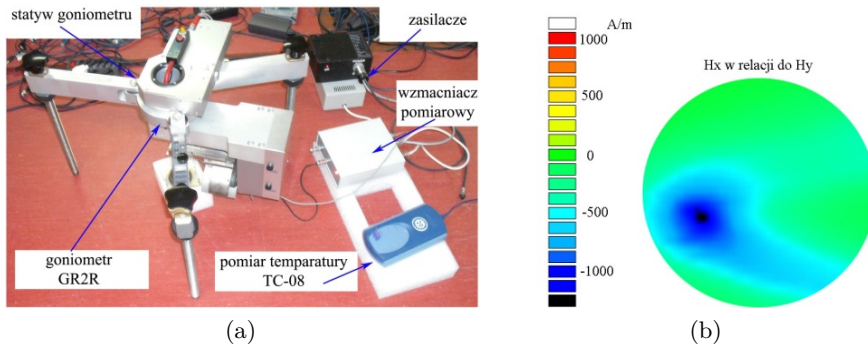
- Zastosowana metoda pomiaru natężenia pola magnetycznego umożliwiła wykrycie i przyrost fazy ferromagnetycznej (martenzyt α'), lokalnie wzdłuż długości próbki masywnej, w miarę narastania liczby cykli obciążenia.
- Wykazano możliwość wykrycia niejednorodnego wydzielania martenzytu po długości, lokalizacji procesu (miejsce pojawienia się pierwszych pęknięć) oraz momentu „startu” przemiany (liczby cykli, po której rozpocznie się proces przemiany fazowej).
- Rozkład sygnału H_m posłużył do ilustracji dystrybucji energii odkształcenia próbki $\Sigma\Delta W$ wzdłuż jej długości.

7.7.2. Badanie procesu wydzielania fazy martenzytycznej z rejestracją sygnału magnetycznego w obiektach walcowych i kulistych

Poprzednio, poszukując wydzielen martenzytu, w przypadku próbek walcowych rejestrowano wartości pola magnetycznego w czterech punktach wybranej tworzącej, czyli tak, jak gdyby był to obiekt klasy 1D. Przemiana martenzytyczna indukowana odkształceniem plastycznym dla obiektów 3D zachodzi w inny sposób niż w przypadku obiektów 1D oraz 2D [50, 62]. Dlatego celem przedstawionej w dalszej części pracy było zbadanie przydatności metody magnetowizyjnej do wykrywania przemiany martenzytycznej w próbkach masywnych ogólnie typu 3D, np. na obiektach kulistych i walcowych [52, 89].

Na potrzeby badań zaadaptowano 3-osiowy goniometr (rys. 7.81a), dzięki któremu możliwe stało się skanowanie we współrzędnych cylindrycznych i sferycznych. Goniometr, wraz z dedykowanym oprogramowaniem G2R-Mag, umożliwiał przeprowadzenie pomiaru trzech składowych pola magnetycznego tylko jednym czujnikiem, zapewniając tym samym dokładne pozycjonowanie, określenie poszczególnych składowych wektora pola magnetycznego i odczyt pozycji w punktach skanowania. W efekcie z dyskretnych punktów, otrzymanych w trakcie pomiaru i z wykorzystaniem technik interpolacyjnych, utworzono obraz o wystarczająco wysokiej rozdzielczości do wskazania miejsca występowania fazy martenzytycznej (rys. 7.81b).

Szczegółowy opis skanera dla obiektów 3D nie jest tutaj przytoczony. Warto jedynie podkreślić, iż wykazanie przydatności goniometru do stworzenia skanera wymagało w szczególności między innymi określenia, na podstawie pomiarów kalibracyjnych – zarówno kinematyki i maksymalnego przemieszczenia poszczególnych osi, jak i wskazania miejsca tzw. chwilowego środka obrotu goniometru, w celu umieszczenia tam czujnika magnetorezystancyjnego. Ponadto potwierdzono, stosując pomiar dystrybucji pola magnetycznego wokół przewodu z przepływającym



Rys. 7.81. a) widok stanowiska pomiarowego z wykorzystaniem goniometru, b) mapa dystrybucji pola magnetycznego w wyniku skanowania powierzchni próbki wykonanej ze stali 0H18N9T [52, 89]

kierunkowo prądem o zadanej wartości natężenia, możliwość orientacji sensora magnetycznego względem obiektu badanego i możliwość wykonania skanowania dla różnych położeń czujnika. Wykonano też prototyp systemu 16-modułowego do obsługi wielosensorowych głowic z czujnikami magnetycznymi oraz czujnikami wspomagającymi proces skanowania, wykorzystując wewnętrzne czujniki modułu typu USB DrDaq. Dodatkowo rozpatrzono szczegółowo dwa przypadki transmisji danych. Uzyskano ponadto symultaniczną pracę wszystkich przetworników ADC w modułach, przez wykorzystanie tzw. wielowątkowości.

Wykazano w ten sposób przydatność zastosowania metody magnetowizyjnej do wyznaczania fazy martenzytycznej, w austenicie, w obiektach kulistych i walcowych, w następstwie obciążeń cyklicznych. Z otrzymanych we współrzędnych biegunowych map dystrybucji pola magnetycznego, po przekształceniu na współrzędne kartezjańskie i zastosowaniu interpolacji, można wygenerować czytelne obrazy magnetyczne ujawniające miejsca powstania fazy martenzytycznej.

7.7.3. Badania atermicznej przemiany martenzytycznej w foliach z austenitu

Dalej rozważono z kolei problem atermicznej przemiany martenzytycznej w próbkach z folii austenitycznej grubości 0,05 mm. Szczegółowo problem opisano w pracach [43, 64, 90, 91]. Celem pracy były odpowiednio:

- Analiza kinetyki zmian wielkości mechanicznych i magnetycznych w procesie quasi-statycznego odkształcania folii z austenitu metastabilnego, w następstwie czego dochodzi do atermicznej przemiany martenzytycznej.

- Sprawdzenie przydatności stanowiska pomiarowego, którego głównym podzespołem była zminiaturyzowana maszyna wytrzymałościowa oraz układ rejestracji i przetwarzania wielkości mechanicznych i magnetycznych.

Badanie materiału w postaci cienkich folii jest przedsięwzięciem trudnym pomiarowo. Niezbędne jest wówczas uwzględnienie następujących uwarunkowań i wymagań, a mianowicie:

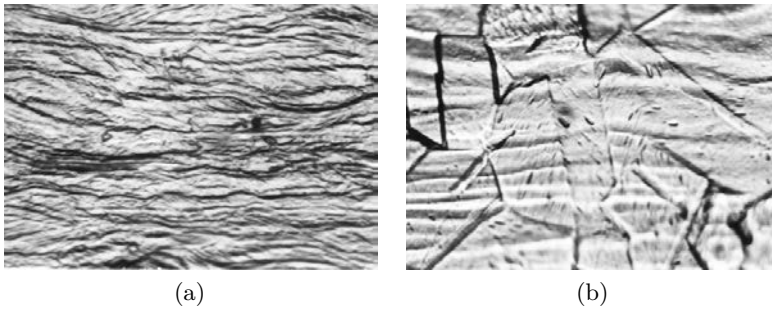
- Niewielkie wymiary próbek (przekrój części roboczej w analizowanym przypadku wynosił $0,195 \text{ mm}^2$, czyli ok. 290 razy mniej niż dla próbki walcowej). Powoduje to konieczność zadawania siły z dokładnością $0,1 \text{ N}$. Kluczowe znaczenie ma również sposób mocowania próbek, sterowania obciążeniem oraz rejestracji sygnałów pomiarowych zarówno mechanicznych, jak i magnetycznych.
- Stworzenie możliwości prowadzenia badań strukturalnych w trybie on-line (w trakcie obciążania materiału próbki). Wymaga to budowy zminiaturyzowanej maszyny wytrzymałościowej o masie poniżej 1000 g , umożliwiającej przeprowadzenie eksperymentu na przykład w komorze próżniowej mikroskopu skaningowego.
- Konieczność pomiaru natężenia pola magnetycznego w celu wykrycia inicjacji i przyrostu ferromagnetycznego martenzytu α' . Niewielkie przyrosty ΔH wymagały eliminacji zaburzeń pola z tytułu zarówno przepływu prądu przez tensometr, jak i podzespołów maszyny wytrzymałościowej wykonanych z materiału ferromagnetycznego.

Obiektem badań była stal austenityczna 304L. Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe stali w stanie dostawy przedstawiono w tabeli 7.7.

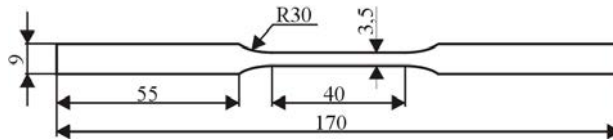
Tabela 7.7. Skład stali 304L w stanie dostarczenia

Materiał	Zawartość pierwiastków [%]								
	S	Cr	N	Si	Fe	Ni	C	P	Mn
SS 304L	0,0008	18,5	0,05	0,44	BAL	9,88	0,012	0,027	1,85

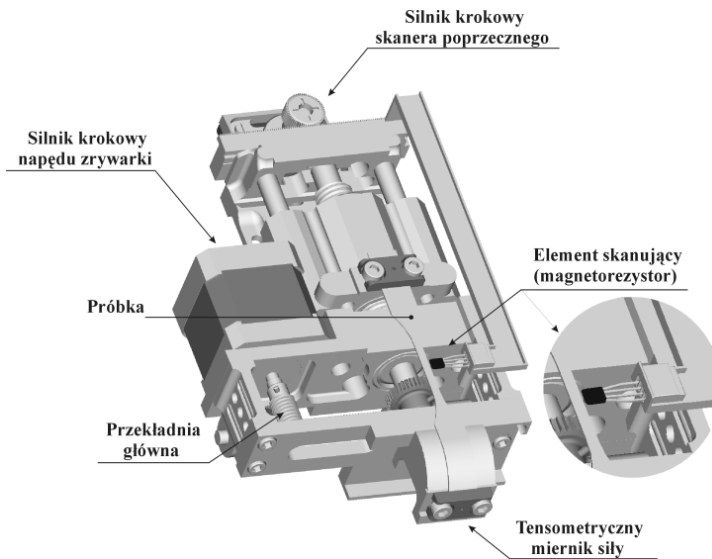
Materiał dostarczono w postaci folii grubości $0,05 \text{ mm}$ w stanie oznaczonym przez producenta jako $1/8-1/4$ twardości. Folię poddano obróbce cieplnej, której celem była rekrytalizacja. Obróbka polegała na nagraniu próbki do temperatury przesycań, tj. około $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, i następnie szybkiego schłodzenia próbki w powietrzu. Do obróbki cieplnej próbek wykorzystano zbudowane specjalnie do tego celu stanowisko składające się ze źródła napięcia (autotransformatora) oraz urządzeń pomiarowych do kontroli temperatury, prądu i napięcia. Strukturę materiału w stanie dostawy i po obróbce cieplnej przedstawiono na rysunkach 7.82a i 7.82b. Kształt i wymiary próbki przedstawiono z kolei na rysunku 7.83.



Rys. 7.82. Struktura stali 304L (powiększenie $\times 1000$):
a) przed obróbką cieplną, b) po obróbce cieplnej [43]



Rys. 7.83. Kształt i wymiary próbki [43, 64]



Rys. 7.84. Budowa mikrozywarki wraz z opisem istotnych komponentów [43, 64, 92]

Głównym podzespołem była zminiaturyzowana maszyna wytrzymałościowa (mikrozywarka) przedstawiona na rysunku 7.84.

Obciążenie realizowano za pomocą układu zawierającego precyzyjną śrubę pociągową, przekładnię ślimakową oraz silniki krokowe sterowane numerycznie.

Napęd umożliwiał przemieszczanie szczęk z prędkością 0,095–0,0005 mm/min. Drugi układ zapewniał ruch (poprzeczny), umożliwiając przemieszczanie czujnika. Układ pomiarowy ułatwiał rejestrację sygnałów mechanicznych (siły $F(t)$, przemieszczenia $\Delta l(t)$, odkształcenia $\varepsilon(t)$) oraz zmiany natężenia pola magnetycznego $\Delta H(t)$ [43, 64, 90, 92]. Do obróbki sygnału wykorzystano pakiet pomiarowy Agilent VEE oraz MATLAB.

Określenie ilościowej zawartości fazy martenzytycznej w materiale jest istotne, np. podczas doboru parametrów technologicznych procesu obróbki plastycznej lub spawania. Są metody, które umożliwiają wyznaczenie zawartości fazy martenzytycznej w warunkach bądź laboratoryjnych, bądź przemysłowych. Do badań niszczących można zaliczyć:

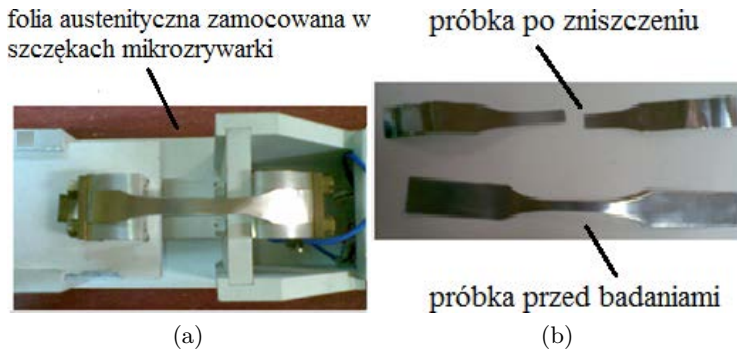
- mikroskopie optyczną, np. z wykorzystaniem kontrastu fazowego,
- metody mikroskopii elektronowej, z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego (SEM),
- metody rentgenowskie.

Jedną z efektywniejszych metod określania ilości austenitu szczątkowego w stalach jest metoda rentgenowska. Polega ona na zbadaniu wzajemnego stosunku intensywności refleksów promieni Rentgena od poszczególnych faz, które uległy dyfrakcji na sieci krystalicznej badanej stali. Promienie Rentgena ulegają dyfrakcji na ich sieciach krystalicznych pod różnymi kątami Bragga. Ułatwia to identyfikację tych faz w stali i obliczenie ich procentowej zawartości, w tym również austenitu szczątkowego. Dlatego prowadzono badania zarówno metodą magnetyczną, jak i dyfraktometrem. W pomiarach wykorzystano mikrozrywarkę, folia umieszczona w szczękach została poddana kontrolowanemu procesowi odkształcenia plastycznego. Na rysunku 7.85a zamieszczono zdjęcie folii austenitycznej zamocowanej w szczękach urządzenia pomiarowego, a na 7.85b przedstawiono zdjęcia próbki przed i po eksperymencie, w którym ta uległa zerwaniu.

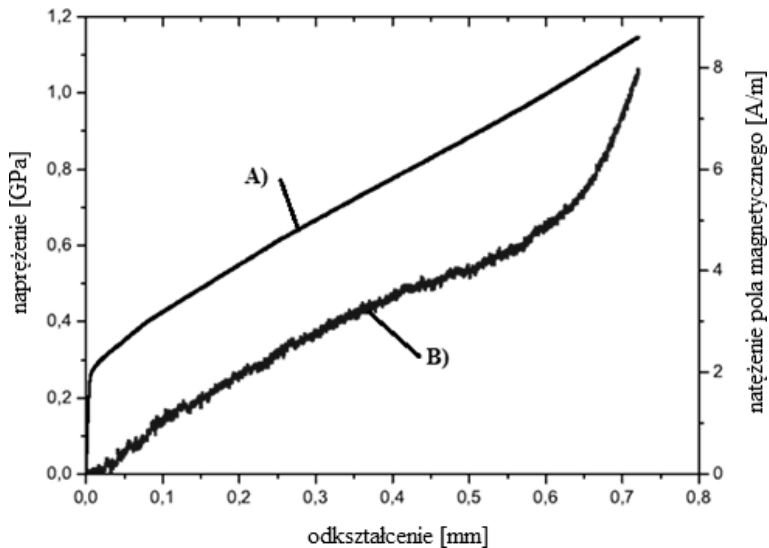
Na rysunku 7.86 przedstawiono krzywą rozciągania (a) oraz jej magnetyczną odpowiedź (b) dla badanej folii austenitycznej. Wzrost sygnału magnetycznego jest konsekwencją pojawienia się i zwiększenia udziału martenzytu α' , będącego materiałem ferromagnetycznym w paramagnetycznej osnowie austenitycznej.

Badania folii przeprowadzono także dyfraktometrem XStress 3000. Próbkę naświetlano przy różnych wartościach odkształcenia. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 7.87.

Wykazano więc, że zmiany właściwości magnetycznych materiału w wyniku jego odkształcenia są miarą kinetyki badanej przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym [43, 64, 90]. Jak wykazano we wcześniejszych pracach [64, 90, 91], pierwsze zarodki martenzytu pojawiają się po przekroczeniu wartości



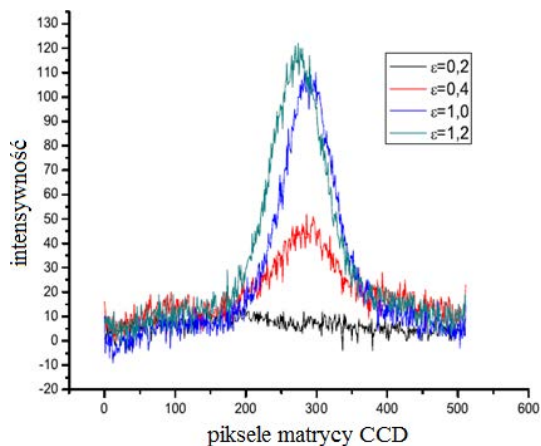
Rys. 7.85. Cienkie folie austenityczne: a) próbka umieszczona w szczękach mikrozywarki, b) próbka przed pomiarem i po zerwaniu [43, 64]



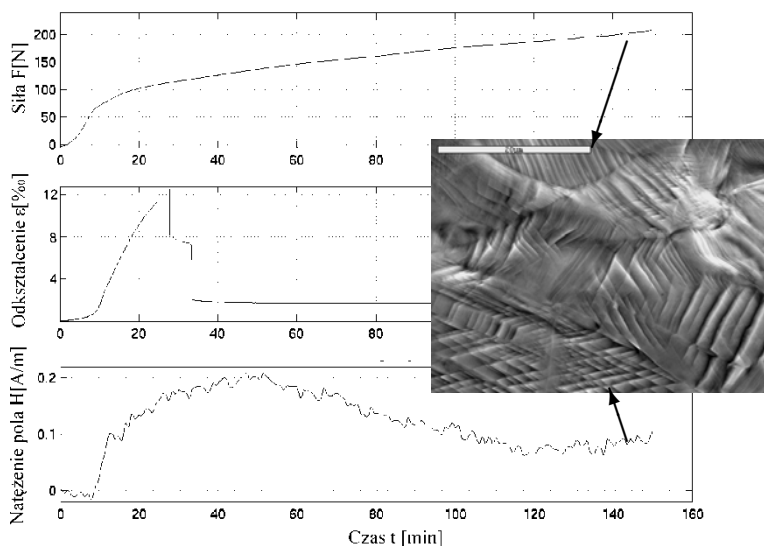
Rys. 7.86. Wyniki odkształcania plastycznego próbki z folii austenitycznej: krzywa quasi-statycznego odkształcania materiału, odpowiedź magnetyczna próbki na odkształcanie plastyczne [39, 50]

$\varepsilon = 0,035$, co jest rejestrowane zarówno przez czujniki pola magnetycznego, jak i dyfraktometr XStress 3000.

Próbki foliowe obciążano z prędkością 0,035 mm/min. W początkowej fazie każdego eksperymentu dążono do wstępnego, nieznacznego naprężenia próbki w celu likwidacji jej „pofałdowania”. Następnie realizowano eksperyment właściwy, aż do momentu zerwania próbki, rejestrując sygnały mechaniczne i magnetyczne.



Rys. 7.87. Obrazy uzyskane z matrycy CCD: Zmiana intensywności widma dla wybranych poziomów odkształcenia [39, 50]



Rys. 7.88. Charakterystyki $F = f(t)$, $\varepsilon = f(t)$, $H = f(t)$. Stal 304L, prędkość 0,035 mm/min. Dodatkowo obraz struktury materiału w końcowej fazie odkształcenia (mikroskop skaningowy) [43]

Na rysunku 7.88 przedstawiono eksperymentalne zależności siły $F(t)$, odkształcenia $\varepsilon(t)$ oraz natężenia pola magnetycznego $H(t)$. Należy podkreślić, iż sygnał odkształcenia mógł być mierzony jedynie do wartości $\varepsilon \approx 0,0012$, po osiągnięciu której czujnik uległ zniszczeniu.

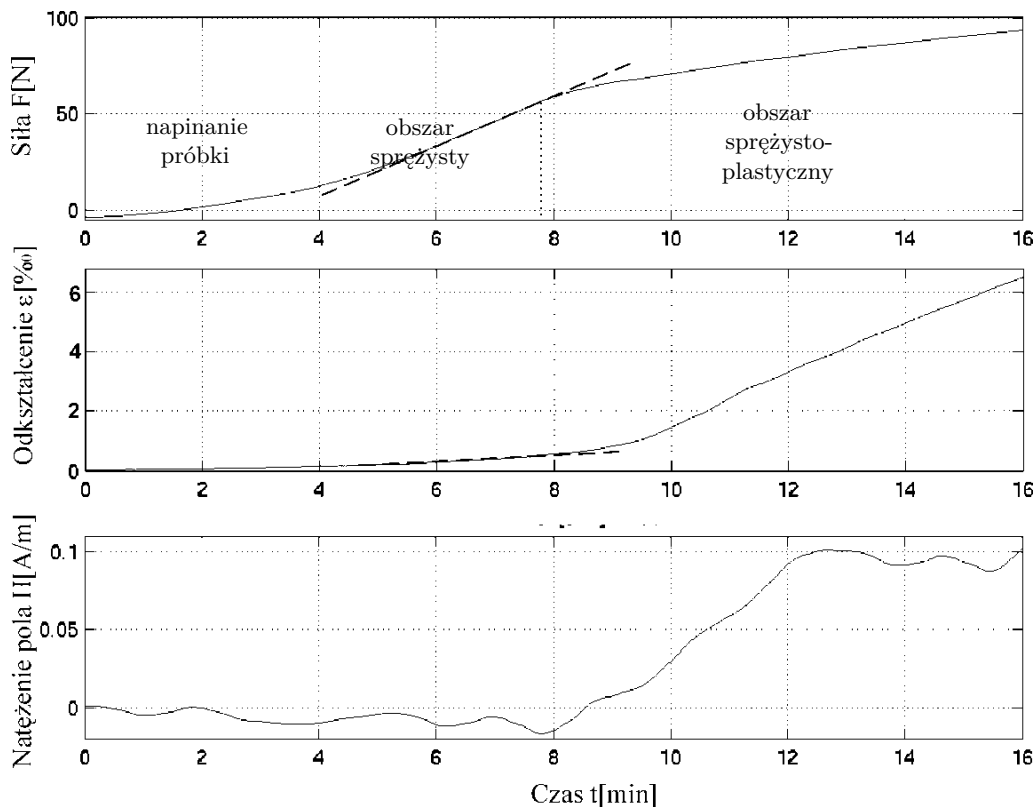
Analiza sygnałów w początkowej fazie odkształcania jest bardziej czytelna, jeżeli zaprezentuje się przebiegi np. do chwili $t = 16$ minut (rys. 7.89). Możliwe jest wówczas wydzielenie kilku faz procesu. Pierwszy etap zachodzi w przedziale czasu $0 \leq t \leq 3,7$ minuty i związany jest z napinaniem folii. W przedziale z kolei $3,7 \leq t \leq 7,8$ minuty następuje sprężyste obciążanie materiału. Sygnał siły zmienia się liniowo (poza krótkim okresem przejściowym, i towarzyszy mu również liniowa zmiana odkształcenia. Wartość sygnału $H(t)$ jest równa zero, jeżeli pominąć drobne fluktuacje związane z metodą pomiaru.

W chwili $t \approx 7,8$ minuty obserwuje się zagięcie przebiegu siły oraz zmianę kąta nachylenia przebiegu $\varepsilon(t)$, co świadczy o występowaniu granicy plastyczności. Jest to również początek wyraźnego i stałego wzrostu sygnału $H(t)$, co świadczy z kolei o pojawieniu się fazy ferromagnetycznej (martenzyt α'). Trudno jednocześnie rozdzielić na wykresie granicę plastyczności od wartości σ_M , przy której następuje inicjacja przemiany fazowej. Dalsze zwiększenie odkształcenia w obszarze plastycznym skutkuje przyrostem wartości $H(t)$, aż do chwili $t \approx 50$ minut, a następnie zmniejszeniem. Oznacza to z jednej strony przyrost ilości martenzytu α' , a z drugiej narastającą blokadę ruchu domen.

Aktualnie prowadzone są badania dotyczące statycznego odkształcania z równoczesną obserwacją zmian w strukturze. Na rysunku 7.88 zamieszczono przykładowy obraz struktury materiału z końcowej fazy odkształcania folii.

Wnioski

- W folii grubości 0,05 mm wykonanej z metastabilnej stali austenitycznej 304L dochodzi do atermicznej przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym tak jak w materiale litym. Świadczy o tym przebieg sygnału magnetycznego $H(t)$, którego narastanie zaobserwowano w następstwie wystąpienia fazy ferromagnetycznej (martenzyt α') i zarejestrowanie w związku z tym efektu Villariego.
- Skonstruowana i wykonana sterowana numerycznie maszyna wytrzymałościowa o masie 800 g, wraz z układem pomiarowym wielkości mechanicznych i magnetycznych wykazała pełną przydatność do badań przemiany fazowej w próbkach foliowych. Urządzenie zapewnia możliwość odkształcania materiału, rejestracji sygnałów mechanicznych i krzyżowych oraz równoczesnej obserwacji zmian strukturalnych w celu ilościowej oceny narastania fazy martenzytycznej.
- Przemiana martenzytyczna w tak cienkich austenitycznych taśmach objawia się występowaniem bardzo małego natężenia pola magnetycznego (maksymalnie dochodzącego do 0,2 A/m), będącego na granicy maksymalnej rozdzielczości pomiarowej magnetorezystorów. Należy zastanowić się nad zastosowaniem innej dokładniejszej metody pomiaru pola magnetycznego, uwzględniając



Rys. 7.89. Charakterystyki $F = f(t)$, $\varepsilon = f(t)$, $H = f(t)$.
Stal 304L, prędkość 0,035 mm/min (powiększenie) [18, 43]

detektory SQUID. Dodatkowo wykazano doświadczalnie, że wraz ze wzrostem temperatury, maleje czułość czujników magnetorezystancyjnych.

7.8. Znaczenie magnetowizji w monitorowaniu procesów technologicznych

Dalej zaprezentowano przykłady zastosowań magnetowizji w procesach technologicznych oraz w badaniach dystrybucji silnych pól magnetycznych, np. wokół magnesów. W szczególności rozważono przydatność wytworzonej aparatury do:

- badań procesu tłoczenia blach,
 - testowania obiektów w zakresie silnych pól magnetycznych (magnesy),
 - demagnetyzacji termicznej przemysłowych magnesów trwałych,
 - degradacji materiałów na skutek gwałtownego cyklicznego przemagnesowania.
- Zagadnienia te rozpatrzono sukcesywnie w dalszej części pracy.

7.8.1. Zastosowanie kamery magnetowizyjnej w badaniach procesu tłoczenia blach

Dalej zaprezentowano kamerę magnetowizyjną w badaniu tłoczenia blachy ferromagnetycznej. Przegląd literatury przedmiotu wykazał, że pomimo ustawicznych, wieloletnich prac badawczych dotyczących procesu głębokiego tłoczenia, brak jest nadal spójnej, zadowalającej teorii umożliwiającej przewidywanie momentu utraty stateczności w blachach. Poza tym wszystkie opracowane metody doświadczalne są przystosowane do ciągłego diagnozowania procesu technologicznego tłoczenia. Zastosowanie kamery magnetowizyjnej wypełnia tę lukę, ułatwiając dokładne i szybkie określenie poprawności technologicznej procesu, a nawet ograniczenie wpływu tzw. sprężynowania powrotnego blach. Magnetowizja umożliwia ponadto ciągle monitorowanie procesu tłoczenia. Wielopunktowy pomiar pola magnetycznego wokół wytłoczki dostarcza wielu bardzo istotnych danych o zjawiskach zachodzących w procesie tłoczenia.

Wielkość odkształcenia, jakiego może doznać blacha w operacji głębokiego tłoczenia, jest limitowana. Graniczną wartością tego odkształcenia, które wywołuje utratę stateczności blachy, uważa się za miarę tłoczności. Utrata stateczności jest zjawiskiem złożonym i może być określana różnymi metodami. Jedną z najbardziej znanych została zaproponowana przez Heckera [93]. Wyróżnił on w pękniętej wytłoczce trzy rodzaje okręgów. Mierząc odpowiednie odkształcenia okręgów pękniętych z przewężeniem i odkształconych równomiernie, nanosi się je na wykres odkształceń głównych ε_1 – ε_2 . Wykreślając następnie krzywą oddzielającą okręgi równomiernie odkształcone od pozostałych, otrzymuje się krzywą odkształceń granicznych (KOG) między polem bezpiecznym a polem zniszczenia wytłoczki.

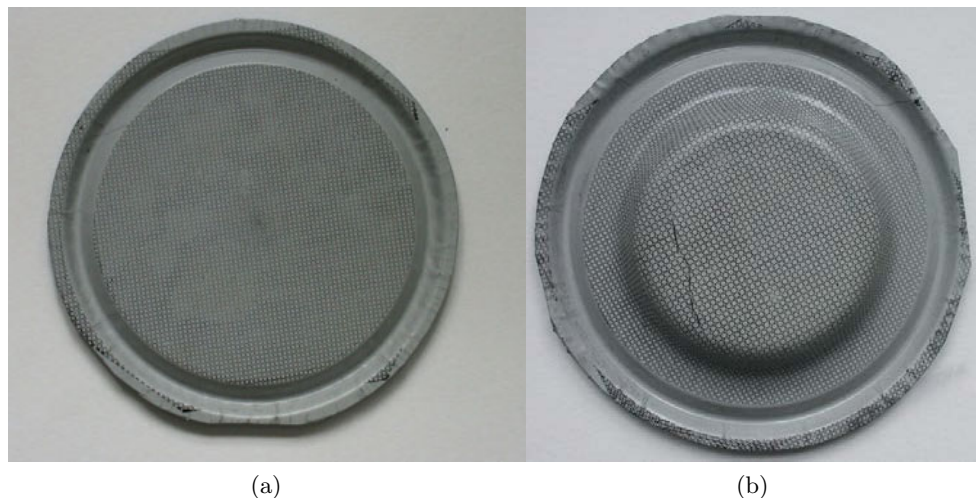
W dalszej części zaproponowano metodę określania momentu utraty stateczności [18, 63], opartą na badaniach właściwości magnetycznych blachy tłoczonej. Wykorzystuje się w tym celu efekt magnetomechaniczny (efekt Villariiego) [37, 49, 54, 55, 69] występujący podczas odkształcania blachy. Mierząc precyzyjnie odpowiednie składowe wektora natężenia pola magnetycznego wytłoczki, można wyznaczyć dokładnie moment utraty stateczności blachy.

Do badań użyto blachy grubości 0,55 mm, wykonanej ze stali 08X. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe oraz skład chemiczny badanego materiału zestawiono w tabeli 7.8.

Podczas badań wykorzystano przyrząd do tłoczenia zaopatrzonej w płaski stempel oraz próbki z bocznymi wycięciami wraz z odpowiednio dobranymi podkładkami. Widok próbki bez wycięć przed i po eksperymencie został przedstawiony na rysunku 7.90. Umożliwiło to ukierunkowanie miejsca pęknięcia próbek w środkowej części wytłoczki tam, gdzie mierzone było pole magnetyczne. Wynikiem

Tabela 7.8. Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe badanej stali

Materiał	Skład chemiczny [%]								Właściwości wytrzymałościowe		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	R_e MPa	R_m MPa	A_5 %
08X	0,08	0,27	0,50	0,006	0,018	–	–	–	205	335	31



Rys. 7.90. Próbką przed i po badaniu (z widocznym pęknięciem) [18, 94]

kończącym było opracowanie metody wyznaczania utraty stateczności blachy na podstawie analizy wyników pomiarów magnetycznych.

Wymuszenie realizowane było za pomocą pulsatora hydraulicznego firmy MTS model MTS-810. Parametrem sterującym procesem obciążania próbki było przemieszczenie. W trakcie pomiarów blachę tłoczono ze stałą prędkością równą $v = 1 \text{ mm/min}$, aż do pęknięcia próbki.

System kamery magnetowizyjnej zbierał dane z głowicy pomiarowej i nadzorował jej pracę. Niezależnie dokonywano rejestracji sygnałów mechanicznych (siły oraz przemieszczenia), stosując kartę pomiarową DT3004 firmy Data Translation.

Stanowisko pomiarowe z wykorzystaniem jednego czujnika pola magnetycznego

W badaniach nad wyznaczeniem momentu utraty stateczności w procesach tłoczenia blach zastosowano metodę realizacji złożonych stanów odkształcenia, stosowaną do wyznaczania wykresów odkształceń granicznych (WOG). W metodzie



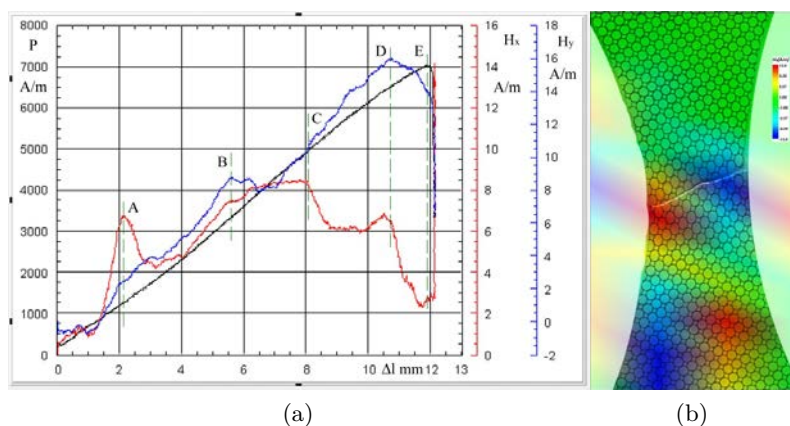
Rys. 7.91. a) widok sensora pola magnetycznego umieszczonego w środku stempla, b) układ pomiarowy pola magnetycznego umieszczony w pobliżu sensora [63, 96]

tej wykorzystuje się próbki mające boczne kołowe wycięcia oraz stempel zakończony płaskim dnem. Dla próbek zbliżonych stanem odkształcenia do dwuosowego równomiernego rozciągania wykorzystano sposób opracowany przez Z. Marciniaka [95], polegający na jednoczesnym tłoczeniu krążka z blachy wraz z pierścieniową podkładką, utwierdzoną na obrzeżu.

Stanowisko badawcze dla prób tłoczenia wymagało umieszczenia, w niewielkiej odległości od próbki zamocowanej w przyrządzie do tłoczenia, sensora pola magnetycznego. Początkowo układ pomiarowy pola magnetycznego umieszczono w przestrzeni podstawy przyrządu, ale okazało się, że odległość sensora od próbki jest zbyt duża, a w wyniku ruchu matrycy z podstawą, ta odległość, zmieniając się, powodowała znaczne zmiany sygnału magnetycznego. Postanowiono umieścić sensor w stemplu, wykorzystując jego pustą przestrzeń odpowietrzacza, tak jak jest to pokazane na rysunku 7.91a.

Analizując poszczególne punkty charakterystyczne na rysunku 7.92 (A, B, C, D, E) sygnału magnetycznego, można wyznaczyć dla każdej próbki moment utraty stateczności (punkt D), a także określić wielkość zadanej siły. Na rysunku 7.90b przedstawiono miejsce pęknięcia próbki z blachy z nałożoną mapą dystrybucji pola magnetycznego uzyskaną z zastosowaniem kamery magnetowizyjnej, co zostanie przedstawione w następnym podrozdziale.

Opracowano metodę określania utraty stateczności blach na podstawie sygnału z jednego czujnika magnetycznego, umieszczonego w dnie stempla przyrządu do tłoczenia, opierając się na analizie charakterystycznych, powtarzalnych dla danego typu próbek, obszarów widocznych na sygnale magnetycznym. Stwierdzono, że użycie tylko jednego sensora pola magnetycznego jest niewystarczające, ponieważ



Rys. 7.92. a) wyniki pomiarów przedstawiające poszczególne fazy procesu tłoczenia, b) widok próbki po zerwaniu z naniesioną mapą pola magnetycznego [63, 96]

wyniki określania momentu i miejsca utraty stateczności zależą od odległości sensora od miejsca powstania bruzdy. Rezultaty były tym lepsze, im sensor był bliżej miejsca inicjacji bruzdy. Zastosowanie kamery magnetowizyjnej rozwiązuje ten problem ze względu na jej wielosensorową budowę.

Stanowisko pomiarowe z wykorzystaniem kamery magnetowizyjnej

Przygotowanie eksperymentów z zastosowaniem kamery wymagało wielu zabiegów związanych ze sposobem umieszczenia głowicy kamery w środku przyrządu. Najważniejsze było zapewnienie stałej odległości sensorów od powierzchni próbki. Udało się to zrealizować bez ingerencji w konstrukcję narzędzia do tłoczenia. Przez istniejące otwory w podstawie przepuszczono szerokie aluminiowe ramię i zamocowano je do obu kolumn maszyny wytrzymałościowej (rys. 7.93). Dzięki małej wysokości głowicy magnetowizyjnej (100 mm) uzyskano maksymalny ruch matrycy z podstawą, wynoszący 35 mm, zupełnie wystarczający do przeprowadzenia eksperymentów.

W celu zabezpieczenia głowicy przed uszkodzeniem zastosowano krążek z pleksi grubości 1,5 mm (rys. 7.93). Grubość krążka wpływała bezpośrednio na odległość sensorów od próbki; starano się, aby nie przekroczyła ona maksymalnie 2 mm.

W celach kontrolnych, w przeprowadzonych badaniach, oprócz kamery magnetowizyjnej, wykorzystano sensor pola magnetycznego umieszczony w stemplu. Dzięki niemu możliwe było porównanie wskazań dwóch różnych systemów pomiarowych użytych w eksperymentach.

Podczas eksperymentu wykorzystano następujące urządzenia i aparaturę pomiarową:



Rys. 7.93. Widok stanowiska badawczego z wykorzystaniem kamery magnetowizyjnej [63, 96]

- pulsator hydrauliczny MTS 810,
- magnetorezystancyjny układ pomiaru pola magnetycznego (z sensorem umieszczonym w stemplu),
- kartę pomiarową DT 3004 firmy Data Translation zainstalowaną w komputerze PC,
- system kamery magnetowizyjnej, której elementami były:
 - głowica pomiarowa zawierająca 48 sensorów pola magnetycznego,
 - zaawansowana karta z procesorem DSP firmy Hunt Engineering UK, zainstalowana w komputerze PC,
 - oprogramowanie firmy Hunt Engineering i Texas Instruments.

System kamery magnetowizyjnej zbierał dane z głowicy pomiarowej i nadzorował jej pracę. Niezależnie drugi komputer z kartą pomiarową DT 3004 rejestrował sygnały pochodzące z czujnika pola magnetycznego w stemplu i z pulpitu ste-

rowniczego pulsatora hydraulicznego MTS, tj. sygnał siły i przemieszczenia (co określa głębokość tłoczenia).

Analiza wyników

Zastosowany system magnetowizyjny dostarczał dane pomiarowe w postaci obrazów pola magnetycznego badanej wytłoczki. Wizualizację sygnałów magnetycznych przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania The MayaVi Data Visualizer. Określona wartość natężenia pola magnetycznego zobrazowana jest kolorem z zakresu od niebieskiego do czerwonego. Oprogramowanie to umożliwia dokładną analizę w postaci filmu pokazującego zachowanie się poszczególnych składowych pola magnetycznego w badanym obszarze próbki. Analizując cały film z kamery magnetowizyjnej (dla danej próbki), możliwa jest wnikliwa ocena zachowania się materiału w trakcie procesu tłoczenia. Po wybraniu sensorów pola magnetycznego można określić dokładnie zmiany składowych natężenia pola magnetycznego, podobnie jak w przypadku pojedynczego sensora, jednak w przypadku głowicy wieloelementowej, niektóre z sensorów znajdowały się bezpośrednio przy pęknięciu. Na tej podstawie wyróżnić możemy punkty odpowiadające określonym zachowaniom materiału wytłoczki w trakcie procesu tłoczenia.

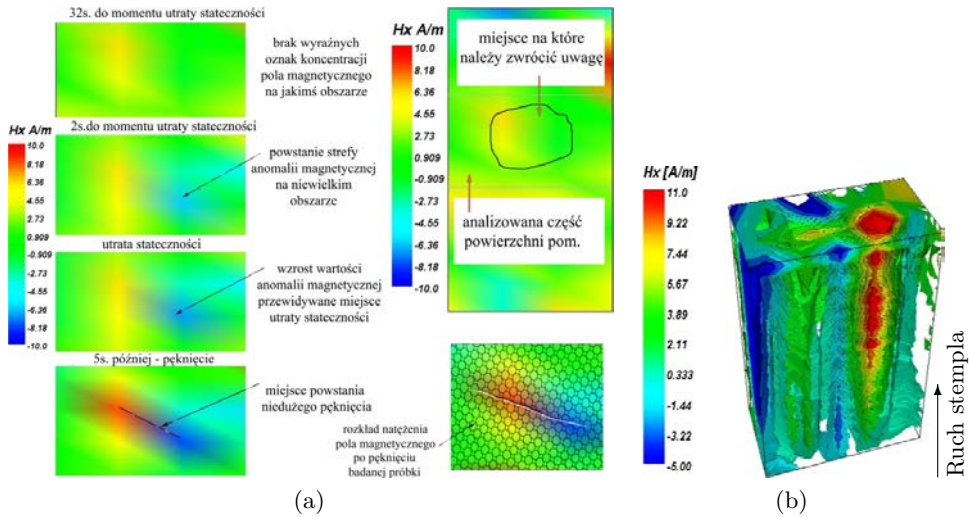
Tak rejestrowane wyniki pomiarów lokalizują miejsca, w których powstają lokalne pocienienia blachy w postaci bruzd świadczących o zaistnieniu utraty stateczności badanego materiału. Za pomocą wizualizacji danych możemy obserwować zmiany wielkości charakterystycznych wektora pola magnetycznego H , czyli: H_x , H_y , $|H|$ oraz ϕ , ale również przyrosty: ΔH_x , ΔH_y , $\Delta |H|$ i $\Delta \phi$.

$$|H| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}, \quad \phi = \arctg\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (7.1)$$

Przeprowadzając analizę obrazów pola magnetycznego, należy zwrócić szczególną uwagę na miejsca, w których pole:

- przybiera maksymalne wartości,
- przybiera minimalne wartości,
- ma wartości bliskie zeru.

Za miejsca powstawania bruzdy przyjęto obszary, w których zarejestrowano niewielką wartość pola magnetycznego i gdzie też widoczny jest stały w czasie trend przyrostu pola magnetycznego. Natomiast magnetyczna interpretacja pęknięcia, zgodnie z pracą [49, 54, 63], polega na pojawieniu się obszarów o przeciwnych wartościach ekstremalnych natężenia pola magnetycznego w niewielkich odległościach. Stąd moment utraty stateczności należy określić jako chwilę, gdy przy stałym kierunku przyrostu pola magnetycznego w analizowanym obszarze pojawia się drugi, ale o przeciwnym znaku. Graficzna interpretacja wyników wizualizacji danych przedstawiona jest na rysunku 7.94a.



Rys. 7.94. Zmiana pola magnetycznego w trakcie tłoczenia blachy [37, 96]

Przedstawiony sposób interpretacji wyników pomiarów magnetycznych obrazuje w sposób bardzo czytelny moment utraty stateczności i pęknięcia próbki. Możliwe jest także pokazanie momentu tworzenia się bruzdy jeszcze za pomocą trójwymiarowych powierzchni, które można analizować w czasie. Przykład takiego sposobu wizualizacji został przedstawiony na rysunku 7.94b. Odpowiednie powierzchnie na tym wykresie odpowiadają stałym wartościom składowej natężenia pola magnetycznego H_x w funkcji drogi odkształcenia dla całego analizowanego procesu tłoczenia.

Reasumując, można stwierdzić, iż:

- Zaproponowano sposób interpretacji wyników wizualizacji oraz analizę wektora natężenia pola magnetycznego. Prezentowana metoda określania momentu utraty stateczności może być zastosowana do określania tłoczności blach, a także diagnozowania procesów w warunkach przemysłowych.
- Dane z głowicy kamery magnetowizyjnej można wizualizować i uzyskać rozkład natężenia pola magnetycznego w postaci map oraz pewnego rodzaju filmu, przedstawiającego zmianę pola magnetycznego podczas procesu tłoczenia.
- Metoda magnetowizyjna określania momentu utraty stateczności potwierdza duże możliwości proponowanej metody. Kamera magnetowizyjna została przewidziana jako nowe narzędzie w nieniszczących badaniach materiałów i technik NDE.

7.8.2. Magnetowizyjna diagnostyka w zakresie silnych pól magnetycznych

Radykalnie zwiększa się zastosowanie silnych magnesów stałych (np. ferrytowych, neodymowych itp.) w konstrukcjach mechanicznych i elektrycznych (silniki, urządzenia pomiarowe, drukarki, kopiarki, podajniki magnetyczne, aktuatory i szerzej urządzenia automatyki przemysłowej). Wprowadzenie tej klasy magnesów na masową skalę zwiększyło znacząco sprawność urządzeń.

Wymusiło to konieczność stworzenia nowych, tanich, szybkich metod diagnostycznych. Magnetowizja oraz jej przydatność w badaniach procesu zmęczenia, pęknięcia, tekstury, historii obciążenia, optymalizacji przeróbki plastycznej i innych [30, 53–55, 69, 97, 98] takie nadzieje stwarzają.

Pomiar defektów w kompozytowych prętach magnetycznych

Celem badań było opracowanie metody do nieniszczącej diagnostyki defektów (mechanicznych i magnetycznych) w masowo stosowanych kompozytowych wałkach magnetycznych. Kompozytowy charakter prętów ma przy tym kluczowe znaczenie. Kompozyt uzyskiwany jest głównie metodami wtrysku, z użyciem proszku i żywicy lub metodą spiekania proszków magnetycznych. Technologie te zapewniają uzyskanie równocześnie: jednorodnego pola po długości pręta, anizotropii właściwości po przekroju oraz zadanej biegunowości pręta po obwodzie (zazwyczaj magnesy cztero- lub ośmiobiegunowe).

Kompozytowy pręt musi zatem mieć dokładny, wręcz „programowany”, charakter pożądanych właściwości, a kontrola produktu stwarza konieczność pomiaru ewentualnych odstępstw, w rezultacie najogólniej rozumianych defektów. Szczególną uwagę poświęcono dlatego możliwości detekcji lokalnego odmagnesowania oraz wystąpienia karbów i pęknięć.

Założono konieczność stworzenia metody badawczej umożliwiającej uzyskanie dużej szybkości skanowania, wysokiej rozdzielczości pomiaru i obrazu, trójosiowej diagnostyki parametrów magnetycznych (H_x , H_y , H_z), oprogramowania umożliwiającego wizualizację jakościową i ilościową pomiarów. Dążono ponadto do rozwiązania ułatwiającego łatwą modyfikację skanera dla innych obiektów (np. płaskich). Kluczowe znaczenie miała również potrzeba pomiaru dużych wartości natężenia pola magnetycznego. Należy ponadto podkreślić, iż innym ważnym obecnie aspektem jest konieczność modelowania krzyżowych efektów magneto-mechanicznych. Wymaga to z kolei metod eksperymentalnych umożliwiających wyznaczanie nie tylko stanu odkształcenia, ale i wyznaczania składowych wektora natężenia pola magnetycznego H dla badanego obiektu.

Skaner silnego pola magnetycznego do obiektów walcowych

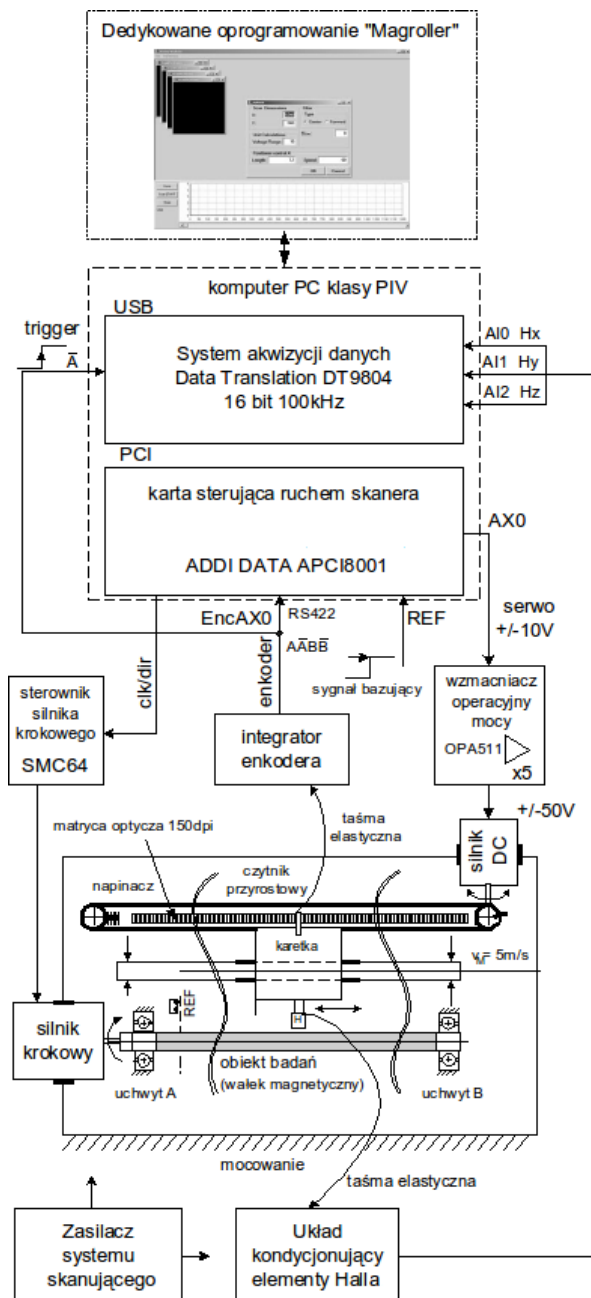
Zastosowanie osi obrotowej podczas skanowania umożliwia precyzyjne skanowanie obiektów osiowo-symetrycznych różnego rodzaju wałków, w tym przypadkach kompozytowych. Schemat skanera w wersji z osią obrotową przedstawiono na rysunku 7.95. System składa się z:

- Mechanizmu tzw. karetki na prowadnicy ślizgowej, równoległej do osi badanego obiektu (wałka). Karetka przesuwana się wzdłuż, generując sygnał pomiaru drogi przez układ laserowego czytnika i matrycy optycznej (rozdzielczość pomiaru – 600 DPI). Układ napędowy karetki składa się z przekładni z paskiem zębatym i silnika prądu stałego oraz łożyskowanego układu mocowania i obrotu obiektu badanego. Obrót wałka realizowany jest przez silnik krokowy głowicy pomiarowej w postaci trójosiowej sondy Halla, zamocowanej do karetki. Sonda przemieszcza się w stałej odległości (0,5 mm) od wałka. Duża prędkość liniowa przemieszczania głowicy (do 5 m/s) wymusiła konieczność zastosowania elastycznych taśm przewodzących.
- Zaawansowanego systemu sterowania ADDI-DATA APCI8001, głównie stosowanego w robotyce. Regulator sprzętowy, zawarty w karcie APCI-8001, zapewnia sterowanie całym procesem dokładności pozycjonowania skanera z dużą prędkością.
- Wzmacniacza operacyjnego mocy (OPA511), pełniącego funkcję zasilacza silnika prądu stałego karetki.
- Systemu akwizycji danych Data Translation (DT9804, 16 bit) z tzw. triggerem do pomiarów sondą Halla w zadawanych pozycjach karetki.
- Oprogramowania dedykowanego Magroller, obsługującego całość systemu i zapewniającego wizualizację wyników.

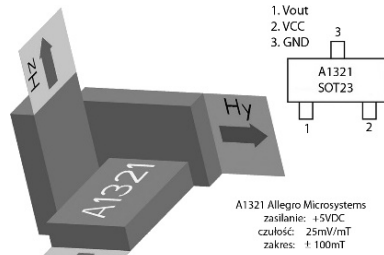
Schemat głowicy pomiarowej przedstawiono na rysunku 7.96. Zintegrowaną sondę utworzono przez połączenie trzech elementów pomiarowych (odpowiednio dla składowych H_x , H_y , H_z), z których każdy dysponuje niezależnym układem kondycjonującym. Skupienie w małej przestrzeni kompletnego układu pomiarowego pola magnetycznego, opartego na efekcie Halla, daje możliwość pomiarów quasi-punktowych, istotnych dla analizowanej powierzchni walcowej. Zapewniono redukcję szumów, tzw. układowych i temperaturowych. Uzyskano rozdzielczość pomiarową równą 100 μT , w liniowym zakresie czujnika $\pm 100\text{ mT}$.

Obiektem badań były kompozytowe pręty magnetyczne (KPM) wytworzone z ferrytu strontu ($\text{SrO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ¹). Elementy były wykonane z doskonałą precyzją. Średnica wałka wynosiła 9,60 mm, a długość robocza – 220 mm. Pierwsza grupa

¹ Według Japan TDK Standard.



Rys. 7.95. Schemat skanera magnetycznego do obiektów walcowych [39, 40]



Rys. 7.96. Budowa hallotronowej głowicy pomiarowej [39, 40]

wałków wykonana była metodą wtrysku (ang.: *Injection Bonded Ferrite Magnets*²) na osnowie nylonu, a druga – metodą spiekania (ang.: *Sintered Ferrite Magnets*³).

Podstawowe parametry fizyczne badanych prętów:

- gęstość $\rho = 3,65 \text{ g/cm}^3$,
- wytrzymałość na rozciąganie $k_r = 63 \text{ MPa}$,
- wytrzymałość na zginanie $k_G = 100 \text{ MPa}$,
- absorpcja wody $w = 0,003\%$,
- stabilność temperaturowa $-40\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Walki referencyjne nie miały uszkodzeń mechanicznych ani obszarów od magnesowania. Do weryfikacji metod badawczych służyły: walki lokalnie od magnesowane, ale bez karbów mechanicznych, walki z wprowadzonymi „programowanymi” karbami mechanicznymi, w postaci nawierconych otworów, nacięć oraz zadanego pęknięcia. Kolejno badaniom poddano walki referencyjne (nieuszkodzone), a następnie walki z defektami mechanicznymi i magnetycznymi. Wyniki omówiono sukcesywnie.

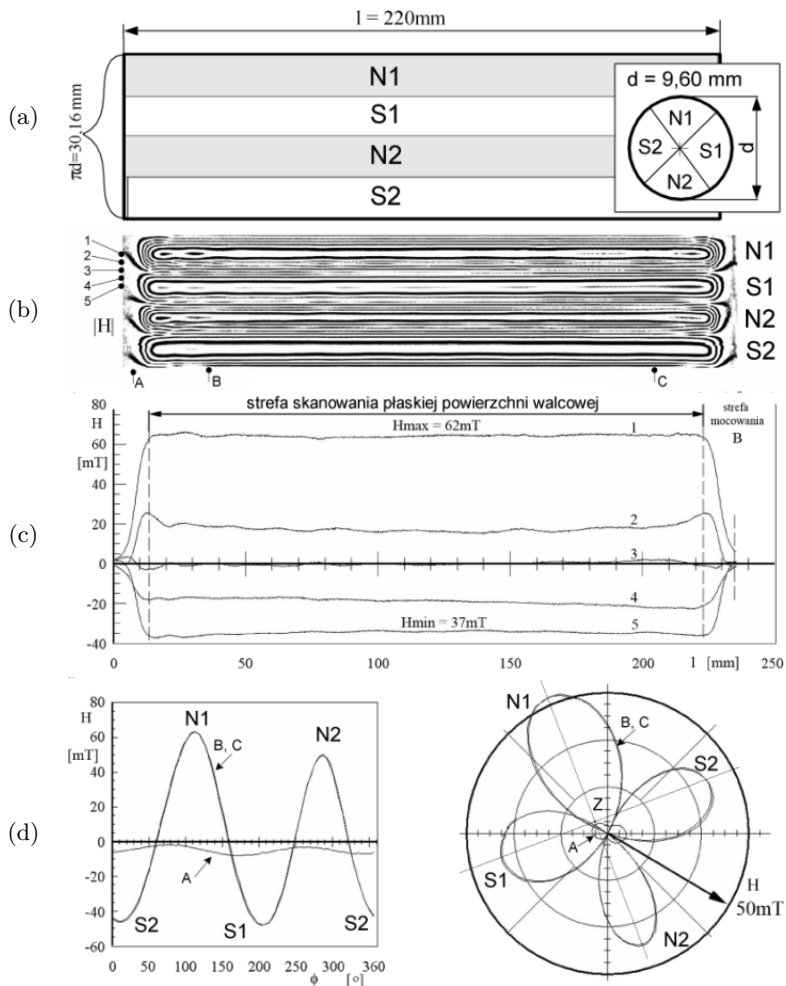
Badania kompozytowego pręta w stanie dostawy

Badania rozpoczęto od testów przeprowadzonych na wałku wzorcowym, który pochodził z serii wyrobów o gwarantowanych przez dostawcę właściwościach mechanicznych i magnetycznych. Wyniki zaprezentowano na rysunku 7.97, schemat rozwinięcia powierzchni bocznej wałka z czterema kierunkami magnetyzacji, odpowiednio: N_1 , S_1 , N_2 , S_2 przedstawiono na rysunku 7.97a.

Z kolei na rysunku 7.97b pokazano wynik pomiaru modułu wektora $|H|$ wzdłuż wałka, w formie poziomicy z widocznymi skupiskami strumienia magnetycznego w miejscu o określonym kierunku magnetyzacji (w rzeczywistości układ pomiarowy zapewnia mapę pola magnetycznego w kolorze, co ułatwia interpretację). Dobrze odwzorowana jest biegunowość wałka i jednorodność pola magnetycznego wzdłuż całej długości, co potwierdza jednocześnie powtarzalność właściwości magnetycz-

² <http://www.e-magnet.cn/productsb3.html>

³ <http://www.e-magnet.cn/productsb1.html>



Rys. 7.97. Wyniki badań dla wałka referencyjnego (bez defektów):

- a) schemat rozwinięcia stref identycznego kierunku magnetyzacji wałka,
 b) poziomicowa mapa pola magnetycznego, c) przebiegi $|H|$ dla przekrojów 1, 2, 3, 4, 5
 (wskazanych na rysunku b)), d) przebiegi zmian jednego okresu sygnału $H(\phi)$,
 dla przekrojów poprzecznych A, B, C (wskazanych na rysunku b))
 oraz (po prawej stronie) ich obraz we współrzędnych biegunowych [40]

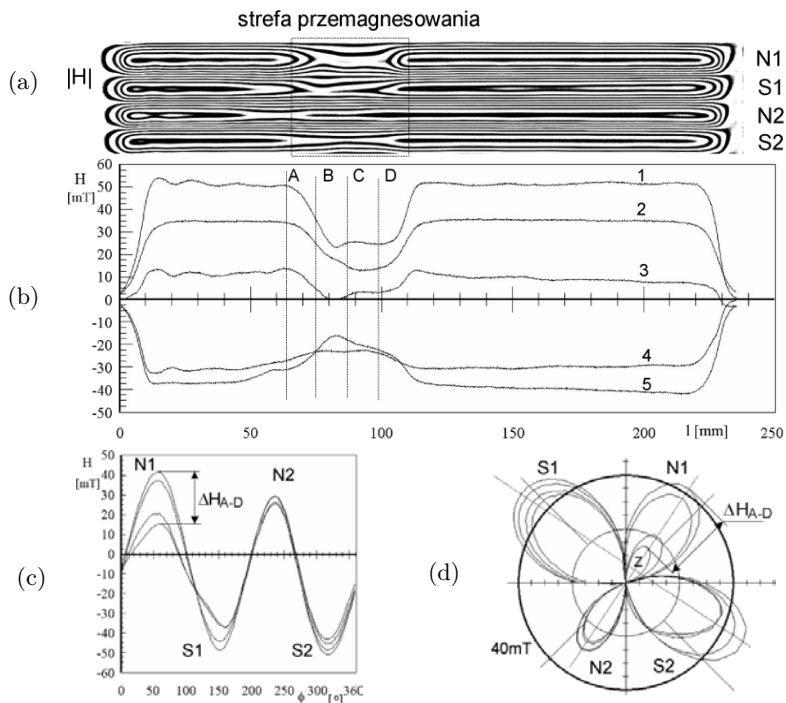
nych i mechanicznych materiału. Na rysunku zaznaczono też miejsca przekrojów podłużnych (oznaczonych jako 1, 2, 3, 4, 5) oraz poprzecznych (oznaczonych jako: A – strefa końcowa, B, C – strefa jednorodnych właściwości). O ile wizualizacja na rysunku 7.97b ma głównie charakter jakościowy, to dokładną analizę ilościową pokazano na obrazie 7.97c, na którym zaprezentowano przebiegi $|H|$ wzdłuż wałka, dla wskazanych uprzednio przekrojów 1–5. Moment „wchodze-

nia” czujnika pomiarowego w strefę walcową badanego pręta sygnalizowany jest zwiększeniem amplitudy natężenia pola magnetycznego. Dla danego przekroju amplituda $|H|$ jest stała w części walcowej. Anizotropowy charakter badanych materiałów magnetycznych widać wyraźnie z kolei na przebiegach zmian $H(\phi)$, dla wybranych uprzednio przekrojów poprzecznych A, B oraz C (patrz rys. 7.98b), co przedstawiono na rysunku 7.97d. Sygnał o małej amplitudzie dotyczy przekroju A, który pochodzi z nietypowej, początkowej części pręta. Na rysunku 7.97d (po prawej stronie) przedstawiono również zmiany $H(\phi)$ w układzie biegunowym, co ułatwia dokładniejszą analizę rozkładu strumienia pola magnetycznego wzdłuż przekroju. Na rysunku 7.97d (prawa strona) zaznaczono prostopadłe linie łączące szczyty biegunów N1-N2, S1-S2, które przecinają się w punkcie Z. Dla materiału o właściwościach izotropowych punkt Z leżałby w środku układu biegunowego. Wzajemne oddziaływanie par biegunów N1-S1 i N2-S2 przesuwają punkt Z w obszar dominującej amplitudowo strefy magnetyzacji N1. Wałek referencyjny zawdzięcza właśnie swoją anizotropowość większemu namagnesowaniu jednego z biegunów; wartości amplitud pozostałych są bardzo zbliżone.

Badania kompozytowego pręta lokalnie przemagnesowanego

Oddziaływanie na KPM źródłem zewnętrznego pola magnetycznego, o wartości strumienia indukcji na poziomie 500 mT, przez zbliżenie na odległość rzędu 2 mm płaskiego dwubiegunowego magnesu neodymowego, o wymiarach identycznych ze średnicą wałka, przedstawiono na rysunku 7.98. Na rysunku 7.98a zaprezentowano uzyskaną mapę pola magnetycznego $|H|$, z zaznaczonym miejscem zewnętrznego oddziaływania. Ilościowe skutki przemagnesowania widoczne są na rysunku 7.98b, zestawionego na drodze kolejnych cięć wzdłużnych w tych samych miejscach, jak w przypadku wałka referencyjnego. Na rysunku widać charakterystyczną wyrwę, zaburzającą stałą tendencję w wartościach natężenia pola magnetycznego, dla prezentowanych przekrojów w strefie magnetyzacji N1-S1. Okazuje się, że szczególnie zmniejszeniu wartości uległ biegun N1, mimo że zapewniono takie same warunki oddziaływania zewnętrznym polem magnetycznym dla wszystkich czterech stref magnetyzacji. We wszystkich przekrojach, poza przekrojem 5, stwierdzono zmniejszenie oddziaływań magnetycznych o połowę. Przekrój nr 4 reprezentuje najniższy poziom zmniejszenia amplitudy dla biegunów S1, S2. Oznacza to, że zewnętrzne oddziaływanie magnetyczne powoduje zmniejszenie amplitudy, fabrycznie namagnesowanych prętów, do określonego poziomu, wynikającego z wzajemnych relacji pomiędzy biegunami.

Sprawa to, że pręty są odporne na stymulację zewnętrznym polem magnetycznym mniejszym od wartości strumienia indukcji na powierzchni walca. Dopiero bezpośredni kontakt z silniejszym źródłem może spowodować skutki prezentowane



Rys. 7.98. Wyniki badań dla wałka poddanego lokalnemu oddziaływaniu zewnętrznym polem magnetycznym: a) mapa pola magnetycznego przemagnesowania, b) przebiegi $|H|$ dla kolejnych cięć wzdłużnych, c) przebiegi zmian $|H|(\phi)$ dla zaznaczonych przekrojów poprzecznych, d) (po prawej stronie) ich obraz we współrzędnych biegunowych [40]

na rysunku 7.98. Potwierdzenie można odnaleźć, analizując przecięcia poprzeczne, które umożliwiły określenie stopnia rotacji wektora H w płaszczyźnie poprzecznej. Na rysunku 7.98c można zauważyć wyraźne osłabienie bieguna N1, jednak nie pociąga to za sobą zmiany położenia punktu Z, co oznacza, że siły wewnętrznego oddziaływania magnetycznego utrzymują kierunek magnetyzacji, a wektor H nie podlega istotnej rotacji w żadnym biegunie. Świadczy to też, że nie została zaburzona magnetyczna jednorodność wewnętrzna materiału i nadal „pamięta” on swoją historię namagnesowania, zgodnie z kierunkiem fabrycznej premagnetyzacji.

Badania kompozytowego pręta z defektami mechanicznymi

Oddziaływanie mechaniczne na badany materiał miało na celu określenie zdolności systemu skanującego do wykrywania defektów i określenia ich wpływu na właściwości magnetyczne KPM wytwarzanych metodą spiekania. Na rysunku 7.99 przedstawiono przypadek programowego uszkodzenia mechanicznego wałka

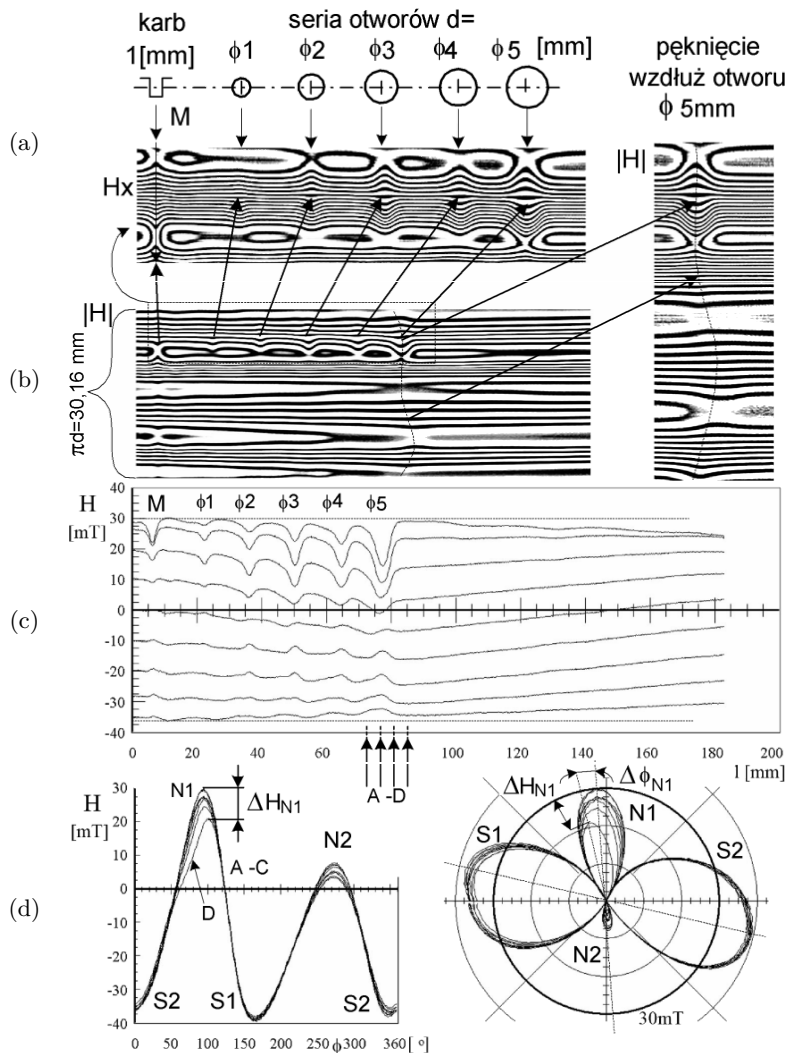
magnetycznego. W tym celu wytoczono rowek (karb) M szerokości i głębokości 1 mm. W odległościach co 20 mm, kolejno, zostało dodatkowo rozmieszczonych pięć otworów o narastających średnicach. Głębokość otworów była równa ich średnicy. Rezultaty skanowania powierzchni walcowej, w postaci map, przedstawiono na rysunkach 7.99a i b. W obszarze otworu $\phi 5$ mm wywołano pęknięcie w poprzek pręta. Ze względu na to, że składowa H_x najlepiej reprezentowała magnetyczny obraz otworów, została przedstawiona na rysunku 7.99a, mapę pęknięcia zaś przedstawiono, powiększając fragment z obszaru skanowania dla modułu wektora H (rys. 7.99a i b po prawej stronie). Linie pola magnetycznego charakterystycznie zakrzywiają się w miejscu otworu. W prezentowanych obrazach pola magnetycznego wykazano nawet obecność otworu $\phi 1$ mm, mimo ograniczonej rozdzielczości sondy pomiarowej. Również stwierdzono występowanie karbu, który stanowił bazę do rozmieszczenia otworów. Najsilniejsze zmiany sygnału widoczne są w otoczeniu otworu $\phi 5$ mm, a mimo znacznej dominacji tego sygnału, można zlokalizować pęknięcie, które zaznaczono.

Analiza ilościowa, podobnie jak poprzednio, polegała na wygenerowaniu obrazów wzdłuż tworzącej wałka i w kierunku poprzecznym (rys. 7.99c i d).

Na przebiegach przekrojów wzdłużnych łatwo można zlokalizować miejsca otworów i karbu. Okazuje się, że sygnał z karbu o tej samej szerokości, co średnica otworu, jest wyraźniejszy. Fakt istnienia otworu $\phi 1$ mm, po sygnale z przecięć wzdłużnych, jest trudny do zlokalizowania i należy traktować, że system z zastosowaną głowicą pomiarową jest zdolny wykrywać zaburzenia pola magnetycznego dla defektów mechanicznych o objętości większej niż 1 mm^3 . Po sygnale z przecięć wzdłużnych nie można wyciągnąć wniosku o istnieniu pęknięcia, magnetyczny sygnał przedstawi informację zbliżoną do sygnału karbu, chyba że tak, jak jest to na rysunku 7.99c, nastąpi nieznaczne przemieszczenie się względem siebie obu pękniętych stron. Na rysunku widać, że linie po obu stronach pękniętego wałka tworzą tzw. siodło w miejscu pęknięcia.

Dokonano również czterech „cięć” poprzecznych wzdłuż linii propagacji pęknięcia, a wyniki zestawiono na rysunku 7.99d. Przekrój A dotyczy początku występowania otworu $\phi 5$ mm, gdzie zaburzenia w sygnale magnetycznym nie są jeszcze tak duże. Kolejne przekroje dają wyraźny obraz zmian w sygnale magnetycznym. Na uwagę zasługuje fakt zaniku bieguna N2 w miejscu pęknięcia, świadczący o powstaniu wyrwy w tym obszarze magnetyzacji i rozdzieleniu tego oddziaływania na dwie części pęknięcia.

Natężenie pola magnetycznego w biegunie N1 ulega osłabieniu o ΔH_{N1} w obszarze przejścia przez otwór, a na podstawie rysunku 7.99c we współrzędnych biegunowych stwierdzono rotację wektora H , w miejscu przejścia przez pęknięcie.



Rys. 7.99. Wyniki badań dla wałka poddanego lokalnym defektom mechanicznym: a) sposób i miejsce przyłożenia defektów mechanicznych, oraz mapa pola magnetycznego dla składowej H_y , b) mapa pola magnetycznego $|H|$ z zaznaczonym miejscem pęknięcia i jego powiększeniem (obok), c) i d) przebiegi zmian $|H|(\phi)$ dla płaszczyzn poprzecznych leżących w obszarze otworu ϕ_5 mm i wykrytego pęknięcia [40]

Natomiast bieguny S1, S2 praktycznie zostały nienaruszone. Może to świadczyć o powstaniu szczeliny w wałku w obszarze N2.

Wnioski

- System skanujący wykazał pełną przydatność do określania zarówno miejsc defektów w badanych materiałach magnetycznych w formie przemagnesowania,

jak i karbów czy pęknięć, a zastosowana metoda zapewniła pomiary o wystarczającej rozdzielczości, szybkość skanera zaś i stworzone oprogramowanie umożliwiła wykorzystanie skanera w warunkach przemysłowych. Opierając się tylko na wizualizacji, nie można określić czy czynnik niszczący był typu magnetycznego, czy mechanicznego. Do tego służy analiza ilościowa otrzymana za pomocą kolejnych przecięć poprzecznych i wzdłużnych, pokazująca przyrosty pola magnetycznego i rotację wektora.

- Obecnie według systemu analizy map obrazu pola magnetycznego nie można stwierdzić charakteru defektu czy związany jest on z oddziaływaniem magnetycznym, czy mechanicznym. Problem można rozwiązać, zapewniając możliwość dodatkowego pomiaru odległości od powierzchni badanej, co jest aktualnie przedmiotem prac.
- Na podstawie badań prętów kompozytowych stwierdzono:
 - występowanie anizotropii magnetycznej w poszczególnych obszarach kierunku magnetyzacji, widocznej zwłaszcza dla przekrojów poprzecznych we współrzędnych biegunowych. Anizotropię magnetyczną obrazują także mapy pola magnetycznego, ale nośnikiem informacji o tym są barwy i odcienie,
 - każda przeprowadzona ingerencja zewnętrznym sygnałem magnetycznym w strumień magnetyczny wałka skutkuje wyraźnym osłabieniem natężenia pola magnetycznego wałka w miejscu oddziaływania czynnika zewnętrznego, mimo zapewnionej stałej odległości pręta względem sensora magnetycznego.

Ze względu na kruchość materiału, podczas oddziaływań mechanicznych mogą pojawiać się lokalne pęknięcia i szczeliny, które znacznie pogarszają właściwości mechaniczne i wprowadzają opisywane anomalie magnetyczne; jednakże możliwe jest łączenie KPM w kaskady z zachowaniem odpowiedniej biegunowości i dobrania prętów pod względem anizotropii magnetycznej, do czego można z powodzeniem zastosować prezentowaną metodykę.

7.8.3. Określenie stopnia demagnetyzacji termicznej przemysłowych magnesów trwałych

W aktuatorach magnetostrykcyjnych dużą rolę odgrywają magnesy neodymowe NdFeB. Dzięki nim możliwe jest uzyskanie odpowiedniej charakterystyki premagnetyzacji materiału magnetostrykcyjnego, która warunkuje duże wartości uzyskanej magnetostrykcji [39, 99, 100]. Im większe jest pole premagnetyzacji, tym materiał magnetostrykcyjny może być uboższy w Terfenol-D, jak na przykład w przypadku kompozytów magnetostrykcyjnych [99, 100]. Można również do budowy rdzenia magnetostrykcyjnego zastosować inne „popularniejsze” materiały, jak kobalt czy nikiel. Jednakże w przypadku stosowania silnych magnesów trwałych

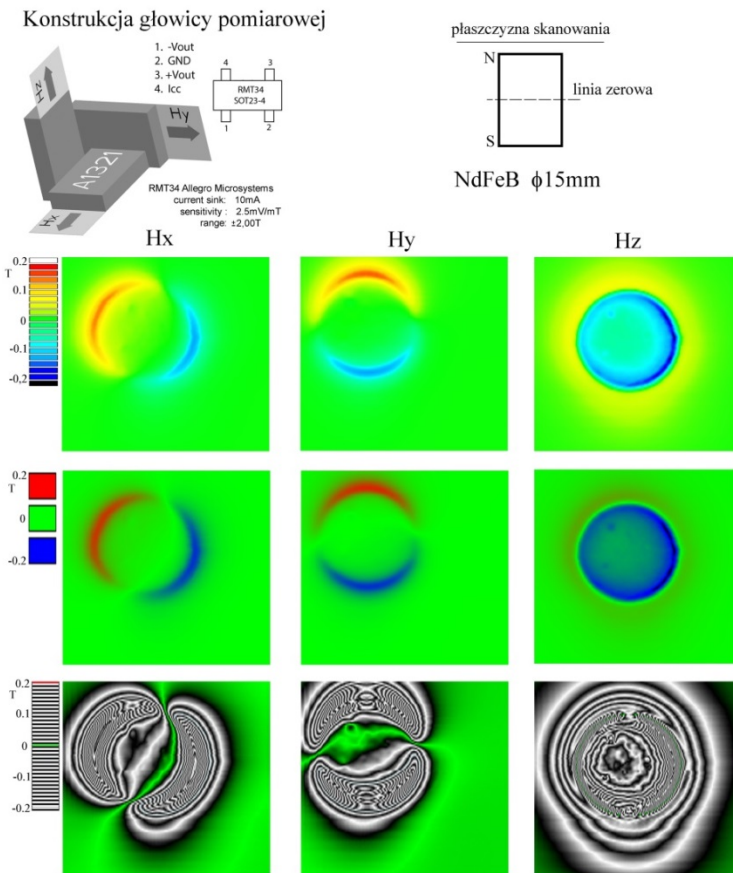
dużym problemem staje się ilość wydzielanego ciepła w cewce aktuatora, pod wpływem płynącego prądu elektrycznego, uzależniona od mocy wzbudnika, co powoduje nagrzewanie magnesu i zmianę jego charakterystyki.

Najsilniejsze magnesy neodymowe klasy N52 pod wpływem temperatury gwałtownie słabną, co powoduje pogorszenie osiągnięć aktuatorów. Dlatego ważnym problemem stało się określenie zmian dystrybucji pola magnetycznego wokół cylindrycznego magnesu trwałego, pod wpływem czasu wygrzewania go w zadanej temperaturze w pobliżu i powyżej temperatury Curie [101, 102]. Zastosowano w tym celu system skanera pola magnetycznego MMS (Magscanner-Maglab System) z hallotronową głowicą (rys. 7.95 i 7.96). Wyniki uzyskane z MMS mają postać map H_x , H_y , H_z składowych pola magnetycznego. Wymiary map reprezentują wielkość płaszczyzny skanowania, kolor zaś odzwierciedla stan namagnesowania podczas przejścia od N do S. Kolor zielony związany jest z występowaniem tzw. linii zerowej i biegnie pomiędzy biegunami. Na rysunku 7.100 przedstawiono mapy typowego cylindrycznego magnesu NdFeB o średnicy $\phi 15$ mm. Ze względu na stereoskopowy charakter skanowania składowa H_z przedstawia biegun magnesu przy płaszczyźnie skanowania. Składowa ta nie jest jednakowa na całej powierzchni magnesu. Krawędzie magnesu cylindrycznego działają jak koncentrator pola magnetycznego, zwiększając natężenie pola magnetycznego na jego brzegach, co pokazane jest na rysunku 7.100.

Dobór metody pomiaru

Przeprowadzenie pomiaru degradacji magnesu trwałego na skutek demagnetyzacji termicznej NdFeB wymaga doboru metody pomiarowej pola magnetycznego wokół jego powierzchni, a także wyboru źródła ciepła niezbędnego do procesu rozmagnesowania. Ze względu na charakterystykę hallotronowych elementów pomiarowych nie można było przeprowadzić pomiaru pola magnetycznego bezpośrednio podczas procesu wygrzewania [102]. Na rysunku 7.100 przedstawiono sposoby prezentacji map pola magnetycznego uzyskanych z eksperymentu. Najwięcej szczegółów dotyczących pola magnetycznego na powierzchni magnesu dostarcza skala izochromatyczna (tzw. kontur rozkładu). Opierając się na tej metodzie można określić symetryczność linii strumienia magnetycznego i położenie linii zerowej.

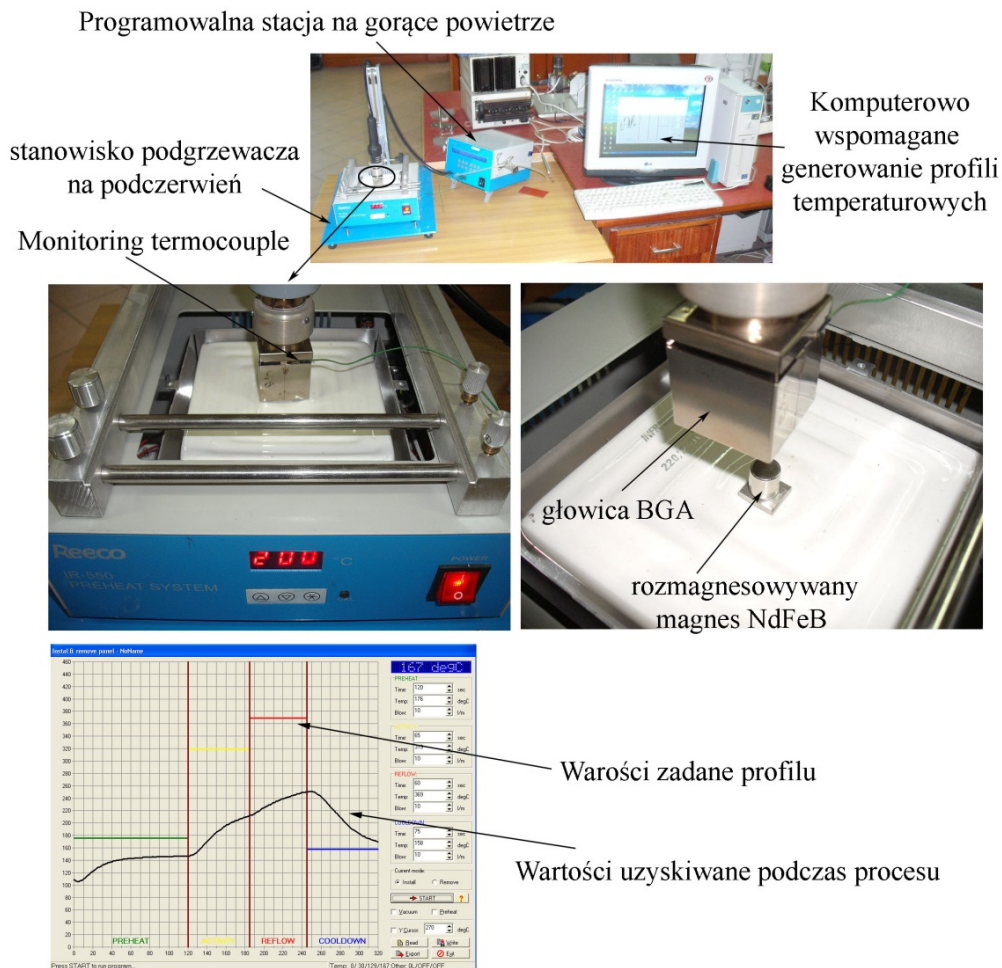
Na rysunku 7.101 przedstawiono widok stanowiska do programowanej demagnetyzacji termicznej. Składało się ze stacji lutowniczej na gorące powietrze, przeznaczonej do łączenia układów scalonych. Stanowisko wykazało pełną przydatność w programowanym rozmagnesowaniu temperaturowym magnesów trwałych o średnicy mniejszej od 30 mm, dzięki precyzyjnemu obiegowi powietrza. Magnes umieszczony był na promienniku z lampą na podczerwień mocy 500 W, na którym można było regulować temperaturę aż do 400 °C. Jednak ze względu na dużą



Rys. 7.100. Mapy rozkładu pola magnetycznego w trzech osiach dla magnesu trwałego NdFeB [39]

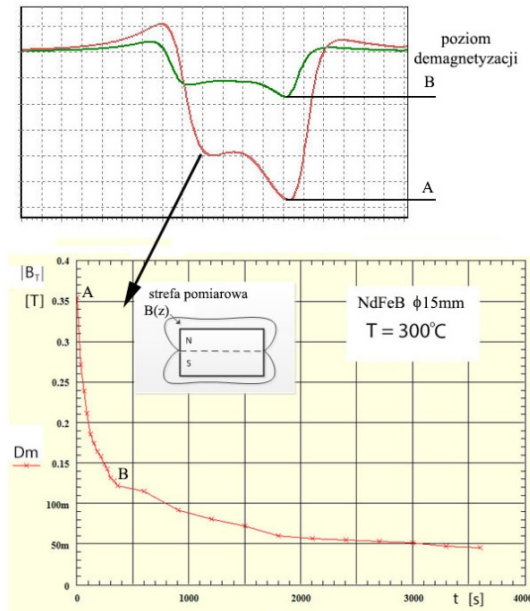
bezwładność termiczną lampy podgrzewacza ustawiana na nim temperatura była niższa o około $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ względem temperatury strumienia gorącego powietrza, co wykazał niezależny pomiar. Procesowi rozmagnesowania poddawano cyklicznie ten sam magnes, uzyskując różne progi poziomu demagnetyzacji [102].

Krzywa rozmagnesowania została przedstawiona na rysunku 7.102. Po każdym progu zadanego profilu temperaturowego magnes był skanowany w zadanej płaszczyźnie. Dzięki krzywej demagnetyzacji stwierdzono, że powyżej temperatury Curie magnesów, wynoszącej dla badanego typu $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, już po kilkusekundowym wygrzewaniu następuje wyraźne jego osłabienie oraz że trend zmian osłabienia magnesów można opisać funkcją hiperboliczną.



Rys. 7.101. Widok stanowiska do programowego zadawania różnych poziomów stopnia rozmagnesowania termicznego [39, 102]

Należy mieć na względzie efekt tzw. powrotu namagnesowania, który powoduje, że magnes w procesie studzenia odzyskuje część mocy. Krzywa przedstawiona na rysunku 7.102 dotyczy namagnesowania odzyskanego po zadanym czasie nagrzewania do temperatury 300 °C. Okazało się, że nawet po dłuższym przebywaniu w wysokiej temperaturze magnes odzyskuje część strumienia magnetycznego, ale zależy to od wielkości magnesu. Im magnes cylindryczny ma mniejszą średnicę, tym czas zupełnie demagnetyzacji jest krótszy [102].



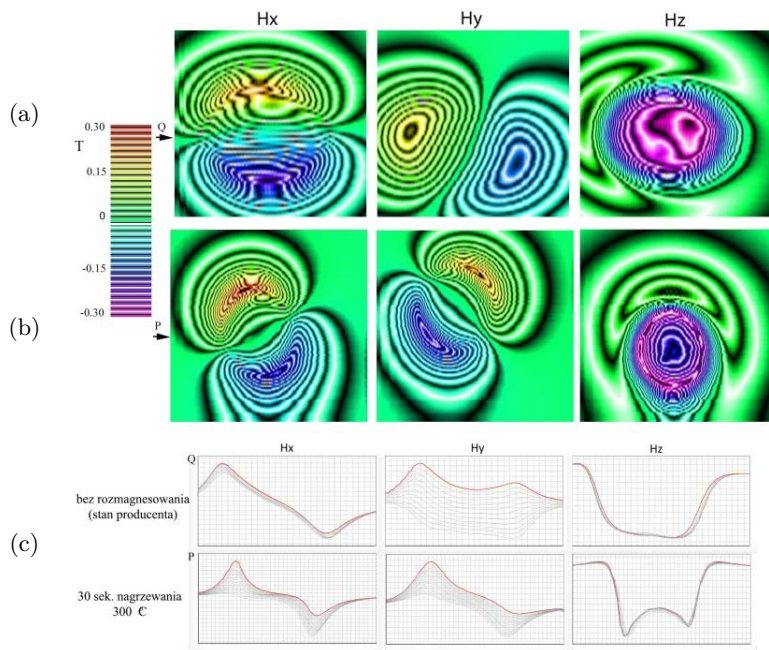
Rys. 7.102. Krzywa demagnetyzowania temperaturowego wygrzewanego magnesu NdFeB $\phi = 15$ mm powyżej temperatury Curie [39, 102]

Pod wpływem temperatury zmieniły się mapy magnetyczne poszczególnych składowych natężenia pola magnetycznego. Nie tylko chodzi o zmianę wartości, które zostały przedstawione na krzywej rozmagnesowania. Zmienił się znacząco kształt dystrybucji pola magnetycznego 3D, co zostało przedstawione w postaci map na rysunku 7.103. Na rysunku 7.103 porównano mapy dystrybucji pola magnetycznego w stanie dostawy i w następstwie wygrzewania.

Na rysunku 7.103a przedstawiono magnes niepoddany procesowi rozmagnesowania temperaturowego, a na 7.103b po 30 sekundach nagrzewania. Na rysunku 7.103c przedstawiono zmiany w profilu dystrybucji pola magnetycznego wzdłuż przekrojów P i Q; również ukazana jest historia zmian w natężeniu pola magnetycznego w pobliżu wskazanych przekrojów.

Wnioski

- Wzrost kosztów zakupu Terfenolu-D przyczynił się do poszukiwań alternatywnych materiałów magnetostrykcyjnych i technik doboru odpowiednich elementów premagnetyzujących rdzenie aktuatorów i harvesterów. Próbuje się dlatego zastosować zamienniki w postaci kompozytów z różną zawartością Terfenolu-D z odpowiednimi silnymi magnesami neodymowymi, np. [99, 100, 103, 104]. Rezygnacja z czystego Terfenolu-D zmniejsza znacząco koszty konstruowanych przyrządów. Jednakże stosowanie rdzeni kompozytowych wymaga precyzyjnego



Rys. 7.103. Porównanie map dystrybucji pola magnetycznego: a) magnesu NdFeB w stanie dostawy od producenta, b) magnesu wygrzewanego w temperaturze 300 °C przez 30 s, c) zmiana kształtów przekrojów Q i P w badanych magnesach pod wpływem nagrzewania [39]

doboru wartości pola namagnesowania wstępnego rdzeni i dobór magnesów pod kątem zdolności do demagnetyzacji. Istotne coraz częściej staje się stosowanie magnesów jako typowego elementu konstrukcyjnego o dużej wytrzymałości na ściskanie, jednakże wymaga to „programowania” magnesu na żadaną wartość pola magnetycznego, i jego rozkład przestrzenny. Wcześniej opisany system magnetowizyjny MMS umożliwił diagnostykę i kontrolę procesu demagnetyzacji, jak również wizualizację silnego pola magnetycznego.

- Proponuje się monitorowanie procesu termicznego rozmagnesowywania magnesów NdFeB jako nowe zastosowanie Systemu Magscanner-Maglab. Stereograficzny charakter otrzymywanych dystrybucji wektora pola magnetycznego wokół magnesu umożliwia dokładne i równoczesne wyznaczanie zmian trzech składowych wektora pola magnetycznego, odpowiednio H_x , H_y , H_z , dla przedmiotów płaskich i cylindrycznych.
- Bezdotkowy pomiar odbywa się w pożądanej odległości d od badanej powierzchni magnesu. System pomiarowy wzbogacony jest o oprogramowanie umożliwiające pełne przetwarzania sygnału. Aplikacja Systemu Magscanner-Maglab do procesów diagnostyki magnesów trwałych, znajdujących coraz

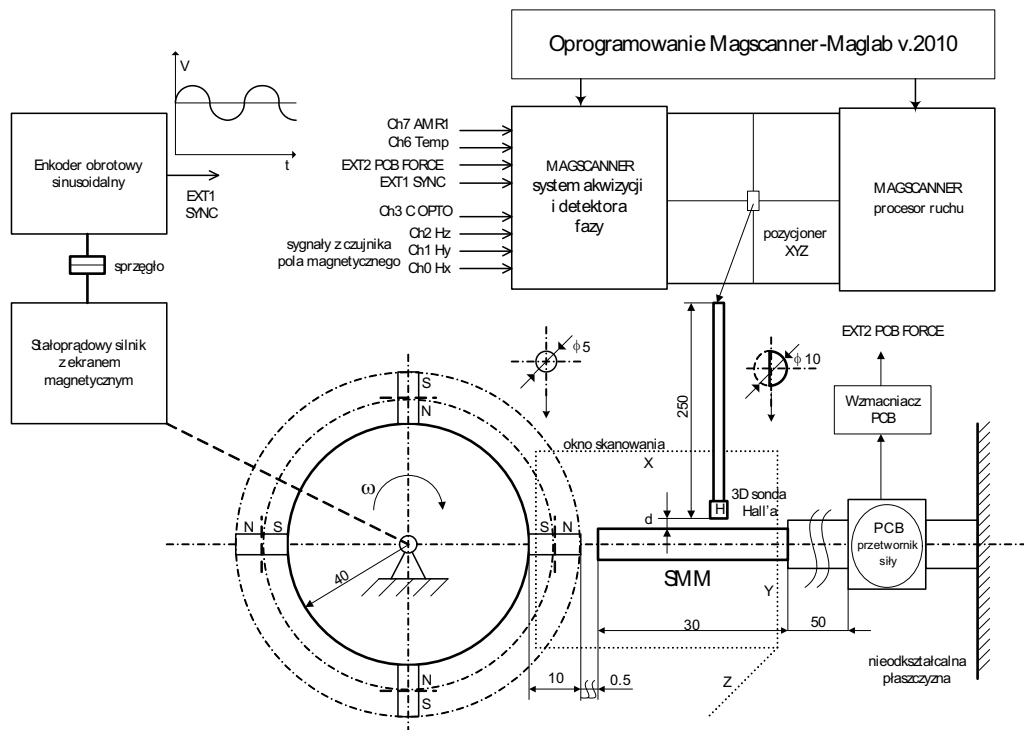
szersze zastosowanie w przemyśle, ułatwia określenie stopnia ich zużycia, co do tej pory nie było przedmiotem wnikliwych badań.

7.8.4. Magnetowizyjna diagnostyka degradacji materiałów na skutek gwałtownego cyklicznego przemagnesowania

Istotnym zastosowaniem kamery magnetowizyjnej Magscanner-Maglab w badaniach materiałów magnetycznych Smart, głównie Terfenolu-D i jego kompozytów, było określenie charakteru jego przemagnesowania w czasie pod wpływem silnego zmiennego pola magnetycznego pochodzącego z magnesu NdFeB. W zastosowanej metodyce pomiaru badany materiał nie był poddany dodatkowemu naprężeniu wstępnemu. Całość prac miała na celu zaproponowanie nowatorskiego rozwiązania aktuatora z rdzeniem terfenolowym bez cewki indukcyjnej, przez którą płyną prądy o znacznych wartościach do zadawania pożądanej magnetostrykcji [105]. Budowa tradycyjnego aktuatora z rdzeniem terfenolowym nie jest konstrukcją optymalną zarówno pod względem uzyskanej magnetostrykcji, jak i częstotliwości „przenoszonych” przez taki aktuator. Ograniczenia są następstwem głównie indukcyjności samej cewki, a nie pasma przenoszenia samego materiału Smart. Inne podejście do sposobu pozyskania żądanej magnetostrykcji na skutek stymulacji silnym zewnętrznym polem magnetycznym może spowodować większą sprawność mechaniczną budowanych aktuatorów. Dodatkowo wirujący magnes neodymowy w pobliżu Terfenolu-D dostarcza istotnych informacji na temat żyroskopowych zjawisk magnetomechanicznych w materiale magnetostrykcyjnym.

Dalej zaprezentowano stanowisko do badań. Na tarczy średnicy 80 mm umieszczono przeciwległe 4 trwale magnesy trwale NdFeB klasy N52, co powodowało czteropolową konfigurację biegunowości obracanej tarczy. Schemat stanowiska pomiarowego, przystosowanego do współpracy ze skanerem pola magnetycznego, do określania odpowiedzi magnetomechanicznej przemagnesowywanego litego Terfenolu-D oraz spieku ferrytu, przedstawiono na rysunku 7.104.

Tarcza z układem magnesów trwałych wirowała ze stałą częstotliwością 20 Hz (1200 RPM) naprzeciw badanego materiału SMM. Źródłem sygnału synchronizacyjnego podczas eksperymentu był precyzyjny czujnik położenia kąтового sprzężony z obracającą się tarczą i ekranowanym magnetycznie silnikiem prądu stałego. Czujnik siły firmy PCB rejestrował oddziaływanie mechaniczne, jakie powstawało na skutek przemagnesowania SMM, który w sposób trwały zamocowany był do podłoża. Zastosowano subminiaturowe czujniki Halla, tworzące zwartą głowicę 3D; przystosowane były do pomiarów pola magnetycznego aż do 2,0 T. Zapewniono możliwie niewielką odległość d między głowicą pomiarową a badaną powierzchnią SMM. Proces eksperymentu w pełni był obsługiwany przez system Magscanner-Maglab.



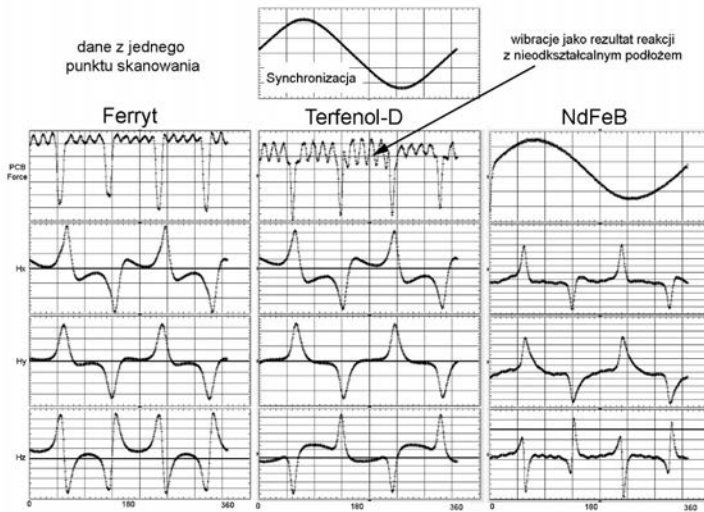
Rys. 7.104. Schemat stanowiska z wirującymi magnesami NdFeB magnesującymi badany materiał wraz z opisem istotnych sygnałów pomiarowych i synchronizacyjnych [39, 102]

Przykładowe wyniki

Prezentowane wyniki mają przedstawić możliwości zastosowania systemu kamery magnetowizyjnej do analizy przemagnesowania struktury materiału Smart. Stopień przemagnesowania Terfenolu-D na skutek bliskiego oddziaływania silnego magnesu neodymowego porównano z magnetycznie miękkim ferrytem, stosowanym w ekranach magnetycznych okablowania dla sygnałów cyfrowych.

Ukazano różnicę w przemagnesowaniu płaskiej powierzchni próbki z litego Terfenolu-D w stanie dostawy oraz spieku z ferrytu na skutek kontaktu cyklicznego z magnesem NdFeB z częstotliwością 20 Hz. Dokonano również pomiarów, gdy próbka była wykonana z innego magnesu. W toku prac zaproponowano metodykę pomiaru prądów wirowych w badanych materiałach.

Na rysunku 7.105 przedstawiono serię uzyskiwanych kształtów sygnałów mechanicznych i magnetycznych na skutek obracającego się magnesu neodymowego. Sygnał mechaniczny był odpowiedzią podłoża na drgania wywoływane na skutek dynamicznego przemagnesowania badanego materiału. Drgania były największe w przypadku Terfenolu-D.



Rys. 7.105. Porównanie kształtu generowanych sygnałów mechanicznych i magnetycznych badanych materiałów dla punktu leżącego w środku okna skanowania w tej samej odległości od wirującego magnesu NdFeB [39, 102]

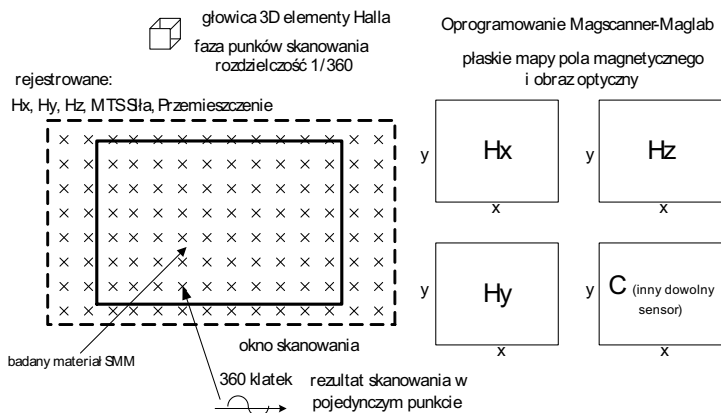
Istniała możliwość doboru takiej prędkości obrotowej wirującej tarczy z magnesami, aby uzyskać rezonans mechaniczny układu SMM–czujnik PCB–ramię mocujące–statyw (rys. 7.104). Ma to znamienne znaczenie dla optymalizacji konstruowanych harvesterów z kompozytowym rdzeniem magetostrikowym. Rdzeń w postaci kompozytu osiąga bowiem dużo większe częstotliwości rezonansowe od rdzenia litego [100].

Jeżeli elementem nieruchomym SMM był inny magnes neodymowy, to mechaniczną odpowiedzią tego układu (siła) był sygnał sinusoidalny w fazie względem sygnału synchronizacyjnego (rys. 7.105).

Dzięki zastosowaniu systemu magnetowizyjnego Magscanner-Maglab [37, 61, 105] można uzyskać przebieg faz przemagnesowania w postaci filmu o 360 klatkach na okres dla trzech składowych wektora pola magnetycznego. Możliwa jest rejestracja na filmie jeszcze jednego sygnału z dowolnego czujnika, np. optycznego. Strukturę zapisu końcowego filmu w postaci cyfrowej pokazano na rysunku 7.106.

Rezultaty przedstawiono dla spiekane go ferrytu (rys. 7.107) oraz Terfenolu-D (rys. 7.108). Ze względu na brak możliwości prezentacji wszystkich klatek, wybrano osiem najbardziej istotnych faz przemagnesowania badanego materiału z krokiem $co\ 45^\circ$.

Na rysunku 7.109 zaprezentowano przykład magnetycznych histerez konfiguracji poszczególnych składowych dla pojedynczego punktu oddalonego od wirującego magnesu NdFeB o stałą wartość. System Magscanner-Maglab umożliwia uzyskanie

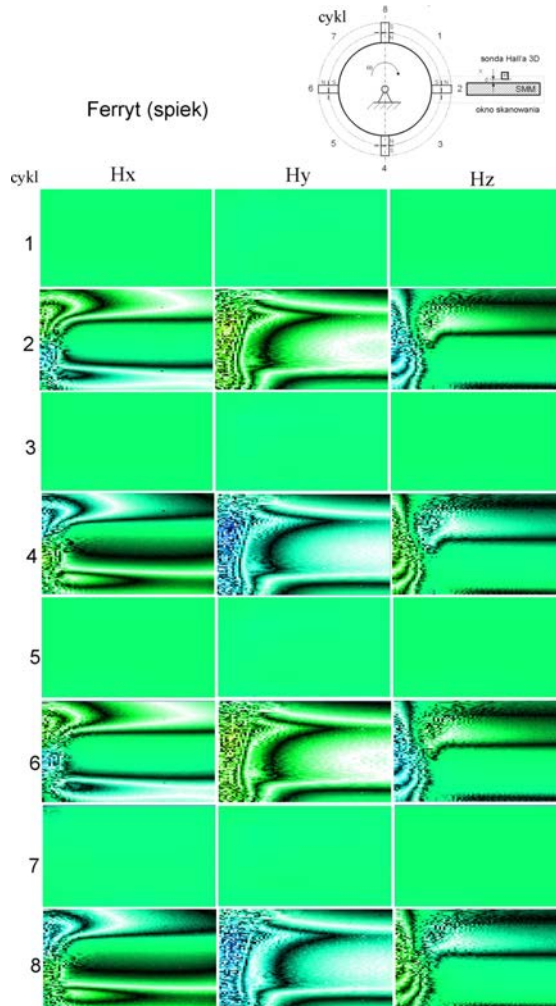


Rys. 7.106. Sposób generowania filmu z procesu stymulacji badanego materiału SMM zewnętrznym polem magnetycznym pochodzącym z magnesu NdFeB [39, 102]

do analizy tyłu histerez, ile wynika to z rozdzielczości skanowania. Przykładowo okno skanowania 40×40 mm, 120×120 pkt, oznacza 14 400 przebiegów histerez, które również można zobaczyć w postaci animacji zmian pola magnetycznego w obrębie okna skanowania.

W celu określenia wielkości prądów wirowych należało zwiększać prędkość obrotową tarczy ze znaną ilością magnesów NdFeB co określony skok, do momentu ustabilizowania się temperatury badanego materiału SMM. Dla stałych przyrostów prędkości obrotowej powiązanej z częstotliwością stymulacji Δf uzyskano przyrosty temperatury ΔT , które z kolei powiązane są z gęstością prądów wirowych. Metodę w sposób graficzny wyjaśnia rysunek 7.110. W przypadku gdy częstotliwość stymulacji wywołuje rezonans mechaniczny stanowiska, następuje największy przyrost temperatury (rys. 7.110) w momencie osiągnięcia 11 obr/s ($f = 748$ Hz). Stwierdzono, że jedynie sztywność podłoża i osadzenie materiału SMM na nim ma jedynie wpływ na częstotliwości rezonansowe odnotowane podczas wirowania. Dążono przy tym do wyeliminowania zjawiska rezonansu mechanicznego w zakresie dużych prędkości obrotowych (powyżej 20 obr/s).

Zarówno stopień nagrzewania się badanego materiału SMM, jak i jego temperatura maksymalna wynikają wyłącznie z procesu cyklicznego przemagnesowania jego struktury dla zadanej częstotliwości. Temperaturowa „odpowiedź” materiału była wyznaczana za pomocą ultracienkich termopar typu E, które dobrano tak, aby wyeliminować zakłócenia na skutek obecności zmiennego pola magnetycznego. Znamienny jest fakt, że przez zastosowanie generatora pola magnetycznego, składającego się z określonej liczby magnesów, przeciwnie spolaryzowanych, udało się uzyskać odpowiedź temperaturową badanego materiału w szerokim zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do ponad 5000 Hz, przy maksymalnej wartości strumie-

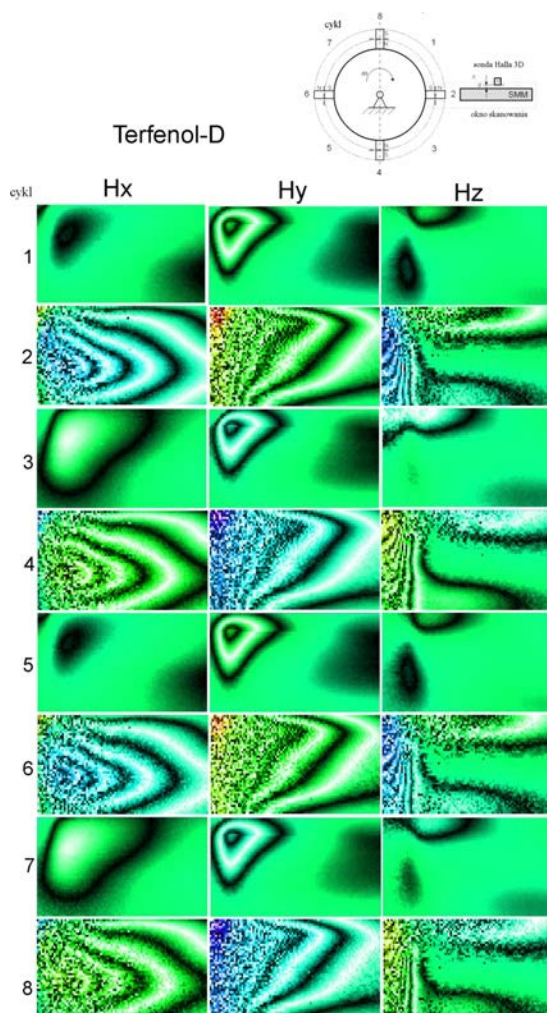


Rys. 7.107. Fazy namagnesowania ferrytu w polu magnetycznym wirującego magnesu [39]

nia indukcji $B_{\max} = 0,35$ T. Aktualnie prowadzone są badania mające na celu uwzględnienie wpływu programowanego naprężenia wstępnego oraz rezonansu mechanicznego podczas stymulacji na wytrzymałość zmęczeniową badanego materiału.

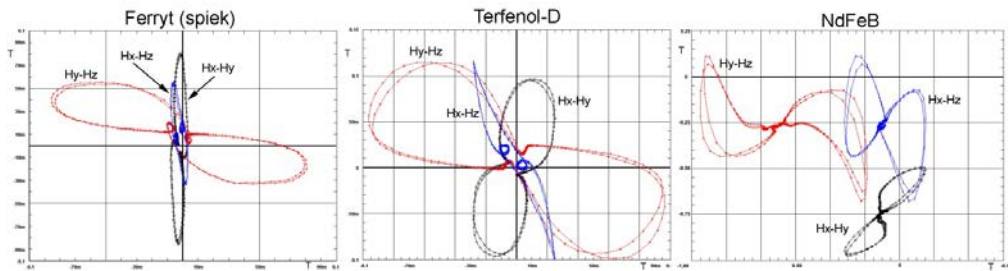
Wnioski

- Magscanner-Maglab System wykazuje przydatność do systemu kontroli stanu namagnesowania materiałów Smart i może być przeznaczony do badań nowych materiałów, w których występują prądy wirowe.

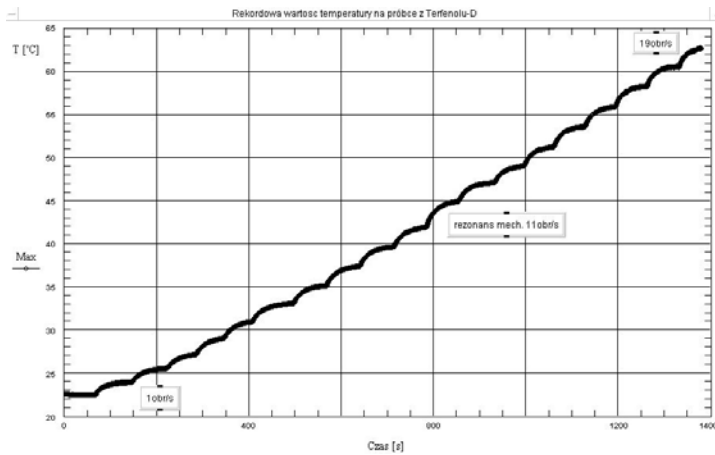


Rys. 7.108. Fazy namagnesowania Terfenolu-D w polu magnetycznym wirującego magnesu [39]

- Opracowano nowatorską metodę wywoływania cyklicznej magnetostrykcji w Terfenolu-D na skutek stymulacji zewnętrznym polem magnetycznym pochodzącym z wirującej tarczy z magnesami NdFeB, a rezultaty zaprezentowano w postaci „filmu magnetowizyjnego”.
- System magnetowizyjny umożliwia identyfikację parametrów „odpowiedzi” magnetomechanicznej, stopnia namagnesowania struktury i przyrostów temperatury na skutek bodźców zewnętrznych wywołujących powstawanie prądów wirowych.



Rys. 7.109. Histerezy magnetyczne H_x-H_y , H_y-H_z , H_x-H_z charakterystyczne dla punktów badanego materiału w znacznej odległości od wirującego magnesu [39]



Rys. 7.110. Zmiany temperatury na skutek stałych skokowych (co 1 obr/s) zmian prędkości obrotowej 1–19 obr/s [39]

7.9. Kierunki proponowanych dalszych badań własnych

Dotychczasowy dorobek umożliwia **wyznaczenie nowych celów w zakresie zastosowań magnetowizji**. Kolejne podejmowane zadania powinny umożliwić osiągnięcie jakościowo nowych rezultatów w zakresie aparatury i zastosowań. Rozwój magnetowizji w zakresie sprzętu powinien mieć na celu:

- rozbudowę skanera magnetycznego do badania powierzchni krzywoliniowych,
- rozszerzenie systemu magnetowizyjnego o moduł komunikacji bezprzewodowej w celu zredukowania ilości okablowania,
- rozszerzenie systemu o układ zasilania akumulatorowego w celu przystosowania systemu do pomiarów terenowych elementów konstrukcyjnych obiektów takich,

jak mosty czy kominy, czyli w miejscach o małym dostępie do elektrycznej sieci zasilającej,

- zwiększenie rozdzielczości skanera magnetowizyjnego przez zastosowanie algorytmu skanowania z synchronizacją względem kolejnej fazy sygnału wzorcowego,
- stworzenie skanera magnetowizyjnego do badania obiektów biologicznych.

Zadania dotyczące aplikacji, uwzględniając potrzeby potencjalnych partnerów, mogą z kolei dotyczyć następujących zagadnień:

- magnetowizyjnej detekcji wad w obwodach elektrycznych i elektronicznych (rozwój magnetowizji *electrical current flow imaging* do wykrywania wad w układach scalonych),
- zastosowania magnetowizji i wielowymiarowej wizualizacji pola magnetycznego do określania zmiany dystrybucji pola magnetycznego wokół materiałów magnetycznych Smart, będących elementami konstrukcji mechanicznej w czasie stymulacji części aktywnej konstrukcji polem magnetycznym o zadanych parametrach,
- detekcji propagacji pęknięcia w próbkach typu compact ze stali ferromagnetycznej przez magnetowizyjną metodę z zastosowaniem trójosiowej sondy pomiarowej na podstawie magnetorezystorów i czujników Halla,
- zautomatyzowanego stanowiska do diagnozowania metodą magnetyczną poprawności wykonania wielkoseryjnych elementów tłoczonych i zgrzewanych, przystosowanego do pracy na wielkowymiarowej taśmie produkcyjnej,
- opracowania metody porównującej poszczególne partie produkcyjne stali w stanie hutniczym przez pomiar magnetomechanicznego efektu krzyżowego z zastosowaniem skanera magnetowizyjnego i stworzenia możliwości skanowania markerów magnetycznych w zastosowaniach medycznych.

Bibliografia

- [1] Kaleta J., Susz S., *Magnetowizyjny system do badań dwuosiowego stanu naprężenia w warunkach obciążenia cyklicznego*, [w:] *XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego* 1996, 290–295.
- [2] Berezowski P., Borkowski T., Susz S., *Magnetovision – a new tool in fatigue investigations of ferromagnetics*, [w:] *Tagungsband des 4. Studententages des Hüttenwesens*, Freiberg 1996, 268–273.
- [3] Tumański S., Stabrowski M., *Magnetovision system: new method of investigating steel sheets*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160, 1996, 165–166.
- [4] Tumanski S., *Magnetovision*, [w:] *McGraw-Hill 2000 Yearbook of Science and Technology*, McGraw-Hill, New York 1999, 242–244.

- [5] Tumanski S., Stabrowski M., *The magnetovision method as a tool to investigate the quality of electrical steel*, Measurement Science and Technology, 9, 3, 1998, 488.
- [6] Tumanski S., Liszka A., *The methods and devices for scanning of magnetic fields*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242, 2002, 1253–1256.
- [7] Tumanski S., Bakon T., *Measuring system for two-dimensional testing of electrical steel*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 223, 3, 2001, 315–325.
- [8] Baudouin P., Houbaert Y., Tumanski S., *Magnetic local investigations of non-oriented electrical steels after tensile deformation*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 254, 2003, 32–35.
- [9] Tumanski S., Liszka A., *On-line evaluation of electrical steel structure and quality*, [w:] *INTERMAG Europe 2002 Magnetics Conference, 2002 IEEE International Digest of Technical Papers*, IEEE 2002, DU9.
- [10] Tumanski S., Baranowski S., *Magnetic sensor array for investigations of magnetic field distribution*, Journal of Electrical Engineering, 2006, 1335–3632.
- [11] Michalski A., *Magnetovision [magnetic field scanning system]*, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 5, 3, 2002, 66–69.
- [12] Kaleta J., Tumański S., Żebracki J., *Magnetoresistors as a tool for investigating the mechanical properties of ferromagnetic materials*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 160, 1996, 199–200.
- [13] Kaleta J., Wiewiórski P.K., Wiśniewski W., *Methods of investigating martensitic transformation induced by plastic deformation in bulk specimens*, [w:] *26th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Montanuniversität Leoben Institute of Mechanical Engineering, Leoben, Austria 2009, 93–94.
- [14] Jiles D., *Introduction to magnetism and magnetic materials*, CRC Press 1998.
- [15] Kaleta J., Żebracki J., *Application of the Villari effect in a fatigue examination of nickel*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 19, 12, 1996, 1435–1443.
- [16] Planes A., Mañosa L., Saxena A., *Magnetism and structure in functional materials*, Magnetism and Structure in Functional Materials, 1, 2005.
- [17] Planschutz W., *Inverse magnetostrictive effect and electromagnetic nondestructive testing methods*, NDT International, 19, 4, 1986, 249–258.
- [18] Wiewiórski P., *Budowa kamery magnetowizyjnej z wieloelementową głowicą pomiarową do badania efektu Villariiego*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział MEchaniczny, Wrocław 2002.
- [19] Ruuskanen P., Kettunen P., *Two ferromagnetic methods for the evaluation of the fatigue limit in polycrystalline iron*, NDT International, 1980, 105–108.
- [20] Ruuskanen P., Kettunen P., *Dependence of the high-frequency components of the magnetoelastic voltage on plastic deformation and stress amplitude during stepwise cyclic stressing of ferromagnetic material*, Philosophical Magazine A, 68, 6, 1993, 1233–1249.
- [21] Ruuskanen P., Kettunen P., *Dependence of the high-frequency components of the magnetoelastic voltage on plastic deformation and stress amplitude during stepwise cyclic stressing of ferromagnetic material*, Philosophical Magazine A, 68, 6, 1993, 1233–1249.

- [22] Kaleta J., Żebracki J., *Use of the Villari effect to monitor fatigue properties of E355-steel*, [w:] *Fatigue 93. Proceedings of the Fifth International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds*, J.P. Bailon, J.I. Dickson (red.), Montreal, Quebec 1993, 1869–1874.
- [23] Kaleta J., Żebracki J., *Energia pola magnetycznego jako miara stopnia uszkodzenia zmęczeniowego w stali 18G2A*, [w:] *Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn roboczych, technologicznych oraz środków transportu*, 2, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993, 9–16.
- [24] Kaleta J., Żebracki J., *Wyznaczanie cyklicznej granicy plastyczności z wykorzystaniem efektu Villariiego*, [w:] *XVI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Zespół Mechaniki Doświadczalnej Komitetu Mechaniki PAN, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, Jachranka 1994.
- [25] Żebracki J., *Efekt Villariiego a proces zmęczenia stali ferrytyczno-perlitycznej*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 1991.
- [26] Kaleta J., Żebracki J., *Detection of plastic deformation during fatigue of steels using Villari effect*, [w:] *Proc. of 10th International Conference on Experimental Mechanics*, Lisbon 1994, 1241–1246.
- [27] Kaleta J., Żebracki J., *Reverse magnetostriction in the fatigue limit region of sintered steel*, rap. tech. Ser. PRE nr 31, Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 1992.
- [28] Kaleta J., Żebracki J., *Use of the Villari effect in fatigue of sintered steel*, [w:] *Proc. 10th Int. Conf. on Exper. Mechanics*, J.F.S. Gomes (red.), Lisbon, Portugal, 1994, 1241–1246.
- [29] Żebracki J., *Opis procesu zmęczenia za pomocą parametrów efektów magnetycznych*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 1997.
- [30] Kaleta J., Kocańda D., Skorupa M., Topoliński T., *Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji: Badania podstawowe*, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2000.
- [31] Kaleta J., *Doświadczalne podstawy formułowania energetycznych hipotez zmęczeniowych*, Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej nr 59, Seria Monografie nr 24, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
- [32] Kaleta J., Żebracki J., *Application of inverse magnetostriction to fatigue investigations*, [w:] *15th Conference on Materials Testing in Metallurgy. 11th Congress on Materials Testing. Conference proceedings*, tom 1, B. Vorsatz, E. Szoke (red.), Hungarian Mining and Metallurgical Society, Scientific Society of Mechanical Engineering, Balatonszeplak, Hungary, 1994, 228–232.
- [33] Kaleta J., Kotowski P., Żebracki J., *Effect of corrosion on cyclic properties of E 355-CC steel*, [w:] *Proceedings of EUROMAT 94*. 1994, 171–175.
- [34] Kaczmarek K., Kaleta J., Żebracki J., *Villari effect in biaxial stress under cyclic loading conditions*, *Archiwum Budowy Maszyn XLIII*, 1996, 185–196.

- [35] Kaleta Jerzy G.R., *Metoda wizualizacji pól krzyżowych w tarczach obciążonych cyklicznie*, [w:] *Materiały XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz–Pieczyska 2002, 171–178.
- [36] Górecki R., *Przestrzenne, cykliczne pola krzyżowe dla wybranych tarcz z otworami; rozwiązania i wizualizacja*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2000.
- [37] Kaleta J., Wiewiórski P., *Magnetic field distribution detecting and computing methods for experimental mechanics*, *Engineering Transactions*, 58, 2012, 97–118.
- [38] Kaleta J., Wiewiorski P.K., *The dipole contouring method as a tool for magnetic field distribution in premagnetization in Smart actuator*, [w:] *Proceedings of the IV ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, Álvaro Cunha, J.D. Rodrigues (red.), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto 2009, 1–7.
- [39] Wiewiórski P., *Magnetowizja i jej możliwości aplikacji w mechanice eksperymentalnej*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2013, w przygotowaniu.
- [40] Kaleta J., Wiewiórski P.K., *Detekcja defektów w magnetycznych prętach kompozytowych z użyciem skanera o dużej rozdzielczości*, *Acta Mechanica et Automatica*, 1, 1, 2007, 39–44.
- [41] Kaleta J., Wiewiorski P.K., *Wireless 3D magnetic field digitizer for inspection of parts constructed using smart magnetic materials*, [w:] *Proceedings of the IV Eccomas Thematic Conference on Smart Structures and Materials 2009*, 363–364.
- [42] Domański M., *System magnetowizyjny*, *Informatyka Teoretyczna i Stosowana*, 3, 4, 2003, 87–97.
- [43] Fassa B., Kaleta J., Wiewiórski P.K., *Przemiana martenzytyczna indukowana odkształceniem plastycznym w foliach z metastabilnego austenitu*, [w:] *VIII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2001, 343–350.
- [44] Kaleta J., Wiewiórski P., *Stanowisko do pomiaru efektów krzyżowych w procesie cyklicznego obciążania metali*, rap. tech., Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wroclawskiej, Wrocław 2012.
- [45] *General magnetoresistive sensors for magnetic field measurement*, philips Semiconductors Data Sheet 2000.
- [46] Honeywell, *1, 2 and 3-axis magnetic sensors*, Morristown, USA, 2007.
- [47] *Philips Semiconductors, dokumentacja produktów, Magnetoresistive sensors for magnetic field measurement* 2000.
- [48] *Honeywel, dokumentacja produktów, 1, 2 and 3-axis magnetic sensors* 2007.
- [49] Kaleta J., Wiśniewski W., *Metodyka badania przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym*, [w:] *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Nauki Techniczne. Mechanika*, Politechnika Białostocka, Białystok 2001, 219–230.
- [50] Kaleta J., Wiśniewski W., Wiewiórski P.K., *Magnetyczna metoda badania przemiany martenzytycznej indukowanej cyklicznym odkształceniem plastycznym w próbkach masywnych ze stali AISI 304*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz–Pieczyska 2008, 139–145.

- [51] Kaleta J., Wiewiórski P.K., Wiśniewski W., *Metody badania przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym w próbkach masywnych*, [w:] *XXIII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa–Jachranka 2008.
- [52] Kaleta J., Rikitatt M., Mech R., Wiewiórski P., Wiśniewski W., *Magnetowizyjna metoda wyznaczania fazy martenzytycznej w obiektach walcowych i kulistych w następstwie odkształceń cyklicznych*, [w:] *XIV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce–Cedzyna 2013.
- [53] Kaleta J., Wiewiórski P.K., *Magnetovision as a tool for investigation of fatigue process of ferromagnetics*, [w:] *Modern trends on fatigue. SAE Brasil International Conference on Fatigue. Fatigue 2001. Proceedings*, P. de Mattos Pimenta, L.C.H. Ricardo, A.F. Camarao (red.), SAE Brasil Sao Paulo Regional Section, Sao Paulo, Brazil 2001, 115–121.
- [54] Kaleta J., Wiewiórski P.K., Wiśniewski W., *Badanie tekstury blach ferromagnetycznych z wykorzystaniem efektu Villarięgo*, [w:] *II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji. Materiały*, A. Seweryn (red.), Dział Wydawnictw Poligraficznych Politechniki Białostockiej, Białystok 2003, 139–142.
- [55] Kaleta J., Wiewiórski P.K., Wiśniewski W., *Magnetyczna pamięć historii odkształcania materiału ferromagnetycznego*, [w:] *IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce–Cedzyna 2003, 221–228.
- [56] *Philips Semiconductors, Magnetic Field Sensor, KMZ52, Product specification* 2000.
- [57] *Philips Semiconductors, dokumentacja produktów, Magnetic Field Sensor, KMZ52* 2000.
- [58] Domański M., *System magnetowizyjny wspomagany procesorem DSP*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Wrocław 2002.
- [59] Błażejowski W., Rybczyński R., Wiewiórski P., *Identyfikacja struktur nawijanych butli kompozytowych*, [w:] *Materiały polimerowe*, T. Spychaj, S. Spychaj (red.), Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin 2010, 121–122.
- [60] Kaleta J., Wiewiórski P.K., *Budowa skanera magnetycznego do aplikacji w mechanice eksperymentalnej*, [w:] *XXIII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa–Jachranka 2008.
- [61] Kaleta J., Lewandowski D., Wiewiórski P., *3D magnetovision scanner as a tool for investigation of magnetomechanical principles*, *Solid State Phenomena*, 154, 2009, 181–186.
- [62] Kaleta J., Wiewiórski P.K., Wiśniewski W., *Magnetowizyjna metoda monitorowania przemiany martenzytycznej indukowanej cyklicznym odkształceniem plastycznym*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, J. Sempruch, D. Skibicki (red.), Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz–Pieczyńska 2010, 61–62.
- [63] Wiewiórski P., *Magnetyczna metoda wyznaczania utraty stateczności w procesach tłoczenia blach*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2002.
- [64] Fassa B., Kaleta J., Wiewiórski P.K., *Metodyka badania atermicznej przemiany martenzytycznej w foliach austenitycznych*, [w:] *Materiały XIX Sympozjum Zmę-*

- czenie i Mechanika Pękania*, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz–Pieczyńska 2002, 117–125.
- [65] Sablik M., *Modeling stress dependence of magnetic properties for NDE of steels*, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 5, 1, 1989, 49–65.
- [66] Kaleta J., Susz S., *Zautomatyzowany układ magnetowizyjny do badań procesu zmęczenia w ferromagnetykach*, [w:] *V Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce–Borków 1997, 113–120.
- [67] Susz S., *Metoda quasi-ciągłego, powierzchniowego pomiaru natężenia pola magnetycznego w ferromagnetyku obciążonym cyklicznie*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 1997.
- [68] Błażejowski W., *Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe wzmocnione włóknami według wzorów mozaikowych*, Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2013.
- [69] Kaleta J., *Magnetomechanical effect in fatigue investigations of ferromagnetics*, [w:] *Advances in mechanical behaviour, plasticity and damage. Proceedings of Euromat 2000*, D. Miannay et al. (red.), 2, 18. Elsevier, Tours, France 2000, 1149–1154.
- [70] Kaczmarek K., Kaleta J., Żebracki J., *Efekt Villariego w dwuosiowym stanie naprężenia w warunkach obciążenia cyklicznego*, [w:] *V Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Politechnika Świętokrzyska, Mąchoć–Ameliówka, Kielce 1995, 251–258.
- [71] Kaleta J., Żebracki J., *Wpływ procesu zmęczenia ferromagnetyków na efekt Villariego*, [w:] *Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn. II Konferencja naukowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Szklarska Poręba, Wrocław 1995, 319–330.
- [72] Talonen J., Aspegren P., Hänninen H., *Comparison of different methods for measuring strain induced α -martensite content in austenitic steels*, *Materials Science and Technology*, 20, 12, 2004, 1506–1512.
- [73] Nagy E., Mertinger V., Tranta F., Sólyom J., *Deformation induced martensitic transformation in stainless steels*, *Materials Science and Engineering: A*, 378, 1, 2004, 308–313.
- [74] Amitava M., De P., Bhattacharya Sr D., Srivastava P., Jiles D., *Ferromagnetic properties of deformation-induced martensite transformation in AISI 304 stainless steel*, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 2, 2004, 599–605.
- [75] Kaleta J., Zietek G., *Cyclic plastic deformation-induced martensitic transformation in austenitic steels*, *Advances in Fracture Research. ICF 9*, 1, 1997, 275–281.
- [76] Kaleta J., *Cykliczne odkształcenie plastyczne jako przyczyna przemiany martenzytycznej w stalach austenitycznych*, [w:] *Materiały XVI Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji*, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996, 99–102.
- [77] Tavares S., Fruchart D., Miraglia S., *A magnetic study of the reversion of martensite α' in a 304 stainless steel*, *Journal of Alloys and Compounds*, 307, 1, 2000, 311–317.
- [78] Lang M., Johnson J., Schreiber J., Dobmann G., Bassler H.J., Eiffer D., Ehrlich R., Gampe U., *Cyclic deformation behaviour of AISI 321 austenitic steel and its characterization by means of HTC-SQUID*, *Nuclear Engineering and Design*, 198, 1, 2000, 185–191.

- [79] Shin H.C., Ha T.K., Chang Y.W., *Kinetics of deformation induced martensitic transformation in a 304 stainless steel*, Scripta Materialia, 45, 7, 2001, 823–829.
- [80] Kaleta J., Lewandowski D., Wiśniewski W., *Kinetyka efektów krzyżowych w procesie przemiany martenzytycznej indukowanej cyklicznym odkształceniem w próbkach masywnych*, [w:] *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika*, 73, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2001, 391–400.
- [81] Ziętek G., Mróz Z., *Termomechanical model for austenitic steel with martensitic transformation induced by temperature and stress variation*, [w:] *Book of abstracts of the 38th Solid Mechanics Conference, SolMech*, Institute of Fundamental Technological Research (IPPT) of the Polish Academy of Sciences, Warsaw 2012, 114–115.
- [82] Ziętek G., Mróz Z., *On the hardening rule for austenitic steels accounting for the strain induced martensitic transformation*, The International Journal of Structural Changes in Solids, 3, 3, 2011, 21–34.
- [83] Ziętek G., Mróz Z., *Opis cyklicznego wzmocnienia stali austenitycznych z przemianą martenzytyczną wywołaną zmianami temperatury i naprężenia*, [w:] *VI International Symposium on Mechanics of Materials and Structures: Conference proceedings*, A. Seweryn (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2011, 183–184.
- [84] Ziętek G., Mróz Z., *Description of cyclic hardening of material with plasticity induced martensitic transformation*, [w:] *Selected topics of contemporary solid mechanics: proceedings of the 36th Solid Mechanics Conference*, Z. Kotulski, P. Kowalczyk, W. Sosnowski (red.), Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2008, 430–431.
- [85] Mróz Z., Ziętek G., *Dwupowierzchniowy model wzmocnienia plastycznego przy przemianie fazowej i deformacji cyklicznej*, Acta Mechanica et Automatica, 1, 1, 2007, 67–70.
- [86] Mróz Z., Ziętek G., *Modeling of cyclic hardening of metals coupled with martensitic transformation.*, Archives of Mechanics, 59, 1, 2007, 3–20.
- [87] Ziętek G., Mróz Z., *Modelowanie wzmocnienia metali przy deformacji cyklicznej z uwzględnieniem przemiany fazowej.*, [w:] *I Kongres Mechaniki Polskiej*, J. Kubik, W. Kurnik, W.K. Nowacki (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [88] Mróz Z., Ziętek G., *Modelowanie wzmocnienia przy odkształceniu cyklicznym indukującym przemianę martenzytyczną*, [w:] *Materiały III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji*, A. Seweryn (red.), Dział Wydawnictw Poligraficznych Politechniki Białostockiej, Augustów 2005.
- [89] Rikitatt M., *Magnetowizyjna metoda wyznaczania fazy martenzytycznej w austenicie w następstwie odkształceń*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2012.
- [90] Fassa B., Kaleta J., *Identyfikacja kinetyki przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym w foliach austenitycznych*, [w:] *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Nauki Techniczne*, 4, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2007, 27–29.
- [91] Banaś B., Junik K., Fassa B., *Wykorzystanie dyfraktometru RTG XSTRESS 3000 do badania martenzytu odkształcenia w folii austenitycznej*, Ser. PRE 14, Instytut

- Materiałoznawstwa i Mechniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, Referat z 47 Konwersatorium Krystalograficznego.
- [92] Fassa B., Kaleta J., Oleszko J., *Mikrozrywarka sterowana numerycznie do pracy w komorze próżniowej mikroskopu skaningowego*, [w:] *Materiały Konferencyjne XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Jachranka 2000, 199–202.
- [93] Hecker S.S., *Simple technique for determining forming limit curves*, *Sheet Metal Industries*, 52, 11, 1975, 671–676.
- [94] Zimniak Z., *Zastosowanie efektu Villariego w badaniach procesów tłoczenia blach – kamera magnetowizyjna*, [w:] *Materiały X konferencji Informatyka w technologii metali.*, Akapit, Wisła–Jawornik 2003.
- [95] Marciniak Z., Kuczyński K., *Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal*, *International Journal of Mechanical Sciences*, 9, 9, 1967, 609–620.
- [96] Zimniak Z., Kaleta J., Wiśniewski W., Wiewiórski P.K., *Zastosowanie efektu Villariego w badaniach procesów tłoczenia blach – Część II: Kamera magnetowizyjna*, [w:] *Materiały X konferencji Informatyka w technologii metali*, Akapit, Kraków 2003, 231–238.
- [97] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., *An initial investigation into change in magnetomechanical properties of Terfenol-D rod due to prestress and temperature*, *Anyagvizsgalok Lapja*, 14, 1, 2004, 19–21.
- [98] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., *Application of giant magnetostrictive material into construction of broad spectrum vibration generator*, *Materials Science Forum*, 482, 2005, 395–398.
- [99] Kaleta J., Kot K., Mech R., Wiewiórski P., *Zastosowanie rdzeni magnetostrykcyjnych do wytwarzania drgań i odzysku energii z drgań, w zakresie wybranych częstotliwości.*, [w:] *XIV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce–Cedzyna 2013, 54–55.
- [100] Kaleta J., Kot K., Mech R., Wiewiórski P., *Ultrasonic energy harvesting system based on magneto- and electrostrictive actuators*, [w:] *7th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures: conference proceedings*, Augustów 2013.
- [101] Williams A., Walls R., Davies B., Marchese J., Harris I., *A study of the thermal demagnetisation behaviour of Nd–Fe–B sintered magnets by a magnetic field mapping system*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242, 2002, 1378–1380.
- [102] Kaleta J., Wiewiórski P., *Magnetovisual method for monitoring thermal demagnetization of permanent magnets used in magnetostrictive actuators*, rap. tech., Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2013, raport niepublikowany.
- [103] Kaleta J., Mech R.P., Wiewiórski P.K., *Wykrywanie pęknięć w kompozytach magnetostrykcyjnych z proszkami Terfenolu-D za pomocą systemu MagScanner*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, J. Sempruch, D. Skibicki (red.), Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz–Pieczyska 2010, 59–60.
- [104] Kaleta J., Karcz M., Mech R.P., Wiewiórski P.K., *Charakterystyki magnetomechaniczne harvestera do odzysku energii z układów drgających*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, J. Sempruch, D. Skibicki (red.), Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz–Pieczyska 2010, 57–58.

- [105] Kaleta J., Wiewiórski P., Lewandowski D., *The advanced magnetovision system for Smart application*, [w:] *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials, and Nondestructive Evaluation, and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics 2010, 764920–764920.

Rozdział 8. Energy Harvesting

W rozdziale opisano rezultaty uzyskane w zakresie Energy Harvesting (dalej jako: EH; znany również w literaturze przedmiotu jako: *power harvesting* lub *energy scavenging*). EH to zestaw metod umożliwiających pozyskanie energii elektrycznej z otaczających źródeł, takich jak: energia mechaniczna, cieplna, słoneczna, energia elektromagnetyczna, gradienty zasolenia itd.) [1–14].

Energy Harvesting stwarza dziś nowe możliwości, szczególnie w zakresie zastosowań tzw. samozasilających się mikrosystemów (ang.: *self-powered microsystems*). Jest to następstwem postępu z zakresu materiałów i technologii umożliwiających odzysk energii z tzw. tła, czyli ze źródeł znanych, ale dotychczas pomijanych, czego z kolei powodem była mała sprawność przekształcania energii oraz wysoki koszt wytwarzania niezbędnych do tego celu urządzeń (tzw. harvesterów). Kluczowe znaczenie ma też malejące zużycie energii przez wspomniane mikrosystemy, co powoduje, iż źródła o mocy mili-, a nawet mikrowatów nabierają praktycznego znaczenia i pozwalają wyeliminować tradycyjne układy zasilania z użyciem systemów kablowych czy baterii lub akumulatorów. Szczególnie obiecującym obszarem zastosowań EH stają się układy do ciągłego monitorowania trudno dostępnych konstrukcji lub biomedycznych implantów, ale także rozproszone systemy detekcji zagrożeń na dużych powierzchniach (np. systemy przeciwpożarowe w lasach, czy wykrywania skażeń chemicznych lub radioaktywnych). Wiele konkretnych rozwiązań omówiono w dalszej części rozdziału. Przewiduje się, iż w nieodległej przyszłości moc układów EH znacznie wzrośnie i będzie miała znaczenie również w energetyce przemysłowej.

Na wstępie dokonano analizy literatury przedmiotu, szczególnie w zakresie zastosowań EH w samochodach, budownictwie oraz z wykorzystaniem organizmu człowieka jako źródła energii.

Opisano następnie główne kierunki badań i scharakteryzowano liczne własne konstrukcje, a w tym harvestery: z przetwarzaniem magnetycznym z wykorzystaniem efektu Faradaya, rezonansowe modalne, o dużym przyroście napięcia pod wpływem ruchu cewki, z ruchomym rdzeniem ze stali austenitycznej oraz z rdzeniem magnetostrykcyjnym. Opisano w szczególności budowę, wy-

brane charakterystyki oraz możliwe obszary zastosowań harvesterów. Podjęto zagadnienie miniaturyzacji konstrukcji harwestera i modyfikacji rdzenia magnetostrykcyjnego. Przeprowadzono też pomiary magnetowizyjne pola na zewnątrz harwestera. Zaprezentowano ponadto harvestery wykorzystujące udar mechaniczny i dedykowaną im przetwornicę oraz system elektroniczny małej mocy.

Opracowano metodę wykorzystania harvesterów i aktuatorów do bezprzewodowej transmisji energii i informacji z użyciem ultradźwięków (tzw. system SURPS). Zaprezentowano demonstratory do bezprzewodowej transmisji mocy i informacji w ciałach stałych i w cieczy. Stworzono autonomiczny system diagnostyki parametrów środowiskowych i eksploatacyjnych (Multi-DOF) oraz tzw. bezprzewodowe węzły harvestingowe.

Opisano przykłady wykorzystania innych materiałów Smart do EH, a w tym materiałów piezoelektrycznych i polimerów elektroaktywnych. Zdefiniowano na koniec kierunki dalszych badań.

8.1. Wprowadzenie

Energy Harvesting to wykorzystanie źródeł występujących powszechnie w otoczeniu (tzw. energia tła), które mają charakter niepożądany i zazwyczaj tłumiony (np. hałas, udary i drgania mechaniczne urządzeń i konstrukcji, smog elektromagnetyczny, ciepło w następstwie tarcia i spalania, przepływu prądu, chłodzenia silników itp.) lub powszechnie dostępny (światło słoneczne, energia fal, różnice zasolenia, procesy biochemiczne, np. w roślinach), a także związanych z biologią człowieka (ruch, ciepło ciała itp.), np. [15]. Aktualnie zakłada się, iż EH może być efektywnym źródłem „bezkosztowego” (po pominięciu kosztów instalacji) zasilania urządzeń małej mocy (np. urządzenia elektroniczne, układy sensorów itp.). Stąd narastające zainteresowanie aplikacjami cywilnymi i militarnymi. Zakłada się, iż w przyszłości rozległe systemy harvesterów będą również źródłem energii elektrycznej dużej mocy.

Znaczenie tematyki EH wynika z kilku powodów:

- Jednym z nich jest tendencja do tworzenia autonomicznych systemów zasilania energią elektryczną małej mocy urządzeń elektroniki użytkowej (w tym tzw. ang.: *Towards Zero-Power ICT*), czy różnorodnych systemów czujnikowych i systemów monitoringu (np. SHM – ang.: *Structural Health Monitoring*), np. [8, 16]. Zakłada się, iż nawet stosowanie baterii w tych przypadkach nie jest rozwiązaniem optymalnym, np. ze względu na uciążliwość wymiany baterii i ich recyklingu. Lepszym rozwiązaniem jest nieograniczone w czasie pobieranie energii z otoczenia.

- Zakłada się, iż w przyszłości EH będzie źródłem energii dużych mocy przez stworzenie odpowiednio rozległych sieci harvesterów.
- Obszar użytkowania EH dotyczy licznych już dziś zastosowań cywilnych i wojskowych oraz obejmuje takie dyscypliny, jak: medycyna, transport (samochody, lotnictwo, rurociągi), konstrukcje budowlane (mosty, budynki), konstrukcje mechaniczne, sprzęt sportowy i ratowniczy oraz wiele innych.
- Rozwój fizyki zjawisk krzyżowych, w których jedno pole (np. mechaniczne, cieplne, magnetyczne) umożliwia uzyskanie energii w innej postaci (np. elektrycznej) postępuje bardzo szybko i wsparty jest osiągnięciami w zakresie inżynierii materiałowej. Powoduje to łącznie, iż pojawia się coraz liczniejsza grupa materiałów nazywanych zazwyczaj Smart, które efektywnie wykorzystać można do budowy harvesterów.
- Liczba zjawisk fizycznych, które wytwarzają prąd elektryczny jest znaczna, np. [3, 13, 16–19]. Zaliczyć tutaj można np.:
 - efekt piezoelektryczny,
 - odwrotną magnetostrykcję (efekt Villariego),
 - zjawisko indukcji elektromagnetycznej Faradaya,
 - zjawisko termoelektryczne (efekt Seebecka),
 - elektryczność statyczną,
 - różnice parametrów superkondensatora,
 - efekt piroelektryczny,
 - jonizację za pomocą pola elektromagnetycznego.

EH można też zrealizować, stosując podwójne zjawiska krzyżowe, na przykład wytwarzać najpierw ciepło, a następnie prąd elektryczny. Do pierwszego etapu wykorzystać można np. zjawisko termoakustyczne. Stale rośnie bowiem zainteresowanie konwerterami termoakustycznymi. Mogą one służyć do zamiany ciepła na energię akustyczną lub zamiany energii akustycznej na ciepłą [10, 20, 21], która może być wykorzystana bądź bezpośrednio, bądź zamieniona łatwo na energię elektryczną. Konwertery termoakustyczne działają na zasadzie cyklu Stirlinga, wykorzystując jako czynnik roboczy gaz (najczęściej powietrze), i nie zawierają żadnych ruchomych części. Te właściwości umożliwiają wiele nowych zastosowań, które nie były do dziś realizowane z przyczyn technicznych lub ekonomicznych. Najważniejszy etap w eliminowaniu ruchomych części z urządzeń Stirlinga przyniósł wynalazek Beale'a [22] który zaproponował „tłok swobodny”, w którym wał korbowy i korbowody zostały zastąpione przez sprężyny gazowe tak, że ich charakterystyki oraz masa tłoka mogą być odpowiednio dobrane, powodując rezonacyjny ruch tłoków o wymaganej częstotliwości, amplitudzie i fazach.

Caperley [23] zauważył, że istotą urządzeń Stirlinga jest generator i towarzyszące wymienniki ciepła, których ciśnienie i prędkość drgań są zasadniczo

w fazie przypominającej bieżącą falę akustyczną. Skutkiem tego akustyczny układ toroidalny powinien osiągać sprawności bliskie sprawności Carnota. Praktyczne zastosowanie silnika termoakustycznego jest przedmiotem patentu [24]. W Polsce jest niewiele doniesień literaturowych dotyczących termoakustyki. Jedyne pozycje dotyczą termoakustycznych urządzeń chłodniczych [25, 26] z akustyczną falą stojącą.

Interdyscyplinarny charakter zagadnienia, jakim jest Energy Harvesting (fizyka efektów krzyżowych, inżynieria materiałowa, mechanika, elektronika), działa stymulująco na rozwój nauki i gospodarki. Należy podkreślić, iż, mimo licznych prac podejmowanych głównie w ostatnim dziesięcioleciu w ośrodkach badawczych krajów najbardziej rozwiniętych, tematyka EH i wykorzystywanych w tym celu różnorodnych materiałów Smart jest nadal bardzo aktualna naukowo i aplikacyjnie. Wiodące gospodarki i ośrodki naukowe przeznaczają znaczne środki na badania podstawowe i stosowane w zakresie EH. Charakterystyczny np. jest wzrost programów badawczych z tego zakresu w ramach Sixth Framework Programme (FP6)¹ i Seventh Framework Programme (FP7)² Unii Europejskiej. Tendencja ta utrzyma się przez wiele lat; prognozy w tym zakresie są jednoznaczne [27]. Szacuje się, iż w roku 2011 rynek harvesterów był wart 700 mln \$, a jego wartość w 2021 roku zwiększy się do ponad 4 mld dolarów. Przykładowo liczbę harvesterów (w 2011 r.) zastosowanych tylko w układach czujników bezprzewodowych i w elektronice użytkowej szacuje się na 1,6 mln sztuk. Należy przy tym podkreślić, iż nauka i gospodarka polska odstają w tym zakresie od głównych trendów.

8.2. Wybrane obszary zastosowań EH

Ponieważ przegląd stanu wiedzy z zakresu podstaw fizykalnych i wszystkich możliwych aplikacji EH wykracza poza zakres niniejszej monografii, dlatego w dalszej części opisano jedynie wybrane zastosowania.

¹ Sixth Framework Programme (FP6), przykłady programów z zakresu EH: MESEMA – Magnetoelastic Energy Systems for Even More Electric Aircraft, VIBES – Vibration energy scavenging, WIBRATE – Wireless, Self-Powered Vibration Monitoring and Control for Complex Industrial Systems, ADVICE – Autonomous Damage Detection and Vibration Control Systems, LC-ENERGY – Photovoltaic materials from novel self-assembling nanostructured liquid crystals.

² Seventh Framework Programme (FP7), przykłady programów z zakresu EH: NEMESIS – Novel Energy Materials: Engineering Science and Integrated Systems, WIBRATE – Wireless, Self-Powered Vibration Monitoring and Control for Complex Industrial Systems, NEHSTECH – Nonlinear Energy Harvesting Solutions for Micro- and Nano-Technologies, STRAINWISE – Hardware & Software Development of Wireless Sensor Network Nodes for Measurement of Strain in Airborne Environment.

8.2.1. Samochody

Możliwość użycia EH staje się realnym sposobem zwiększenia energii dostępnej w pojeździe. Przekształca się w tym celu energię ruchu (kinetyczną), ciepła, światła i innych źródeł [28–30]. Energię tę można wykorzystać na kilka sposobów, różnicując ją w zależności od pozyskanej mocy, a w tym:

- rzędu miliwatów [mW] lub mniej – do zasilania bezprzewodowych czujników i elementów wykonawczych,
- rzędu watów [W] – do samowystarczalnego zasilania wybranych elementów oświetlenia wewnętrznego. W przypadku gromadzenia energii (np. w superkondensatorach) może też służyć do zasilania klimatyzacji i wybranych podzespołów,
- rzędu kilowatów [kW] – do ładowania akumulatorów trakcyjnych lub superkondensatorów (w przypadku pojazdów elektrycznych lub/i hybrydowych), dostarczających z kolei energię do elektrycznych silników trakcyjnych.

Daje się przy tym zauważyć tendencję do tworzenia tzw. systemów multimodalnych, zdolnych gromadzić energię łącznie z różnych układów EH.

Panele słoneczne zintegrowane z karoserią. Dobrze opanowaną technologią EH jest pozyskiwanie energii z paneli słonecznych zintegrowanych z dachem samochodu. Firma Webasto, od 1989 roku, wytworzyła ponad 250 000 zestawów dla takich producentów samochodów, jak Audi, Volkswagen, Škoda, Seat, Bentley i Maybach [28]. Najnowsze generacje dachów umożliwiają uzyskanie mocy ponad 100 W, przy sprawności ogniów rzędu 17% i służą do zasilania wentylacji, a także do ładowania akumulatorów. Jednocześnie oferuje się stacjonarne układy paneli słonecznych montowanych w garażu/domu do stacjonarnego zasilania akumulatora lub superkondensatora. Szacuje się, że technologia solarna z paneli zintegrowanych z dachem umożliwia pokonanie przez samochód na każde 100 km dodatkowo dystansu 6–8 km, obniżając w ten sposób zużycie paliwa.

Generatory termoelektryczne (ang.: *Thermoelectric Generators* – TEGs) wykorzystują efekt Seebecka, by wytworzyć prąd i efekt Peltiera w klimatyzacji [28, 31–33]. Najwięcej ciepła zawierają spaliny. To zrozumiałe, jeśli aż dwie trzecie energii ze spalania w pojeździe jest tracona w postaci ciepła odpadowego, z czego 40% w postaci gorących spalin. Dzięki zastosowaniu TEGs można odzyskać efektywnie – w postaci prądu – nawet do 5% energii [34, 35]. Układ TEG wymaga wysokich temperatur i zazwyczaj przystosowany jest do pracy w zakresie 400–800 °C [36, 37]. Ostatnio badane są tzw. dwustopniowe układy o większej sprawności, które zastosowano po raz pierwszy w samochodach BMW [38]. Generator typu TEG zainstalowany w 2007 roku przez firmę BMW umożliwiał uzyskanie mocy 200 watów, aktualnie już 600 watów, a obecnie wdrażany jest

model, który zapewni moc 1 kW. Podobne przykłady prezentuje Ford i konsorcjum Volvo-Renault Trucks.

Amortyzatory to kolejne znaczące źródło odzysku energii [39, 40], gdyż drgania z nierówności drogi umożliwiają uzyskanie mocy rzędu kilkuset watów (samochody osobowe), a nawet kilowatów (samochody ciężarowe i pojazdy wojskowe). Gigant handlowy – firma Wal-Mart – zakłada, że zaoszczędzi rocznie 13 milionów dolarów, stosując w swojej flocie amortyzatory z układem EH. Nowe amortyzatory mają dodatkowo system *fail-safe*, co oznacza, iż w przypadku awarii amortyzator działa jak w rozwiązaniu konwencjonalnym [28].

Hamowanie regeneracyjne z wykorzystaniem systemu KERS (ang.: *Kinetic Energy Recovery System*) umożliwia – w samochodach elektrycznych lub hybrydowych – ładowanie akumulatora lub superkondensatora, np. [41, 42].

Udane eksperymentalne aplikacje w samochodach Formuły 1 aktualnie zastosowano w samochodach powszechnego użytku. W lutym 2011 r., Volkswagen zaprezentował nowy dwumiejscowy hybrydowy samochód, tzw. koncepcyjny, w którym oszczędność paliwa z tytułu zastosowania SARS umożliwia przejechanie dodatkowo do 35 km (na każde 100 km, w porównaniu z wersją bez SARS) [32].

Przytoczono tylko wybrane przypadki aplikacji EH w samochodach. Równie liczne przykłady można wskazać w odniesieniu do obiektów latających i pływających zarówno cywilnych, jak i wojskowych.

8.2.2. Budowle, infrastruktura techniczna

Strukturalny monitoring obiektów technicznych (ang.: *Structural Health Monitoring* – SHM) umożliwia optymalne zarządzanie infrastrukturą, czyli podejmowanie właściwych decyzji o eksploatacji, naprawach bądź likwidacji obiektów. Zmniejsza to koszty i poprawia bezpieczeństwo użytkowania. Przykładowo [16] metro w Londynie dysponuje tunelami, w większości eksploatowanymi od 75 do 100 lat, których dalsza przydatność musi być systematycznie i szybko oceniana. Londyńskie wodociągi Thames Water mają z kolei sieć rurociągów długości 31 000 km, z których połowa ma więcej niż 100 lat, a trzecia część więcej niż 150 lat, czego następstwem są wycieki rzędu 30% wody tłoczonych. Infrastruktura drogowa i kolejowa Wielkiej Brytanii obejmuje 150 tysięcy mostów i wiaduktów.

Wymienione przykłady dobitnie ilustrują problem zarządzania infrastrukturą, czego obecnie nie można realizować bez gigantycznej sieci czujników, najlepiej bezprzewodowych, tworzących rozbudowane systemy SHM. Systemy te muszą być zasilane, aktualnie najczęściej z użyciem baterii lub akumulatorów, wymagających okresowej wymiany. Zakłada się, że moc wszystkich baterii i akumulatorów, zapewniających pobieranie odczytu (np. co 3 minuty), wymaga mocy również 4,6 MW. Zastosowanie idei EH wydaje się zatem oczywiste. Są bowiem duże moż-

liwości wykorzystania do tego celu ogniw słonecznych, energii drgań konstrukcji, przepływu powietrza i wody oraz wielu innych.

Przykład wykorzystania drgań mostu do generacji prądu i zasilania systemu SHM zaprezentowano szczegółowo np. w pracy [43]. Literatura przedmiotu z tego zakresu jest bardzo obszerna, np. [44–49], i warta szerszego omówienia, co przekracza jednak ramy niniejszej monografii.

8.2.3. Człowiek jako źródło energii

Aktywność człowieka może być źródłem energii [50–52], którą częściowo można wykorzystać do zasilania wyposażenia osobistego, kontroli stanu organizmu oraz leczenia. Moc wytwarzana podczas różnych czynności jest znaczna i wynosi (w watach) odpowiednio: jazda na rowerze – 40–400, spacer – 163, marsz – 407, pływanie – 582, wspinaczka – 698, bieg długodystansowy – 1048, sprint – 1630. Energia pozyskiwana z organizmu nosi często nazwę bioharvestingu (ang.: *bioEnergy Harvesting* – bEH).. Podejmowane są liczne próby tworzenia harvesterów w tym zakresie, tylko nielicznie przytoczono w dalszej części.

Ruch. Ruch stawu kolanowego może być szczególnie efektywnym źródłem energii. Prototypowa konstrukcja (w oryginale: *Bionic Energy Harvester*) [53] wykorzystuje zaawansowane układy elektroniczne w celu zbierania tylko nadmiaru energii. Mierzony jest kąt zgięcia kolana podczas każdego kroku, aby określić, kiedy można włączyć generator bez zwiększania obciążenia idącego. Zakłada się, że masa układu prototypowego (ok. 1,5 kg) zostanie zmniejszona w najbliższym czasie do około 0,5 kg. Wykazano, iż jedna minuta spaceru wystarczy do zapewnienia energii niezbędnej do półgodzinnej rozmowy przez telefon. Rozwiązaniem zainteresowana jest armia kanadyjska, która dofinansowuje badania. Żołnierz zmuszony jest nosić nawet do 30 kg baterii, aby zapewnić łączność, nawigację, zasilanie specjalistycznych celowników, kamer itp. Generator może istotnie zmniejszyć tę masę. Rozwiązaniami zainteresowana jest też policja, straż pożarna, turyści, alpinści i inni, którzy zmuszeni są do dłuższego przebywania w oddaleniu od źródeł zasilania.

Innym przykładem są buty sportowe, w których podeszwie usytuowano harwestery. Liczba rozwiązań z tego zakresu jest znaczna, np. [54–57].

Siłownie i kluby odnowy biologicznej to wręcz wzorcowe przykłady wykorzystania pracy mięśni. Łatwość integracji harvesterów z przyrządami do ćwiczeń może być źródłem znacznych oszczędności. Właściciel siłowni Microgym w Portland [58, 59] zakłada, iż umiejętne połączenie zasilania z ogniw słonecznych i przyrządów zawierających harwestery umożliwi funkcjonowanie obiektu przy zerowym zasilaniu z sieci elektrycznej.

Dyskoteka WATT Klub w Rotterdamie ma podłogę, która, uginając się pod tancerzami, zasila harvestery piezoelektryczne [60]. Moc 20 watów wystarczy do zasilania oświetlenia podłogi (diody LED). Bardziej zaawansowana technologia została wykorzystana w nocnym klubie Surya w Londynie [52].

Innym przykładem jest plecak, którego ruch „góra–dół”, w trakcie marszu, uruchamia generator o mocy 20 watów (dla masy plecaka ok. 40 kg), co wystarczy do zasilania baterii i gadżetów [61]. Jedna z formacji sił zbrojnych USA (US Marine Corps) jest zainteresowana wdrożeniem rozwiązania i współfinansuje badania. Bardziej zaawansowaną wersję plecaka zaprezentowano w [62].

Można też korzystać ze stanowiska podobnego do treningowego roweru stacjonarnego, w którym energia kinetyczna „rowerzysty” służy do ładowania akumulatorów sprzętu elektronicznego [63], takiego jak telefony, notebooki czy odtwarzacze MP3.

Ruch wykorzystany może być w inny sposób. Przykładem jest generator piezoelektryczny wytworzony w Georgia Institute of Technology, w którym zastosowano nanodrut z kryształów tlenku cynku umieszczone na włóknie Kevlar i zintegrowano z tkaniną. Takie minigeneratory wplecione w odzież, podczas ruchu, powodują wytwarzanie energii przez wzajemne ocieranie się nanodrutów i ich zginanie. Zakłada się, że tkanina o powierzchni 11 metrów kwadratowych wytworzy moc 80 miliwatów, co wystarczy do zasilania telefonu komórkowego lub innego gadżetu o zbliżonych parametrach. Ograniczeniem jest wilgoć i dlatego prowadzone są aktualnie prace nad nową generacją – odpornych na wodę – włókien [64].

Pozyskiwanie energii z ciała pacjenta. Można wskazać wiele przyczyn ekonomicznych, społecznych i technicznych, które stymulować będą rozwój technologii pozyskiwania energii z wykorzystaniem ciała pacjenta do celów diagnostycznych i terapeutycznych. Można tutaj wymienić, np. [65]:

- redukcję kosztów indywidualnej opieki zdrowotnej,
- eliminację konieczności stosowania zewnętrznych źródeł energii (baterii, akumulatorów) do zasilania czujników, aktuatorów itp., stosowanych w permanentnej diagnostyce lub leczeniu pacjenta,
- ograniczenie roli opiekunów z równoczesną poprawą mobilności pacjenta, a tym samym zmniejszeniu jego izolacji,
- udoskonalenie monitorowania organizmu (tzw. telemonitoring parametrów zdrowia), co może skutkować ograniczeniem dawek leków, szybszą pomocą medyczną w sytuacji zagrożenia i zwiększeniem poczucia bezpieczeństwa u pacjenta,
- sukcesywne i łączne postępy w zakresie technologii oraz anatomii i fizjologii człowieka, co umożliwi wsparcie – lub w skrajnych sytuacjach zastąpienie –

funkcji układów krążenia, nerwowego, mięśniowego, hormonalnego, a także widzenia i słuchu,

- miniaturyzacja czujników i aktuatorów oraz postępy w inżynierii materiałowej, co w połączeniu z nowymi zasadami zarządzania zasilaniem, powoduje radykalne zmniejszenie zapotrzebowania na energię.

Znaczący wpływ na rozwój EH w tym zakresie mają postępy w budowie czujników i sieci czujników w aplikacjach medycznych, np. [66]. Chodzi przy tym głównie o rozwój sieci czujników bezprzewodowych (ang.: *Wireless Sensor Network* – WSN) do monitorowania stanu pacjenta w szpitalu i w domu [67–69]. Popyt na tego rodzaju rozwiązania będzie się systematycznie zwiększał ze względu na starzenie się społeczeństw [70]. Sieci czujników, diagnozujących duże powierzchnie ciała pacjentów (ang.: *Body Area Sensor Networks* – BASN), lub ich wersje bezprzewodowe (ang.: *Wireless Body Area Networks* – WBAN) coraz częściej są stosowane do permanentnego monitorowania funkcji życiowych pacjenta [71]. Wszczepiane wersje takich czujników umożliwiają diagnostykę *in vivo* bez konieczności lub przy skróceniu czasu pobytu w szpitalu [72]. Efektywność takiego monitorowania, poza żywotnością systemu czujników, uzależniona jest głównie od możliwości pozyskania energii z organizmu pacjenta [73].

Jak zaznaczono uprzednio, to są tylko wybrane przykłady badań i aplikacji z zakresu EH. Warto też wspomnieć o przewidywanej roli Energy Harvesting w takich przyszłościowych i fascynujących dziedzinach jak Internet Rzeczy (ang.: *Internet of Things* – IoT) oraz Internet Energii (ang.: *Internet of Energy* – IoE), np. [74, 75].

Energy Harvesting. Wybrane aspekty historyczne. Na koniec należy jeszcze podkreślić, iż odzyskiwanie energii z otoczenia było od tysiącleci stosowaną przez ludzkość metodą zasilania maszyn. Przykłady takie, jak wiatraki młynów, koła wodne, koła deptakowe czy kieraty występowały powszechnie w różnych kulturach, czyli przed wynalezieniem ogniwa Volty (A. Volta, 1799), indukcji elektromagnetycznej (M. Faraday, 1831), zjawiska termoelektrycznego (T.J. Seebeck, 1821), zjawiska fotowoltaicznego (A.E. Becquerel, 1839) czy efektu piezoelektrycznego (Pierre i Jacques Curie, 1880). Współcześnie trudno sobie wyobrazić życie bez energii, niezbędnej podczas produkcji przemysłowej, transportu, ogrzewania czy oświetlenia. Obecnie po fazie fascynacji energią uzyskiwaną metodami przemysłowymi, zazwyczaj związaną z nieodwracalnym zużyciem gigantycznych ilości paliw kopalnych i negatywnymi następstwami dla środowiska naturalnego, następuje docenienie również jej tradycyjnych źródeł. Zauważono ponadto, iż można – chociaż częściowo – wykorzystać energię „odpadową”, towarzyszącą procesom technologicznym (np. ciepło) i użytkowaniu maszyn (np. drgania). Przyrost wiedzy z zakresu fizyki efektów krzyżowych oraz wytworzenie szerokiej grupy materiałów Smart umożliwiło również sięgnięcie do dużej palety źródeł i sposobów przetwarzania

nia, określanych wspólnie jako Energy Harvesting. Kluczowe znaczenie miał też rozwój nowych generacji czujników i systemów monitorowania konstrukcji, dla których stworzono pakiety elektroniczne małej mocy, których zasilanie stało się możliwe tylko z wykorzystaniem harvesterów.

Warto zaznaczyć, iż termin Power Harvesting, we współczesnym rozumieniu, został prawdopodobnie użyty po raz pierwszy w roku 1998 [56], termin Energy Harvesting z kolei – w roku 2000 [76], a synonim w postaci Energy Scavenging – w roku 2001 [77]. Jeden z pierwszych patentów z tego obszaru pochodzi z kolei z 2002 r. [78]. Charakterystyczne jest to, iż pierwsze prace z zakresu EH dotyczyły głównie aplikacji materiałów piezoelektrycznych. Od roku 2001 liczba prac szybko narasta, np. [79–81]. Przeszukiwarka Google, po wstawieniu słów kluczowych Energy Harvesting, wskazuje dziś ponad 11 milionów haseł (stan z sierpnia 2013 r.). Dominują prace autorów z USA, Korei, Chin i Indii. Liczba prac polskich autorów nie jest jeszcze znacząca [82–89]³. Na uwagę zasługują szczególnie spójne tematycznie prace autorów z Politechniki Lubelskiej [82–88].

Wcześniej zacytowano wiele reprezentatywnych pozycji literaturowych, w tym i przeglądowych. Analizę literatury przedmiotu przeprowadzono w ostatnim okresie w wielu pracach, np. [90], w tym również w zespole autora [91].

8.3. Energy Harvesting, rola materiałów Smart

Opisując materiały magnetyczne Smart i mając na uwadze ich właściwości, trudno nie podjąć w badaniach własnych zagadnienia ich aplikacji w zakresie odzysku energii (Energy Harvesting – EH) oraz – co omówiono dalej – bezprzewodowego transferu energii oraz informacji.

Można wręcz stwierdzić, iż rozwój EH możliwy jest dzięki postępom nauki i inżynierii w zakresie materiałów Smart, w tym stymulowanych polem magnetycznym. Z szerokiej ich grupy za szczególnie warte uwagi i przyjęcia za obiekt badań w zakresie EH uznano materiały o **gigantycznej magnetostrykcji** (ang.: *Giant Magnetostrictive Materials* – GMM). Decydujące znaczenie mają tutaj właściwości GMM (rozd. 3). Typowym przykładem jest Terfenol-D. Materiały o gigantycznej magnetostrykcji mogą zamienić energię magnetyczną w mechaniczną i odwrotnie. Dzięki takim właściwościom materiały te można wykorzystywać w budowie czujników, aktuatorów oraz harvesterów. GMM uzyskują dużo większe odkształcenia (Terfenol-D nawet do 70 razy) od tradycyjnych materiałów magnetostrykcyjnych, a do uzyskania tego efektu wymagane jest niezbyt duże natężenie pola magnetycznego H . Zachodzi też efekt odwrotny. Relatywnie małym odkształceniom

³ Nie uwzględniono prac zespołu autora, które zostały przytoczone w dalszej części rozdziału.

odpowiada względnie duża wartość pola magnetycznego, a zatem i wyindukowanego prądu elektrycznego (w porównaniu z innymi ferromagnetykami). Bardzo ważną cechą tych materiałów jest szeroki zakres temperatury pracy, a także ich mała bezwładność (małe pole pętli histerezy), co ułatwia zastosowanie ich w różnych warunkach. Temperatura Curie dla Terfenolu-D wynosi 653–693 K, natomiast temperatura pracy może dochodzić do 473 K. Naprężenia wywoływane przez GMM mogą dochodzić do 30 MPa.

Harvestery z wykorzystaniem GMM zazwyczaj – ze względów ekonomicznych – zawierają również magnesy neodymowe. Przykłady zastosowań GMM w zakresie EH obejmują lotnictwo, transport samochodowy, stacjonarne konstrukcje mechaniczne, medycynę, sprzęt sportowy i turystyczny oraz wiele innych. Celem badań jest głównie zwiększenie sprawności przekształcania energii mechanicznej w elektryczną, miniaturyzacja harvesterów i redukcja ich ceny.

Lity Terfenol-D, mimo swoich licznych zalet, ma kilka wad, które utrudniają jego szerszą aplikację w zakresie EH. Znaczącym mankamentem jest przede wszystkim duża kruchość, która wiąże się z małą wytrzymałością na rozciąganie. Innym ograniczeniem są prądy wirowe o znacznej wartości, co ogranicza efektywną częstotliwość pracy urządzeń do kilku kiloherców. Ważnym parametrem jest też cena Terfenolu-D, która utrzymuje się na poziomie 1 \$/1 g. Ograniczenia te są powodem poszukiwania nowych rozwiązań. Jednym z nich są **kompozyty magnetostrykcyjne** (patrz rozdz. 4), które również mogą być stosowane w budowie harvesterów.

Reasumując można stwierdzić, iż mimo licznych prac, podejmowanych głównie w ostatnim dziesięcioleciu w ośrodkach badawczych wiodących krajów, zarówno GMM, kompozyty z ich udziałem i aplikacje tych materiałów w zakresie EH są w pełni aktualnym problemem podstawowym, jak i aplikacyjnym. Dlatego aspekty te rozpatrzono sukcesywnie w dalszej części monografii.

8.4. Energy Harvesting a bezprzewodowy transfer energii i informacji

Stosowanie harvesterów wymaga coraz częściej rozwiązania problemu niekonwencjonalnego transferu energii i informacji przez media stałe, ciekłe i gazowe. Dlatego uznano za istotne scharakteryzowanie stanu wiedzy w tym zakresie i podjęcie badań własnych. Materiały Smart mogą być w tym przypadku efektywnie wykorzystane do bezprzewodowego przekazywania energii i informacji z użyciem drgań ultradźwiękowych. Stosuje się najczęściej w tym celu przetworniki piezoelektryczne i magnetostrykcyjne. Istnieje wiele sposobów bezprzewodowej transmisji energii (ang.: *Wireless Power Transmission*) z użyciem różnych sprzężeń, np.:

indukcyjnego (najbardziej dziś popularne od czasu pionierskich prac N. Tesli), sprzężenia pojemnościowego, mikrofal, sprzężenia optycznego i fal dźwiękowych, w tym ultradźwięków. Ta ostatnia możliwość znana jest od ponad 40 lat. W roku 1970 pojawiła się pierwsza praca [92] wskazująca na możliwość wykorzystania ultradźwięków nie tylko do badań medycznych czy inżynierskich, ale także jako nośnika energii w transmisji przez ciała stałe. Zaobserwowano wówczas łatwość, z jaką ultradźwięki przechodzą przez włókna w ciałach stałych. W roku 1998, wykorzystując podaną ideę, opatentowano specjalną elektrodę stymulującą pracę serca w przypadku arytmii [93]. Biomedyczne zastosowanie ultradźwięków do transmisji energii jest intensywnie rozwijane. Na szczególną uwagę zasługuje tu np. praca [94], w której pokazano sposób zasilania, za pomocą ultradźwięków, aktuatora umieszczonego w ciele człowieka. Idea tego rodzaju zasilania polega na tym, iż w odbiorniku energia fal ultradźwiękowych i drgania nimi wywołane wcale nie są przemieniane z powrotem na napięcie elektryczne, lecz przez układ elementów drgających – zasilają bezpośrednio aktuator. Inne ciekawe badania w tym zakresie opisano w pracach [95–97].

Poza zastosowaniami biomedycznymi, ultradźwiękowy przesył mocy (oraz, coraz częściej, danych) jest również przedmiotem intensywnych badań. W pracy [98] opracowano model bardzo wydajnego nadajnika do emisji ultradźwięków. Składa się on z dwóch okładek o kształcie ściętego stożka, wykonanych z brązu i wypełnionych w postaci PZT. Wykorzystano ideę opublikowaną w [99], która dotyczyła z kolei możliwości przesyłu energii przez różne bariery, w tym głównie ciała stałe. Zmodyfikowane wersje tej idei znaleźć można we wszystkich większych projektach dotyczących bezprzewodowego przesyłu energii.

Wiele uwagi poświęca się sprawności przekształcania energii z użyciem przetworników piezoelektrycznych. Najczęściej cytowane są w tym zakresie prace [81, 100, 101]. W ostatniej z nich wykazano sprawność na poziomie 50% przy transmisji ultradźwięków w powietrzu na odległość 70–80 m. Równie spektakularnymi osiągnięciami legitymuje się zespół holenderski [102, 103]. Innym ciekawym przykładem jest przesył danych z pomocą ultradźwięków po poszyciu samolotu [104, 105].

Należy zauważyć bardzo intensywnie rozwijane działania na rzecz opanowania efektywnego transferu energii i informacji przez grube metalowe bariery, głównie z wykorzystaniem harvesterów piezoelektrycznych. Prace te, zapoczątkowane w USA przez G.J. Saulniera w roku 2006 [106], zyskały zainteresowanie marynarki wojennej ze względu na możliwości przesyłania energii i informacji przez grube ściany okrętów podwodnych. Szczególnie znaczące rezultaty opublikowane w pracy doktorskiej T.J. Lawry'ego [107] oraz w kilkunastu publikacjach po jej obronie, np. [108, 109]. Z dwóch ostatnich wynika, że stan wiedzy umożliwia zastosowanie

tych przekładników na łodziach podwodnych już dziś. Ciągłe dostarczanie około 50 W energii elektrycznej, razem z 12,4 Mbps danych przez 2,5-calowe (ponad 6 cm) metalowe ściany, to idealny system do zastosowania w okrętach podwodnych, które wymagają dużej szczelności i bezpieczeństwa. W pracy [108] zwraca się też uwagę, iż system może być także wykorzystany w okrętach nawodnych, pojazdach bezzałogowych, transporterach opancerzonych i czołgach oraz samolotach.

Kolejnym dużym, amerykańskim projektem, finansowanym przez NASA, są badania prowadzone przez zespół S. Sherrita z Jet Propulsion Laboratory. Badania, rozpoczęte już w 1998 r., dotyczyły możliwości generowania i odczytywania sygnałów ultradźwiękowych za pomocą piezoelektrycznych aktuatorów i generatorów [110]. W latach 2005–2008 ta technika była stale doskonała. W roku 2005 opisano podstawy teoretyczne przesyłu energii przez elastyczne materiały grubości powyżej 1,5 cm [111] z użyciem aktuatorów piezoelektrycznych, a następnie – w celu poprawy sprawności – z zastosowaniem specjalnych grafitowych „plastrów” naklejanych cienkimi warstwami po obu stronach ścianki [112]. Osiągnięto w rezultacie poziom umożliwiający pierwsze próby w pojazdach amerykańskiej agencji kosmicznej (NASA). Wieloletnie prace zespołu podsumowano w obszernej publikacji dotyczącej fizycznych podstaw ultradźwiękowego harvestingu [113] z użyciem piezoelektrycznych odbiorników i nadajników. Ostatnio zespół pod przewodnictwem S. Sherrita opracował metodę zasilania silnika krokowego przez metalową ścianę zbiornika [114]. Dzięki jednostajnej transmisji mocy możliwe jest ciągle sterowanie silnikiem przez generowane fale ultradźwiękowe. Co ciekawe, fala ta nie jest tutaj zamieniana na energię elektryczną i znów na energię mechaniczną silnika, ale drgające elementy wywołują ruch silnika bezpośrednio dzięki odbieraniu fal ultradźwiękowych.

Szerzej analizę literatury w zakresie transferu mocy z użyciem ultradźwięków przeprowadzono w pracy [115].

W pracy [103] zwraca się uwagę, iż transfer energii z użyciem ultradźwięków, znany od ponad 40 lat, jest nadal bardzo aktualnym tematem badań podstawowych i stosowanych. Dopiero w ostatniej dekadzie udało się uzyskać znaczące efekty praktyczne. Nadal jeszcze sprawność przekształcania energii nie jest zadowalająca i zmienia się od tylko 1% podczas transferu 1 mikrowata energii przez ciało do 84% w czasie przesyłania energii o mocy 1 kW przez sztywną ścianę. Dotychczasowe badania zdominowane są też przez użycie przetworników piezoelektrycznych, gdy w wielu przypadkach lepsze może się okazać użycie harvesterów magnetostrykcyjnych [115], co opisano w dalszej części.

8.5. Energy Harvesting, badania własne

8.5.1. Wprowadzenie. Rozwój wybranych technologii harvestingowych

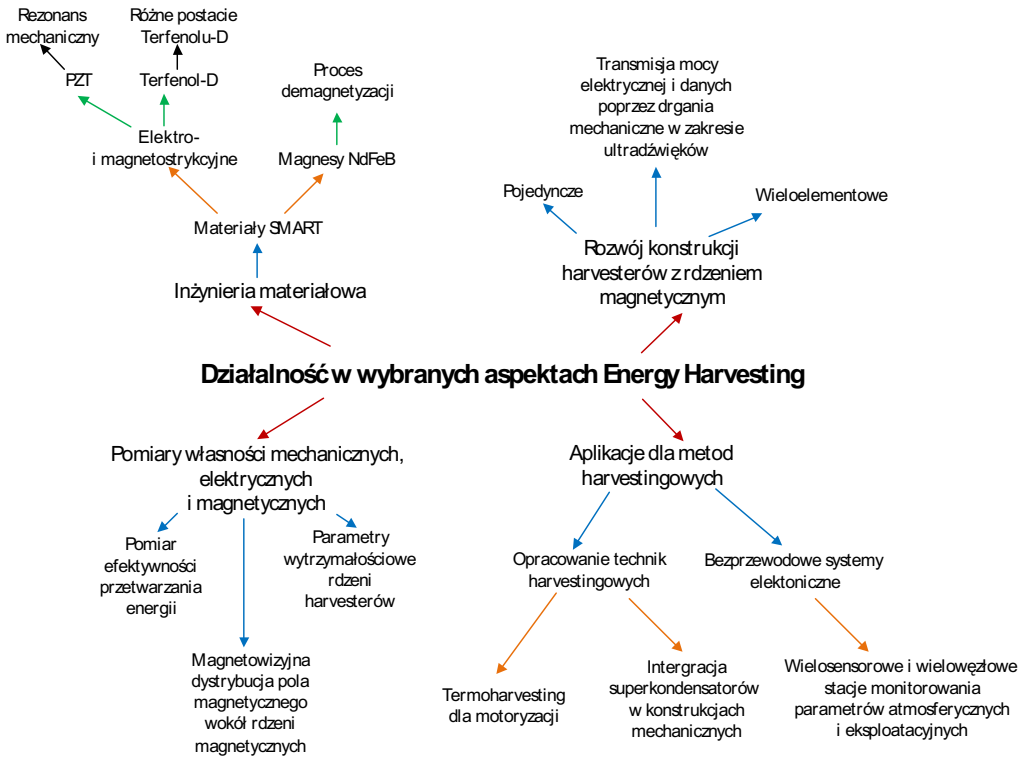
Ze względu na cele naukowe i zainteresowania zespołu autora, dalsze prace miały na uwadze zastosowanie metod zwiększających parametry harvesterów, w tym głównie sprawności przekształcania energii, z wykorzystaniem zdobytego doświadczenia w zakresie magnetomechanicznych efektów krzyżowych, materiałów Smart, wytrzymałości materiałów i konstrukcji mechanicznych oraz metod pomiaru.

Obszerność tematyki wymagała narzucenia ograniczeń. Dlatego za kluczowe uznano harvestery magnetostrykcyjne, wykorzystujące materiały typu GMM. Dzięki ich zastosowaniu uzyskano przyrządy zdolne odzyskać energię ze źródeł do tej pory nieeksplorowanych takich, jak udar mechaniczny. Istotnym ograniczeniem harvesterów o rdzeniu magnetycznym są jego wymiary i masa. Instalowanie harvesterów piezoelektrycznych jest dużo prostsze niż harwestera o rdzeniu magnetycznym, wymagającego skomplikowanej konstrukcji mechanicznej oraz premagnetyzacji i naprężenia wstępnego (ang.: *prestress*). Zagadnienia te omówiono szerzej w rozdziale 3. Jednak osiągi prądowo-napięciowe harvesterów magnetostrykcyjnych są o rząd większe od harvesterów innych typów. Dlatego uznano ten typ harvesterów za szczególnie interesujący. W dalszych konstrukcjach zostanie uwzględniona dalsza miniaturyzacja przyrządów. Aktualne i przyszłe zainteresowania w tym zakresie charakteryzuje graf przedstawiony na rysunku 8.1.

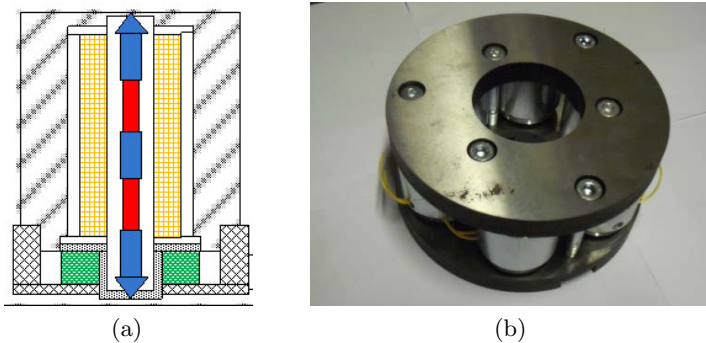
Dalej zaprezentowano jedynie skrótowo przykłady wdrażanych technologii harvestingowych, których szersze omówienie nastąpi w dalszej części.

Podstawowe sposoby odzysku energii, to odpowiednio:

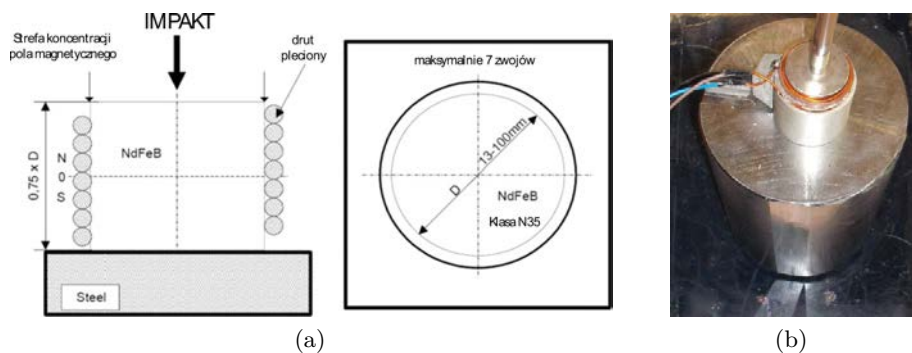
- **Odzysk energii z udaru mechanicznego i przetwarzanie na prąd elektryczny:**
 - z użyciem obwodu magnetycznego z kompozytowym materiałem magnetostrykcyjnym [116–119] (rys. 8.2),
 - z zastosowaniem gwałtownej demagnetyzacji magnesów neodymowych NdFeB [118–123] (rys. 8.3),
- **Termoharvesting:**
 - z wykorzystaniem ośrodka o różnicy temperatury większej niż 10 °C względem otoczenia [91, 124],
 - z wykorzystaniem ciepła ciała człowieka do zasilania urządzeń Ultra Low Power [91, 124, 125] (rys. 8.4).
- **Przesyłanie energii niezbędnej do zasilenia bezprzewodowego węzła harvestingowego w układzie nadajnik energii–odbiornik energii:**



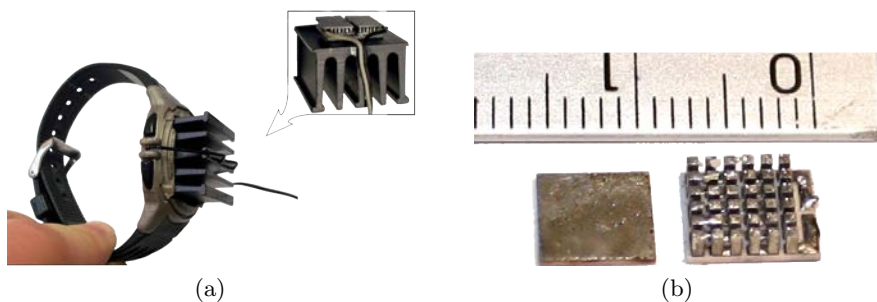
Rys. 8.1. Określenie głównych obszarów badań własnych podjętych w zakresie Energy Harvesting



Rys. 8.2. Harwestery z rdzeniem Smart: a) schemat struktury, b) prototypowa konstrukcja wielonodowa (6 harvesterów) [116–119]



Rys. 8.3. Harvestery uderowe na bazie magnesów neodymowych:
a) schemat idei odzysku energii z impaktu, b) prototyp harvestra dużej mocy [118–123]



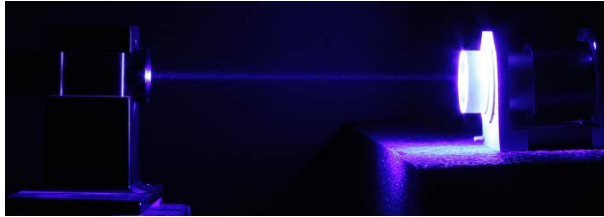
Rys. 8.4. a) moduły termoharwestery w aplikacji bioharwestingu, b) budowa pojedynczego modułu Peltiera [119, 125]



Rys. 8.5. Stanowisko do transmisji mocy elektrycznej i danych przez drgania mechaniczne [118, 119, 126–128]

- o z zastosowaniem ultradźwiękowego magnetostrykcyjnego przetwornika energii mechanicznej [118, 119, 126–128] (rys 8.5),

- z wykorzystaniem zasilania przez transmisję z użyciem „niebieskiego” lasera [119, 129] (rys. 8.6),



Rys. 8.6. Transmisja mocy elektrycznej i danych przez wiązkę niebieskiego lasera [119, 125, 129]

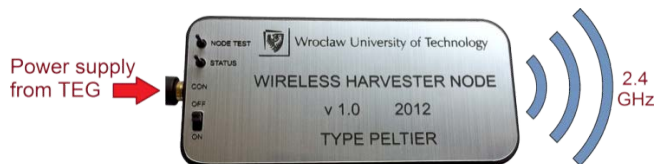
- **Bezobsługowe przechowywanie energii elektrycznej w konstrukcjach mechanicznych:**

- przez integrację superkondensatorów z konstrukcją mechaniczną [119, 125, 129],

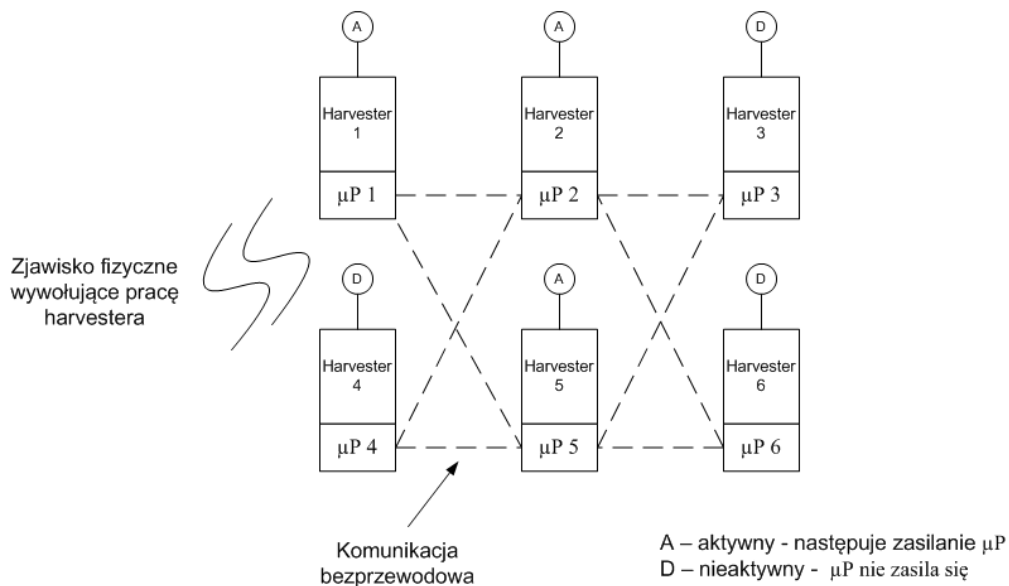


Rys. 8.7. Superkondensator o pojemności 20F wbudowany w belkę utwierdzoną z jednej strony poddaną drganiom wymuszonym [119, 125, 129]

- przez zapewnienie stabilności struktur superkondensatorów pod wpływem drgań mechanicznych i czynników atmosferycznych.
- **Wielowęzłowe systemy harvestingowe do równoczesnego odzyskania energii z wielu źródeł, a w tym:**
 - wielowęzłowe struktury harvestingowe na bazie miniaturowych harvesterów z rdzeniem magnetostrykcyjnym [118],
 - bezprzewodowy monitoring parametrów węzła harvestingowego z wykorzystaniem czujników MEMS dla aplikacji SHM [130],
 - systemy mikroprocesorowe zasilane ze źródeł harvestingowych [130, 131],
 - autonomiczny system monitorowania Multi-DOF [129, 130].



Rys. 8.8. Widok pojedynczego elektronicznego węzła bezprzewodowego zasilanego ze źródła harvestingowego [119, 129]



Rys. 8.9. Aktywacja harvesterów przez zjawisko fizyczne [118, 121, 132]

W zakresie techniki małej mocy przyjęto definicję harwestera jako zasilacza pojedynczego mikroprocesora, który po zasileniu w sposób bezprzewodowy wysyła dane zgodnie ze swoim algorytmem działania (kod programu) do jednostki odbierającej i przetwarzającej informacje. Pojedynczy system harvestingowy jest węzłem w większej strukturze zarządzanej z ośrodka centralnego. Poszczególne konfiguracje harvesterów mogą ułatwiać dostrojenie zasilacza harvestingowego do określonych zjawisk wywołujących jego działanie. Na rysunku 8.9 przedstawiono schemat własnej struktury harvestingowej składającej się z kilku harvesterów uaktywnianych na skutek bodźca zewnętrznego.

8.5.2. Harvester jako generator prądu elektrycznego

Moce laboratoryjnie konstruowanych harvesterów stawały się coraz większe, stąd urządzenia takie traktowano jako (źródło) generator prądu elektrycznego. Ze względu na zjawisko fizyczne wykorzystane do efektu EH, budowę, zasadę działania oraz warunki, w jakich pracuje harvester, można podzielić, ze względu na źródła o różnych charakterystykach, następująco:

- stałonapięciowe (np. harvestery oparte na efekcie termoelektrycznym),
- zmiennonapięciowe (np. harvestery oparte na efekcie Faradaya, np. jako Piezo Patch),
- impulsowe (np. harvestery typu Solid State, np. TCCM).

Zasilanie impulsowe różni się od zmiennonapięciowego częstotliwością występowania wymuszenia i chwilową wartością generowanego prądu. Zasilanie zmiennonapięciowe charakteryzuje się częstotliwościami zbliżonymi do prądu w sieci elektrycznej (50/60 Hz). Generacja napięcia w zasilaniu impulsowym zachodzi rzadko i przez bardzo krótki czas, ale amplituda jest bardzo duża. Ze względu na charakterystyki obwodów harvesterów można je z kolei podzielić na:

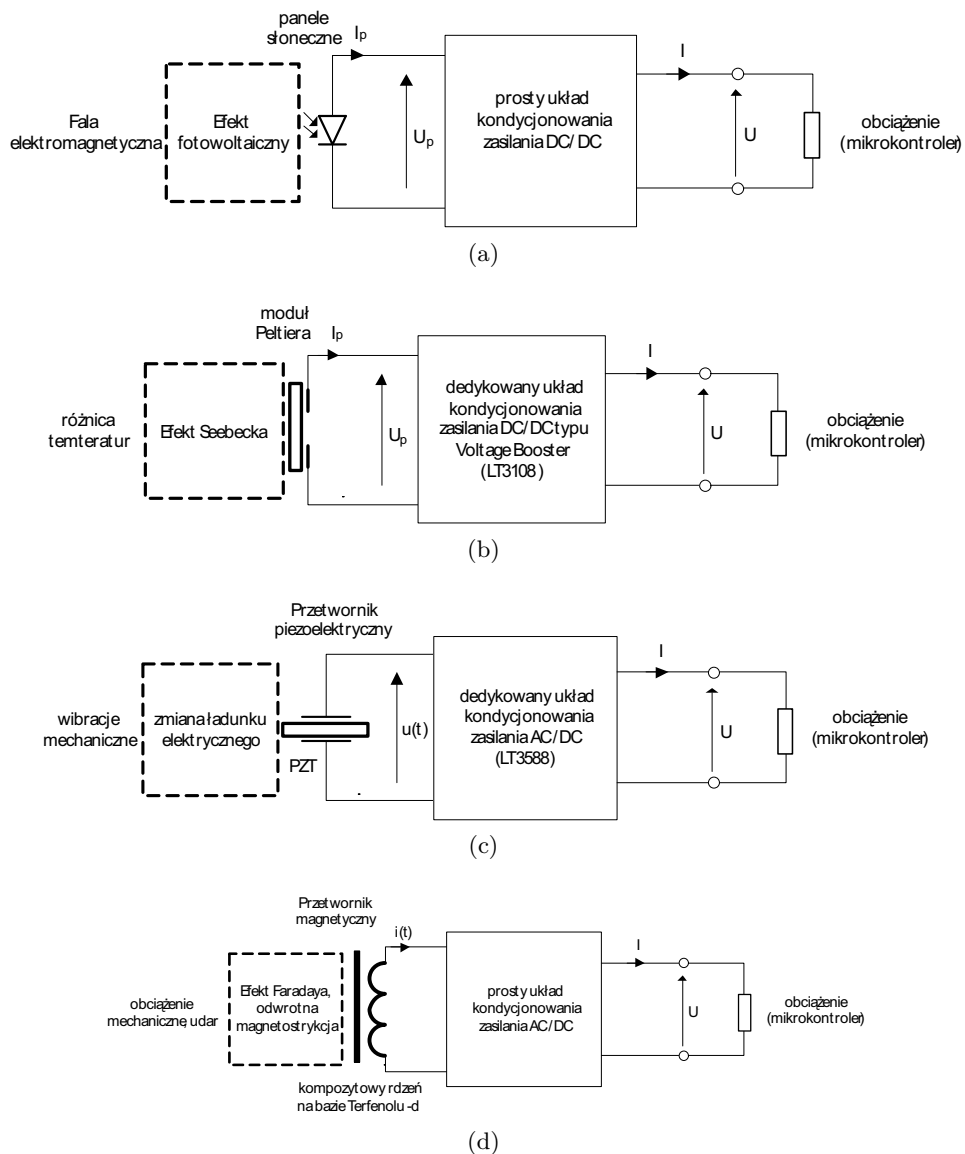
- źródła prądowe (prądnica Faradaya, harvestery magnetostrykcyjne),
- źródła napięciowe (typu Piezo Patch).

8.5.3. Rodzaje obwodów elektrycznych ze względu na źródła energii

Istotą EH jest stworzenie nowych koncepcji generatorów prądu, wykorzystujących zjawiska krzyżowe, w tym coraz częściej zjawiska magnetomechaniczne. Zakłada się, że nawet dla małych mocy i sprawności może być to wartościowe źródło zasilania. Rozwinięcie technologii konstruowania harvesterów, o podobnych parametrach elektrycznych jak ogniwa chemiczne, może spowodować ograniczenie produkcji tych ostatnich ze względów ekologicznych. Jako że harvestery pozyskują energię w sposób niepasowy, czyli przetwarzają energię uznawaną za uboczną („śmieciową”) procesu, zwiększają sprawność układu jako całości.

Zarówno prąd, jak i napięcie elektryczne muszą mieć parametry niezbędne do zasilania zarówno samych sensorów i wbudowanego procesora z dopasowanym do niego przetwornikiem, jak i zespołu komunikacyjnego. Kolejny problem to przetworzenie i kondycjonowanie napięcia/prądu z generatora (rys. 8.10) [116, 118, 120, 131, 133]. Projektowanie obwodów elektrycznych harvesterów wymaga znajomości charakterystyki pracy urządzenia.

Tylko harvestery bazujące na efekcie termoelektrycznym lub fotowoltaicznym generują prąd stały. Harvestery odzyskujące energię z drgań, magnetostrykcyjne, piezoelektryczne, jak i oparte na efekcie Faradaya, są natomiast źródłami prądu przemiennego. Szczególnym przypadkiem są harvestery zasilane impulsem uderze-



Rys. 8.10. Konfiguracje obwodów elektrycznych ze względu na odzysk energii z określonego źródła i przetwornika: a) solarne, b) różnic temperatury, c) przetwornika piezoelektrycznego, d) przetwornika magnetycznego [116, 118, 120, 131, 133]

nia [131]. Generacja energii elektrycznej w zasilaniu impulsowym zachodzi przez bardzo krótki czas, ale amplituda prądowa jest bardzo duża. Harvestery „zasilane” udarem mechanicznym generują zmienny przebieg napięcia. Charakteryzuje się on jednocześnie silnym impulsem prądu, a w sygnale generowanym występują częstotliwości związane z rezonansem magnetycznym układu rdzeń–cewka. W dalszej części przedstawiono nową metodę pozyskiwania prądu elektrycznego w wyniku demagnetyzacji magnesów neodymowych w obwodzie z rdzeniem magnetostrycyjnym.

8.5.4. Harvestery z przetwarzaniem magnetycznym

Energię elektryczną można wygenerować, działając na cewkę zmiennym polem magnetycznym. Pole takie może zostać wyindukowane przez inną cewkę, w której płynie zmienny prąd, mówimy wtedy o wzajemnej indukcji cewek. Na tej zasadzie działa transformator. Z definicji harvester powinien być skonstruowany tak, aby nie wymagał dodatkowego zasilania. Materiałami, które mogą być wykorzystane do generowania zmiennego pola magnetycznego, są:

- magnesy stałe (np. neodymowe NdFeB), które są źródłem stałego pola magnetycznego. Aby móc odzyskiwać energię przez cewkę, niezbędne jest źródło zmiennego pola magnetycznego, co oznacza ruch względem siebie układu magnes–cewka,
- materiały o gigantycznej magnetostrykcji (ang. GMM – *Giant Magnetostrictive Material*) – prace nad nowymi materiałami doprowadziły do rozwoju materiałów o gigantycznej magnetostrykcji, które poddane działaniu siły odkształcają się, generując jednocześnie zmienne pole magnetyczne.

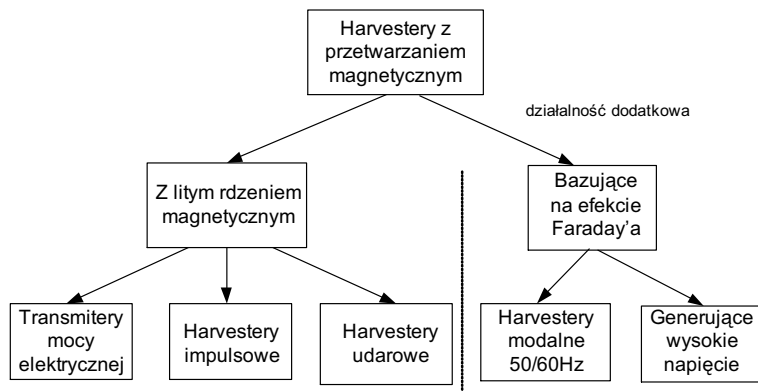
Jeżeli harvestery oparte na tych metodach poddane zostaną drganiom mechanicznym, które są efektem ubocznym pewnego procesu, to można uznać je za „darmowe” źródło zmiennego prądu elektrycznego, będącego skutkiem pojawienia się zmiennego pola magnetycznego, generowanego w cewce. Zastosowanie z kolei nowoczesnych materiałów Smart umożliwia uzyskanie najlepszych parametrów przetwarzania energii [117, 126, 134–136].

W ramach badań własnych wyodrębniono grupę materiałów Smart przeznaczonych do aplikacji harvestingowych oraz opracowano wiele rozwiązań i metod harvestingowych predystynowanych do aplikacji SHM [115, 121, 130, 132].

Zakres prac nad magnetycznymi harvesterami został przedstawiony na rysunku 8.11 [119, 129].

Harvestery z rdzeniem magnetycznym Smart można zastosować jako:

- zasilacz impulsowy działający pod wpływem udaru mechanicznego o energii dostosowanej do wielkości rdzenia harwestera, warunkującego jego moc elektryczną,



Rys. 8.11. Badania własne. Typy harvesterów z przetwarzaniem magnetycznym [119, 129]

- jako transmitter mocy elektrycznej działający pod wpływem drgań ultradźwiękowych o częstotliwości powyżej 25 kHz, dostarczanych bądź z aktuatora, bądź określonego procesu technologicznego.

8.5.5. Harvestery z wykorzystaniem efektu Faradaya

Uzyskiwanie energii przez ruch magnesów stałych w cewce jest znane od wielu lat. Wykorzystywane jest do wytwarzania generatorów i prądnic, np. tych stosowanych podczas konstrukcji elektrowni wiatrowych czy dynamy.

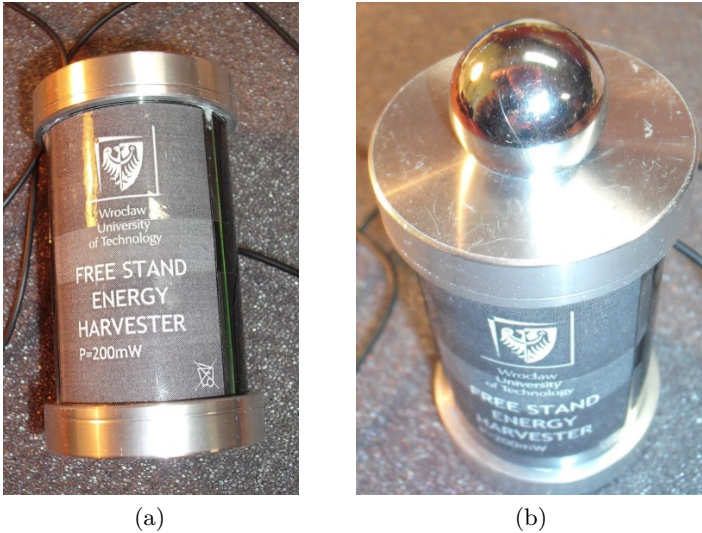
Wartość prądu generowanego przez harvester elektrodynamiczny, z poruszającym się magnesem stałym względem cewki, jest proporcjonalna do prędkości tego ruchu. Generowane jest duże natężenie prądu, ale stosunkowo niskie napięcie.

Harvestery wykorzystujące ruchomy obwód magnetyczny są również przedmiotem prac własnych. Ich rozwój podyktowany jest potrzebami aplikacyjnymi w wybranych konstrukcjach mechanicznych. Dominują trzy grupy harvesterów opartych na efekcie Faradaya:

- rezonansowe – modalne (50/60 Hz),
- przesuwne z ruchomą cewką bądź magnesem,
- z ruchomym (poddanym zgniotowi) rdzeniem ze stali austenitycznej.

Harvestery rezonansowe modalne (50/60 Hz)

Harvestery oparte na rezonansie mechanicznym obwodu magnetycznego mocowane są w konstrukcjach, w których występują elementy ruchome powodujące drgania całej konstrukcji bądź zawierających napędy zasilane prądem zmiennym (50/60 Hz). Elementy zawieszenia obwodu magnetycznego są tak dobrane, żeby wystąpił w nim rezonans mechaniczny pod wpływem drgań konstrukcji, powodujący największy przyrost generowanego napięcia z zapewnieniem długotrwałej



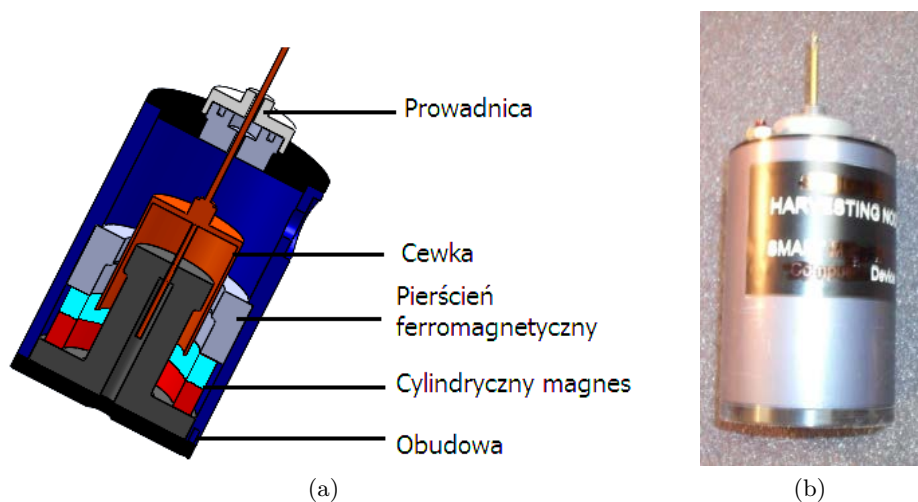
Rys. 8.12. a) widok harwestera modalnego 50 Hz, b) z dodatkowa masą [129, 130]

pracy harwestera w takich warunkach, bez jakiegokolwiek uszkodzenia delikatnych części ruchomych. W opracowanym rozwiązaniu oczekiwana odzyskiwana moc elektryczna zawiera się w przedziale 10–200 mW, w zależności od wielkości harwestera i charakterystyki drgań mechanicznych. Na rysunku 8.12a przedstawiono widok harwestera modalnego [129, 130].

W celu zwiększenia osiągnięć harwestera zachodzi możliwość dodania drgającej na nim masy, co poprawia jego wydajność prądową. Widok takiego rozwiązania został przedstawiony na rysunku 8.12b [129, 130].

Harvester o dużym przyroście napięcia pod wpływem ruchu cewki

Do odzyskiwania energii z drgań szczególnie przydatny wydaje się liniowo działający układ magnes–cewka, podobnie jak w czujnikach elektrodynamicznych drgań. Inną grupę harvesterów stanowią rozwiązania z ruchomą cewką o tak dobranej liczbie zwojów i obwodzie koncentratora magnetycznego, żeby otrzymać wysokie napięcie, nawet do ok. 200 V (rys. 8.13) [118, 130]. Mocowane są one zazwyczaj do elementów o ruchomych częściach z dużym przesuwem liniowym do około 30 mm. Nawet niewielka częstotliwość tych ruchów jest w stanie zapewnić zasilanie dla sygnalizacyjnych lamp neonowych lub – po przetworzeniu napięcia – do systemów mikroprocesorowych.



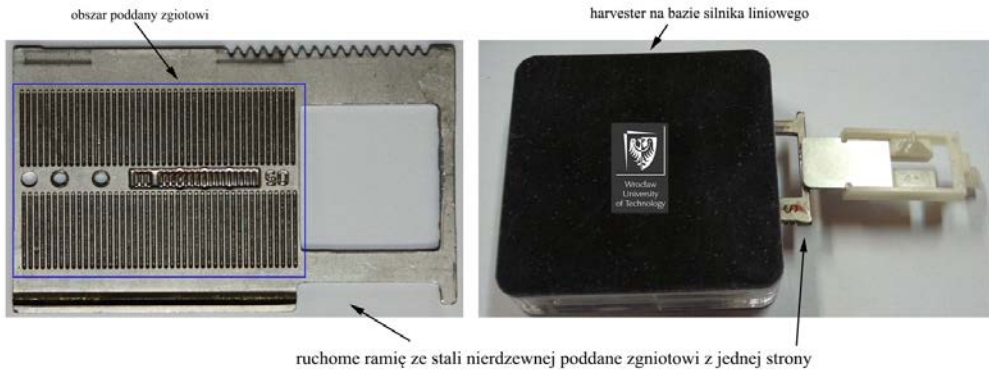
Rys. 8.13. Harvester wysokonapięciowy oparty na efekcie Faradaya:
a) budowa, b) widok [118, 130]

Harvestery z ruchomym, poddanym zgniotowi rdzeniem ze stali austenitycznej

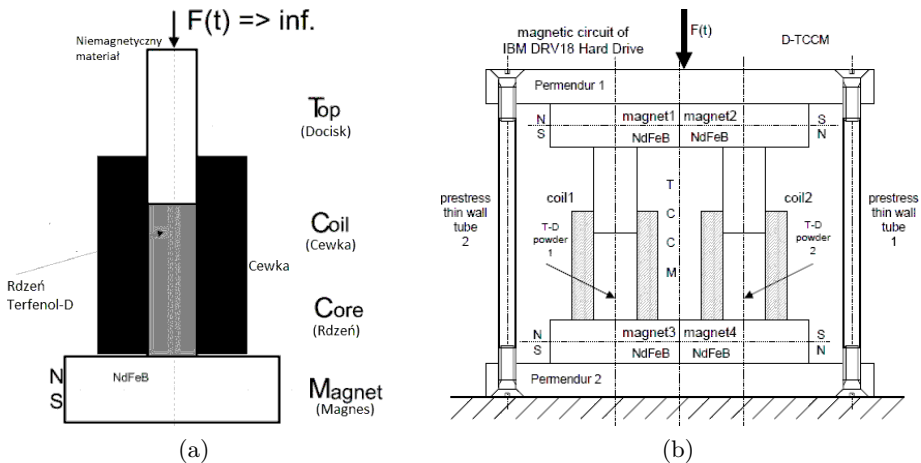
W metastabilnej stali austenitycznej, przez zgniot w zadanych miejscach, można wydzielić silnie magnetyczną fazę (martenzyt α'), z której można wytworzyć ruchomy rdzeń przechodzący przez obwód magnetyczny, uformowany jak w typowym silniku liniowym, tyle że opartym na odpowiednio dobranej konfiguracji magnesów neodymowych (rys. 8.14) [129]. W urządzeniu wykorzystuje się wyłącznie przesuw liniowy rdzenia. Dzięki zwartej i płaskiej konstrukcji, urządzenia zasilające tego typu charakteryzują się dużą wydajnością prądową. W wyniku przesuwu zasilany jest układ mikroprocesorowy wykonujący określony algorytm i przesyłający bezprzewodowo dane do jednostek odbiorczych.

8.5.6. Harvester z rdzeniem magnetostrykcyjnym

Harvester typu TCCM (ang.: *Top Core Coil Magnet*, (rys. 8.15a) i jego nowocześniejsza wersja DTCCM (ang.: *Double Top Core Coil Magnet* (rys. 8.15b) to w obu przypadkach oryginalna konstrukcja własna składająca się z czterech części, a mianowicie: niemagnetycznego docisku, cewki, rdzenia (Terfenol-D w postaci proszku) i magnesu neodymowego (NdFeB). Rdzeń umieszczony jest wewnątrz cewki, której uzwojenie znajduje się w polu wytwarzanym przez magnes. Działanie polega na wywołaniu siły przez docisk na rdzeń magnetostrykcyjny, co wytwarza pole magnetyczne indukujące napięcie w cewce. W celu zwiększenia sprawności



Rys. 8.14. Harvester z ruchomym rdzeniem na bazie obwodu silnika liniowego [129]

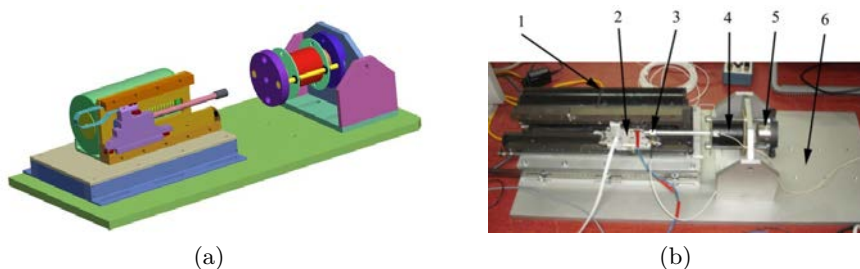


Rys. 8.15. a) widok harvesterów TCCM, b) harwestera DTCCM [116, 131]

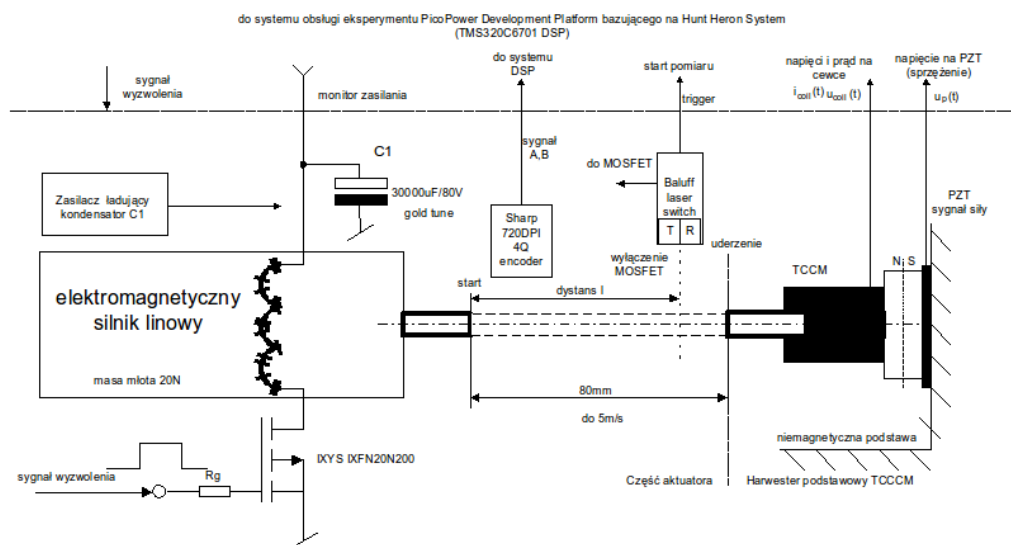
układu, rdzeń jest obciążony z możliwością regulacji naprężeniem wstępnym (ang.: *prestress*) [116, 131].

Określenie parametrów dynamicznych harwestera TCCM

W Laboratorium Dynamiki Politechniki Wrocławskiej zostało opracowane stanowisko do impulsowego zadawania obciążenia mechanicznego harvesterów typu TCCM. Do badań zastosowano też własne stanowisko pomiarowe z systemem Pico Power Development Platform, zawierające procesor sygnałowy DSP [131]. System pomiarowy zapewniał rejestrację w czasie parametrów mechanicznych, magnetycznych i elektrycznych. Ideę i widok stanowiska przedstawiono na rysunku 8.16. Na



Rys. 8.16. Stanowisko do określania parametrów harwestera: a) idea, b) widok; 1 – silnik liniowy, 2 – ruchomy wózek silnika liniowego, 3 – piezoelektryczny czujnik siły, 4 – cewka indukcyjna, 5 – magnes NdFeB do wytworzenia stałego zewnętrznego pola wokół cewki, 6 – płyta bazowa stanowiska z regulacją pozycji cewki [116, 131]



Rys. 8.17. Schemat stanowiska do badań udarowych harwestera TCCM [116, 131]

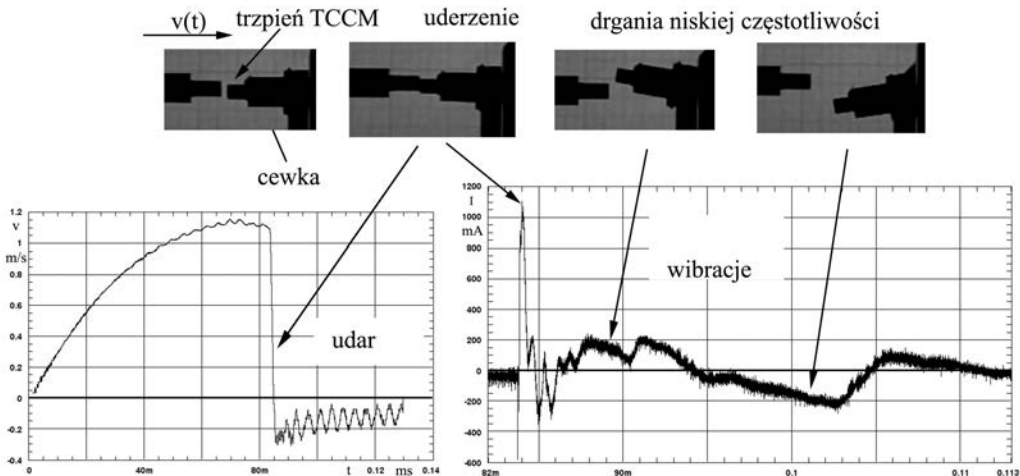
rysunku 8.17 z kolei zaprezentowano zestawienie poszczególnych komponentów współpracujących z systemem DSP.

Rozpędzony bijak, maksymalnie do prędkości 6 m/s, uderzając we wzorcowy układ magnetyczny harwestera TCCM wywoływał w cewce, o znanej liczbie zwojów, przyrost prądu o określonym widmie częstotliwości.

Harvester zamocowany był poziomo wraz z Piezo Patchem PZT na nieodkształcanej twardej powierzchni niemagnetycznej. W osi harwestera, w odległości 80 mm, znajdował się aluminiowy bijak rozpędzany do zadanej prędkości za pomocą szybkiego silnika liniowego, włączanego tranzystorem MOSFET firmy

IXYS. W momencie przekroczenia przez bijak laserowego punktu referencyjnego tranzystor MOSFET był wyłączany. Prędkość bijaka mierzona była przez pasek enkodera sprzężonego z czytnikiem firmy Sharp. System pomiaru drogi bijaka zapewniał rozdzielczość 720DPI. Energia uderzenia była regulowana za pomocą odważników mocowanych na elemencie ruchomym silnika liniowego. Maksymalna masa, jaka może być zastosowana do akumulacji energii, to 2 kg. Ze względu na niewielkie wymiary harwestera, zastosowano w tym przypadku bijak o masie 0,5 kg. Uzyskano dużą powtarzalność prędkości rozpędzania bijaka i miejsca wyłączenia tranzystora MOSFET, co w rezultacie przełożyło się na powtarzalność energii uderzenia.

Na rysunku 8.18 przedstawiono moment rozpędzenia bijaka aluminiowego do prędkości 1,1 m/s, co odpowiadało energii kinetycznej równej $E_k = 3,0 \text{ J}$. W momencie uderzenia następowało gwałtownie wyhamowanie bijaka i jego odbicie, które jest kontrolowane i skutecznie „wygaszane”. Ze zdjęć wykonanych podczas eksperymentu szybką kamerą wynika, że gdy – w niekorzystnym przypadku – bijak nie jest w położeniu współosiowym z harvesterem, następuje wibracja całego harwestera. Na wykresie prądu płynącego przez cewkę, z obciążeniem o charakterze wyłącznie rezystancyjnym (125Ω), widać wyraźnie skokową zmianę wartości odpowiadającą momentowi uderzenia. Widać także zmiany prądu o mniejszej wartości, będące z kolei następstwem drgań po uderzeniu. Aby harvester pracował optymalnie, generując prąd w jak najdłuższym czasie, wskazane jest zapewnienie występowania późniejszej samowibracji niskoczęstotliwościowej. Należy jednak



Rys. 8.18. Przebieg obciążenia udarowego na harvesterze TCCM [131]

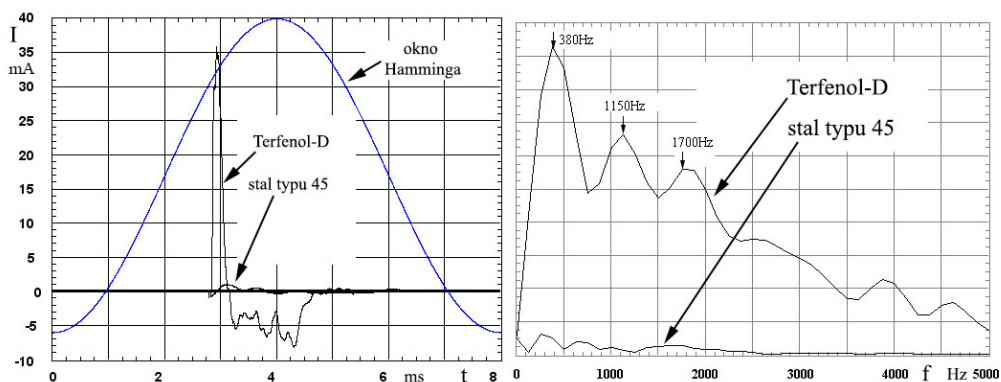
zaznaczyć, iż wartość prądu powstałego na skutek uderzenia jest o rząd większa niż w następstwie późniejszych wibracji.

Niewielkie zmiany warunków uderzenia (głównie osiowość bijaka i trzpienia T) skutkowały zatem istotnymi różnicami w uzyskiwanych wartościach prądu. Za główne kryterium analizy wpływu materiału na rdzeń C wewnątrz cewki przyjęto analizę wartości bezwzględnej (co oznacza tu idealne bezstratne „wyprostowanie” sygnału AC) prądu w czasie 1 ms od momentu uderzenia.

Drugi parametr, kluczowy w ocenie rdzenia (czyli rodzaju materiału i sposobu wytworzenia), to częstotliwości podstawowe rezonansu mechanicznego. Aby go wyznaczyć, wykonano analizę FFT sygnału prądowego z cewki pod obciążeniem rezystancyjnym 125Ω . Wykorzystano w tym celu pakiet biblioteki matematycznej Numerix SIGLIB v6.0, zaimplementowanej do programu Agilent VEE 5.0. Oryginalny sygnał prądowy z cewki został przetworzony z użyciem funkcji Hamminga. Wyniki zaprezentowano na rysunku 8.19 [116, 131]. Pomiar prądu przeprowadzono z częstotliwością próbkowania 1 MHz, stąd przeprowadzona analiza FFT dotyczyła widma do 500 kHz. Ze względu na zastosowanie funkcji okna, zawężono analizę widma do 10 kHz i 20 kHz w przypadku, gdy materiałem na rdzeń był Terfenol-D. Ze względów praktycznych nie wykonano skalowania amplitud poszczególnych składowych sygnału analizowanego w dB. Skupiono się wyłącznie na analizie samych częstotliwości, jakie powstawały na skutek uderzenia.

Wyniki zestawiono w tabeli 8.1. Wyraźnie widoczna jest przewaga rdzenia z Terfenolu-D, szczególnie w postaci litej, dla którego wartość średnia parametru I_{sr} jest największa.

Kolejne modyfikacje doprowadziły do stworzenia harwestera TCCM (model 2). Elementy składowe harwestera to odpowiednio: płyta górna z twardego materiału



Rys. 8.19. Sygnały zarejestrowane na stanowisku udarowego badania harvesterów wraz z porównaniem osiągnięć rdzeni terfenolowych i ze stali narzędziowej 45 [116, 131]

Tabela 8.1. Wyniki badań dla różnych rdzeni

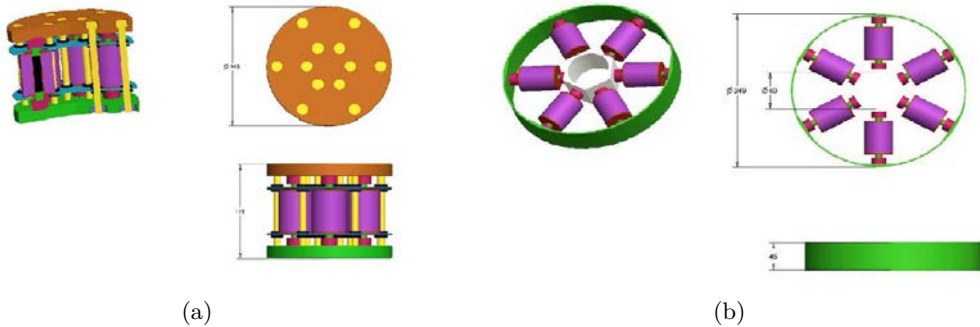
$E_k = 5,60 \text{ J}$, Obciążenie – 125Ω (Opór 4R7), $R_{coil} = 180 \Omega$				
Typ rdzenia	$I_{max} [\mu A]$ Wynik z czterech najlepszych serii	$I_{sr} [\mu A]$	FFT częstotliwość	
			$f1 \text{ Hz}$	$f2 \text{ Hz}$
Cu	1200	600	375	1500
Fe	1600	500	500	1750
Ferrite	500	200	375	1500
NdFeB	1200	400	875	1500
Terfenol-D (rdzeń proszkowy)	2500	800	250	1625
Terfenol-D (rdzeń lity)	35 000	8300	500	1875



Rys. 8.20. Budowa harvestera TCCM (model 2) [116, 121, 122]

o dużej przenikalności magnetycznej, magnes neodymowy o średnicy około dwa razy mniejszej od średnicy płyty górnej, element premagnetyzacji rdzenia, cewka indukcyjna, nieruchoma z otworem pod rdzenie cylindryczne, 10 mm, śruby pozycjonujące cewkę i zadające żądane naprężenie wstępne (*prestress*), rdzeń z materiału GMM, element mocujący harvester w maszynie wytrzymałościowej, pakiet nakrętek mocujących i ustalających cewkę, dolna płyta z twardego metalu o dużej przenikalności magnetycznej.

Widok harvestera przedstawiono na rysunku 8.20. Jednym z priorytetów konstrukcyjnych była standaryzacja poszczególnych wymiarów, dzięki czemu każdy z elementów składowych harvestera mógł być wymienny i w łatwy sposób zdejmowany. W konstrukcji wykorzystano cylindryczny rdzeń z materiału o gigantycznej



Rys. 8.21. Koncepty harvesterów wielonodowych: a) na planie okręgu, b) z cewkami rozłożonymi promieniowo [116]

magnetostrykcyj (GMM), sprzężony dwustronnie, magnetomechanicznie z użyciem cylindrycznych magnesów neodymowych (NdFeB). W pracy [116] rozważono również mankamenty konstrukcji, w tym zbyt duży strumień rozpraszania pola magnetycznego na zewnątrz oraz dużą masę i wymiary harwestera w stosunku do zyskiwanych wartości prądu elektrycznego. Zaproponowano także kilka modyfikacji oraz nowych konstrukcji. Jedną z nich był tzw. wielonodowy harvester jedno- lub dwurdzeniowy (rys 8.21a). Prototyp takiego harwestera zaprezentowano z kolei na rysunku 8.21b.

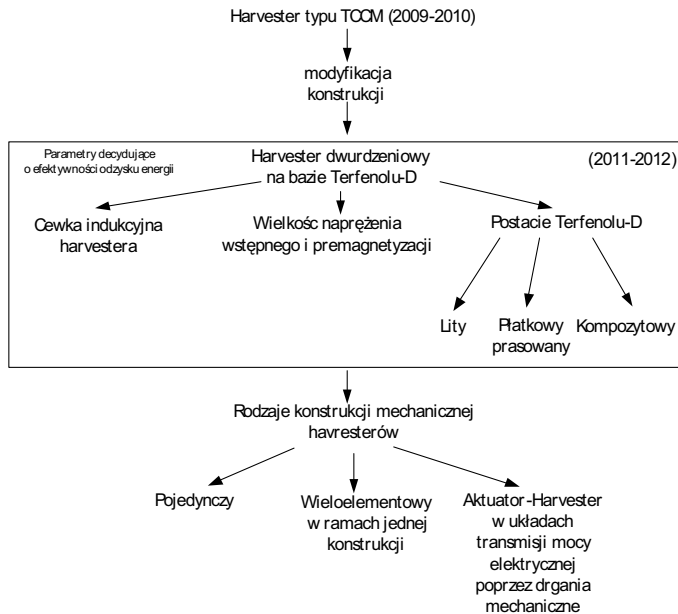
Kolejnymi koncepcjami są harwestery wielonodowe o dużej powierzchni płyty dociskowej. Mogą one odzyskiwać energię z drgań w wielkogabarytowych konstrukcjach. Wielokrotne cewki umożliwiają maksymalne wykorzystanie energii z drgań. Propozycją montażu takiej konstrukcji może być np. most, w którym drgania generowane są na skutek ruchu przejeżdżających po nim pojazdów.

Na rysunku 8.21b pokazano istotnie różną koncepcję harwestera [116]. Cewki z pakietem rdzeni i dwoma magnesami NdFeB rozłożone są promieniście między pierścieniami (ew. tulejami). Wewnętrzna tuleja może służyć jako część mocująca dla łożyska, które docelowo będzie osadzone na wale obrotowym. Taka konstrukcja może zostać użyta jako koło w pojeździe drogowym. W chwili obrotu będzie generowany nacisk na zewnętrzny pierścień, dodatkowo wewnętrzna tuleja będzie sztywno związana z łożyskiem i wałem. Docisk będzie generował wytworzenie się pola magnetycznego w ściskanym rdzeniu GMM, a cewka przekształci je w prąd elektryczny. Wytworzona energia elektryczna może posłużyć do napędzania dodatkowych urządzeń elektrycznych w samochodzie lub stanowić generator prądu dla akumulatorów.

Miniaturyzacja konstrukcji harwestera, modyfikacja rdzenia

W kolejnym kroku uznano za wskazane podjęcie zadania miniaturyzacji konstrukcji harwestera przez modyfikację rdzenia harwestera. Na obwód magnetyczny rdzenia składa się zestaw magnesów stałych sprzężonych z elementami magnetostrykcyjnymi, którymi są z kolei rdzenie z Terfenolu-D, lite – jak również w postaci sprasowanych płatków, co umożliwia redukcję prądów wirowych. Odpowiedni dobór parametrów związanych z naprężeniem wstępnym i namagnesowaniem materiału magnetostrykcyjnego zapewnił zasilenie mikroprocesora nawet przy dużo mniejszych wymiarach niż ten opisany w pracy [116]. Oprócz założeń typowo konstrukcyjnych, należało sformułować założenia od strony elektrycznej i funkcjonalnej, co zapewniłoby łącznie możliwość pracy w trybie aktuator-harvester [118].

Poprzednio opisano harwestery z przetwarzaniem magnetycznym. Ich podgrupę stanowią harwestery typu TCCM i jego dwie odmiany, a mianowicie: DTCCM i TCCM Model 2 [131, 133, 134]. W pracy [116] wykazano, że harwestery mają małe uzyski prądu elektrycznego w stosunku do gabarytów i masy. Dalsze prace miały zatem na celu opracowanie nowej struktury harwestera, zdolnej zminiaturyzować urządzenie, bez pogorszenia jednak osiągnięć i wydajności elektrycznej. Harmonogram prac nad rozwojem konstrukcji został przedstawiony na rysunku 8.22 [118].



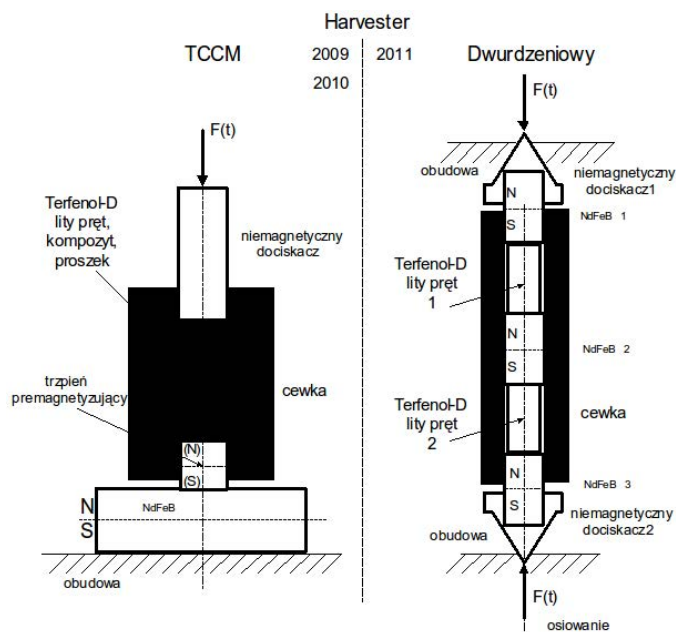
Rys. 8.22. Rozwój kolejnych generacji harvesterów z rdzeniem magnetycznym i ich aplikacji [118]

W celu opracowania miniaturowego harwestera przyjęto następujące założenia:

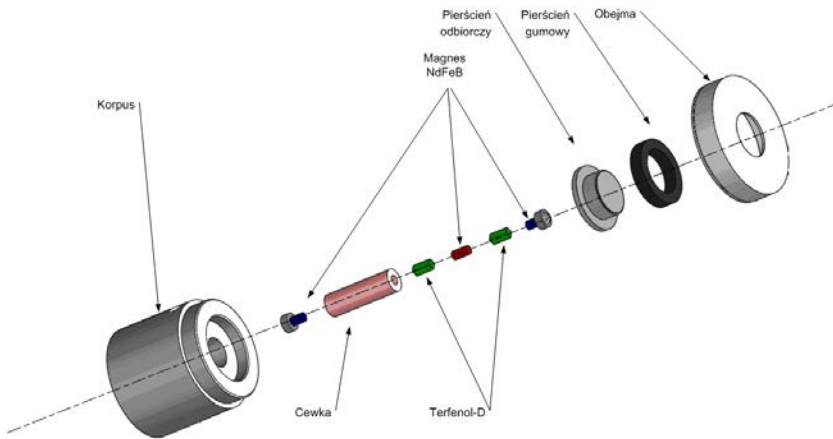
- w rdzeniu musi zostać zastosowany lity Terfenol-D (ze względu na małą objętość Terfenolu w harvesterze należało wybrać postać o najlepszych osiągnięciach),
- rdzeń z terfenolu będzie owijany folią, co zabezpieczy go przed kruszeniem,
- osiowanie będzie następować w tzw. parze „stożek–otwór”,
- wewnątrz cewki zostanie umieszczony magnes NdFeB, który zwiększy uzyskane osiągnięcia o efekt Faradaya pod wpływem magnetostrykcji rdzenia.

Na rysunku 8.23 przedstawiono porównanie struktury TCCM i ostatnio opracowanej, opartej na dwóch rdzeniach z litego Terfenolu-D. Na uwagę zasługuje fakt, że dwa zewnętrzne magnesy NdFeB zostały umieszczone wewnątrz niemagnetycznych stożków osiujących.

Napężenie wstępne rdzenia ustalane jest przez dokręcenie gwintu między obejmą a korpusem. W aluminiowej pokrywie wykonano otwór, w którym osadzony jest pierścień o cylindrycznym kształcie, który odbiera drgania. Między obejmą a podkładką znajduje się gumowy pierścień, który pełni rolę zawieszenia amortyzującego przekazywane drgania oraz ustala napężenie wstępne (tzw. prestress). Zmieniając wzajemne położenie obejmy i korpusu ustala się siłę, z jaką ściskany jest poliuretanowy pierścień, który oddziałuje na podkładkę sprzężoną z rdzeniem, jak pokazano na rysunku 8.24 [118].



Rys. 8.23. Porównanie struktury budowy harvesterów opracowanych w Laboratorium Dynamiki Politechniki Wrocławskiej [118, 123, 137, 138]



Rys. 8.24. Zestawienie wszystkich elementów wybranego harvestera [118, 119]

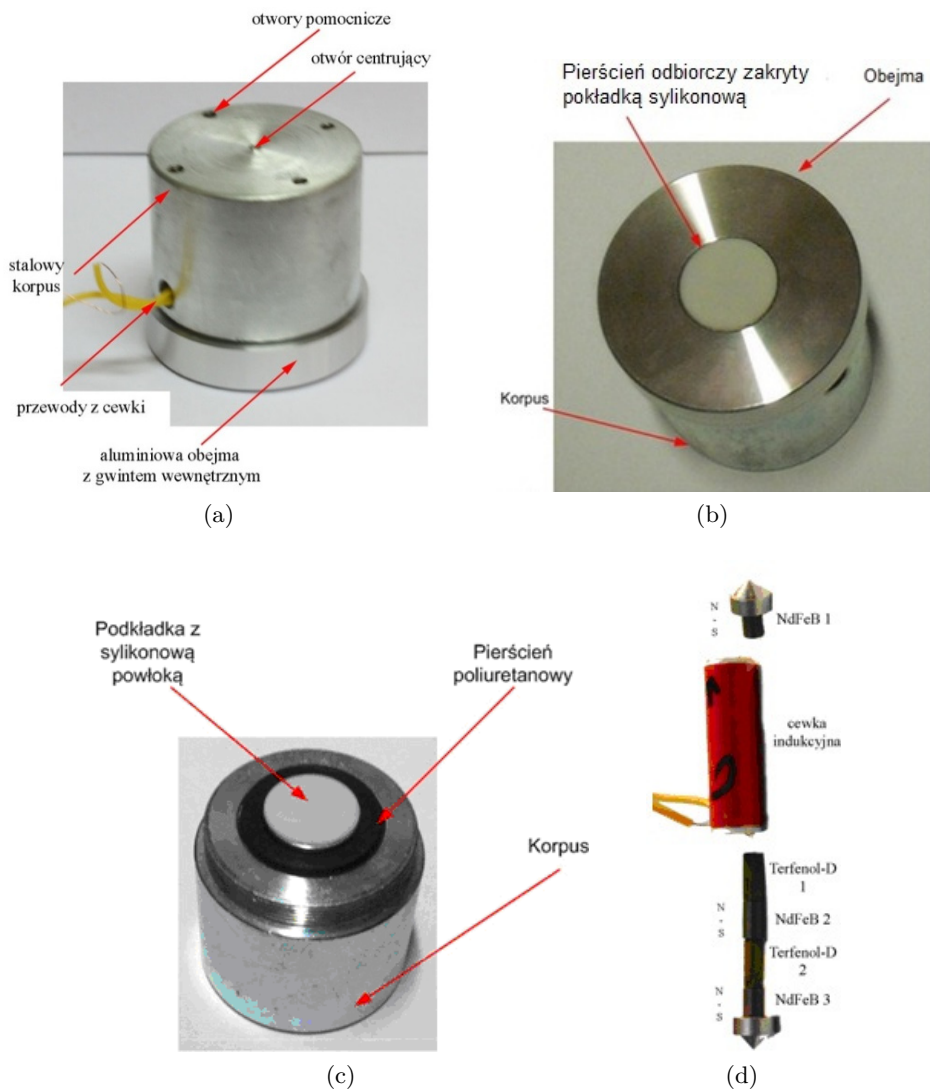
Stalowy korpus harvestera pełni funkcję masy sejsmicznej, oddziałując na rdzeń przez stożek osadzony w otworze na jego dnie. W korpusie wykonano otwór o średnicy odpowiedniej do umieszczenia w nim cewki z rdzeniem magnetostrykcyjnym oraz otwór umożliwiający doprowadzenie przewodów cewki. Zaletą korpusu jest to, iż ekranuje pole magnetyczne pochodzące od działania obwodu magnetycznego. Wszystkie elementy oraz układ montażu harvestera zostały przedstawione na rysunkach 8.24 [126, 136] oraz 8.25 [120, 126, 136, 138–140].

Przegląd prototypów harvestarów z rdzeniem magnetostrykcyjnym Smart

Wcześniej opisano jedynie wybrane prace własne na rzecz stworzenia palety harvestarów. Zestaw zrealizowanych koncepcji przedstawiono na rysunku 8.26, ich parametry podsumowano w tabeli 8.2. Harvestery te zaprezentowano między innymi na dwóch kolejnych konferencjach i targach Energy Harvesting & Storage Europe w Berlinie w latach 2012 i 2013 [119, 125, 129, 139, 141, 142].

Rodzaj pracy i zakres mocy harvestarów został przedstawiony na grafie na rysunku 8.26.

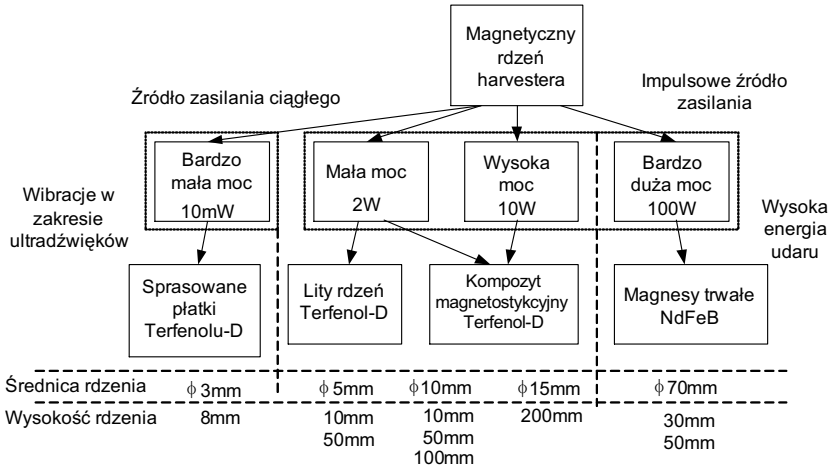
Moc elektryczna uzyskiwana przez harvestery zależy od rodzaju materiału i wymiarów rdzenia. Osobną grupę stanowią rozwiązania wykorzystujące metodę demagnetyzacji magnesów, w których jako rdzeń użyto magnesy neodymowe poddane silnej stymulacji mechanicznej, czasami aż do zniszczenia. Poszczególne rodzaje różnią się ilością zastosowanego Terfenolu-D w obwodzie magnetycznym i zapewniają możliwość wkręcania harvestera do konstrukcji.



Rys. 8.25. Złożony harvester dwurdzeniowy: a) widok ogólny, b) spód harwestera, c) harvester bez pokrywy, d) rdzeń harwestera z wyszczególnionymi elementami [118, 119, 123, 129, 137, 138]

Pomiary magnetowizyjne pola na zewnątrz harwestera

Zaproponowany rdzeń harwestera, w którym zastosowano dwa pręty z Terfenolu-D i trzy magnesy trwale umieszczono w grubym korpusie stalowym, ma zapewnić możliwie najmniejszy strumień zewnętrznego pola magnetycznego mogący wchodzić w interakcję z innymi obiektami ferromagnetycznymi mogącymi



Rys. 8.26. Podział harvesterów ze względu na charakter pracy, moc i rodzaj materiału rdzenia [119, 129]



(a)



(b)



(c)

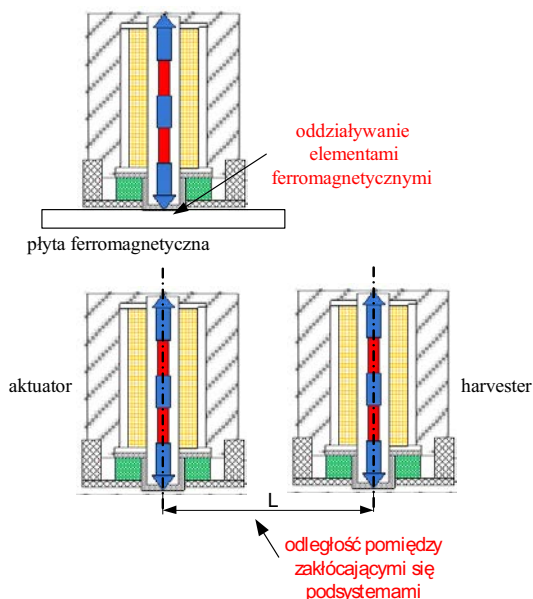


(d)

Rys. 8.27. Widok prototypów harvesterów rozwijanych w Laboratorium Dynamiki Politechniki Wrocławskiej [119, 129]

Tabela 8.2. Przegląd wykonanych prototypów harvesterów wraz z najważniejszymi parametrami [119, 129]

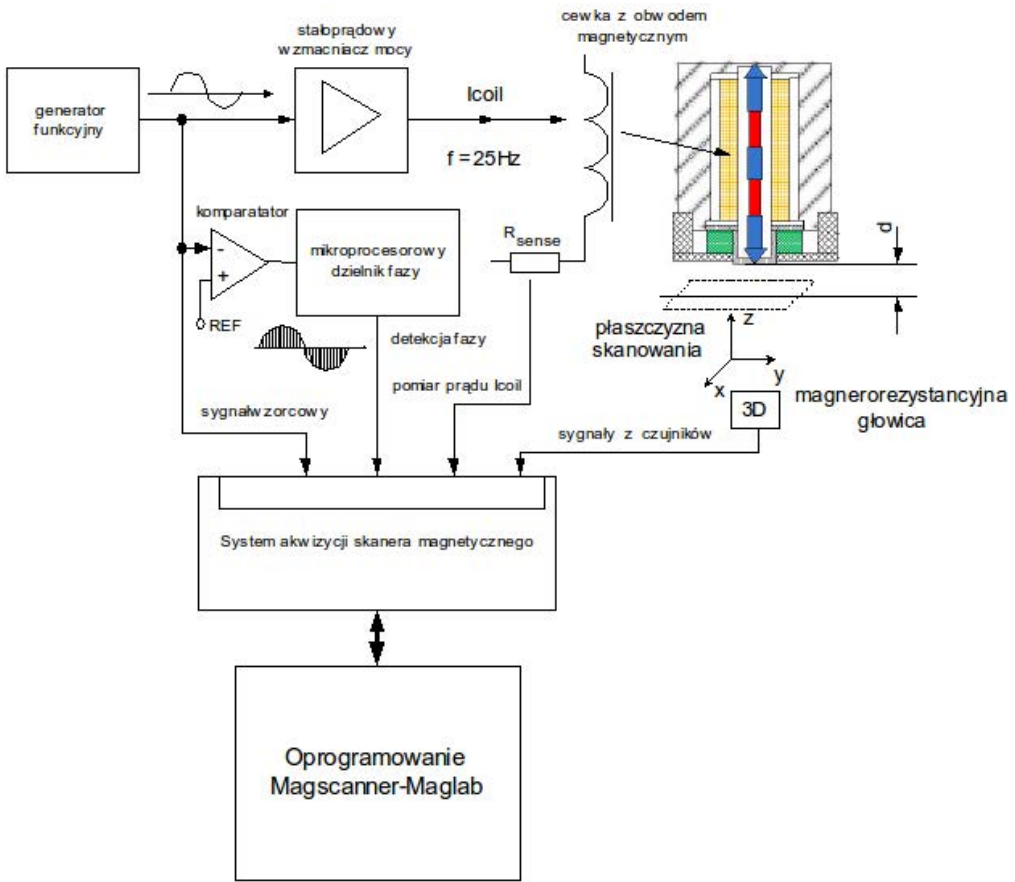
Typ harwestera	Widok z rys. 8.26	Wymiary [mm]	Masa [g]	Moc w impulsie [mW]
Miniaturowy	–	$\varnothing 50 \times 35$	200	2000
Małej mocy	(a), (d)	$\varnothing 50 \times 50$	300	5000
Dużej mocy	(b)	$\varnothing 50 \times 150$	1000	10000
„Tactical Grade”	(c)	$\varnothing 80 \times 250$	1500	10000



Rys. 8.28. Prezentacja problemów związanych z występowaniem zewnętrznego pola magnetycznego harwestera [118, 143, 144]

zaburzać pracę harwestera czy aktuatora. Strumień indukcji magnetycznej powinien być również minimalny ze względu na występowanie indukcji wzajemnej między dwoma układami z samodzielnymi cewkami, ale sprzężonymi magnetycznie przez rdzenie umieszczone wewnątrz tych cewek. Na rysunku 8.28 przedstawiono graficzne problemy mogące utrudnić zastosowanie zaprojektowanych harvesterów [118, 143, 144].

Należy uwzględnić minimalną odległość między kolejno stosowanymi harvesterami, a także uwzględnić, z jakim materiałem stykać się będzie pierścień odbiorczy. Zarówno obejmą z gwintem wewnętrznym do zadawania naprężenia wstępnego przez elastomerowy pierścień, jak i pierścień odbiorczy harwestera są wykonane

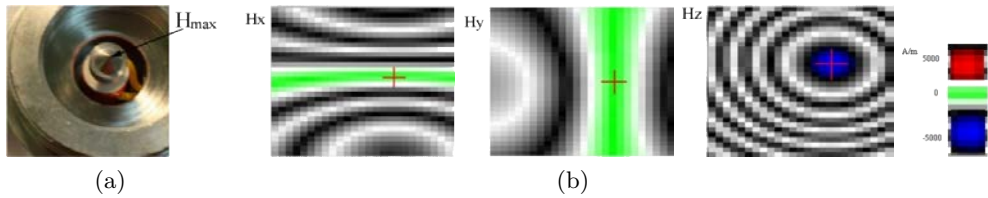


Rys. 8.29. Stanowisko do wyznaczenia dystrybucji pola magnetycznego na zewnątrz harvestera [118, 143, 144]

z aluminium, żeby obwód magnetyczny harvestera był otwarty. Gdyby te elementy były wykonane ze stali, nastąpiłoby istotne zmniejszenie wartości pola wstępnej magnetyzacji rdzeni terfenolowych, co skutkowałoby utratą efektu generowania prądu w cewce [118].

Na rysunku 8.29 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego z wykorzystaniem systemu Magscanner [118, 143, 144].

Na rysunku 8.30 z kolei przedstawiono wynik skanowania płaszczyzny, oddalęj o $d = 5\text{ mm}$ od wierzchołka stożka dolnego magnesu trwałego, w postaci map dystrybucji poszczególnych składowych wektora pola magnetycznego uzyskany z użyciem systemu Magscanner-Maglab [143].



Rys. 8.30. Dystrybucja pola magnetycznego na zewnątrz harwestera:

- a) widok miejsca analizy dystrybucji i wielkości natężenia pola magnetycznego,
 b) mapa składowych wektora natężenia pola magnetycznego [143]

8.5.7. Harvestery wykorzystujące udar mechaniczny i dedykowane im przetwornice elektroniczne małych mocy

Generatorami prądu o szczególnej charakterystyce są harvestery typu EDFMG (ang.: *Explosive-Driven Ferromagnetic Generator*) wytwarzające falę elektromagnetyczną, powstającą w wyniku natychmiastowej demagnetyzacji magnesu przez udar w następstwie eksplozji lub innego silnego impulsu siły. Magnes traci wówczas swoje właściwości magnetyczne, generując jednak wokół siebie silne impulsowe pole magnetyczne. Podczas uderzenia możliwe jest nawet zniszczenie magnesu, jednak ilość energii, jaka zostanie wyindukowana w cewce, jest duża i wystarczy do naładowania kondensatorów wysokonapięciowych o znacznej pojemności. Zagadnienie to jest przedmiotem intensywnych badań, szczególnie w ostatniej dekadzie, a ich celem są aplikacje, głównie militarne [145–150].

Jedną z proponowanych metod generowania energii elektrycznej bezpośrednio z uderzenia była udarowa demagnetyzacja magnesów trwałych typu NdFeB [131, 133]. Tak jak sprężyna ma swoją stałą, będącą miarą energii w niej skumulowanej, magnes ma podobne właściwości magazynowania jej. Sprężyny o dużej średnicy mają duże stałe, silne magnesy zaś mają dużą gęstość energii. Magnesy trwałe zawierające komponenty ziem rzadkich mają największą gęstość energii (por. tab. 8.3). Dotyczy to generowania energii elektrycznej do chwilowego zasilania systemów mikroprocesorowych z udarowej demagnetyzacji magnesów trwałych typu NdFeB. Obecnie magnesy NdFeB są najmocniejszymi magnesami trwałymi.

Zalety magnesów trwałych NdFeB w harvestingu udarowym:

- największa – spośród wszystkich magnesów trwałych – energia BH , nawet do 600 kJ/m^3 ,
- silny strumień pola magnetycznego przy powierzchni dochodzący do 2 T,
- duża twardość struktury z jednoczesną odpornością na pękanie.

Do wad magnesów neodymowych należą:

- słaba odporność na zmiany termiczne – wysoka temperatura ma destruktywny wpływ na parametr BH ,

Tabela 8.3. Parametry¹ magnetyczne trwałych magnesów NdFeB z podziałem na klasy [116]

Material	Gęstość energii [kJ/m ³]	B_{hmax} [MGsOe]	Remanencja [kGs]	Koercja [kOe]
N27	199–223	25–28	10,2–11,0	Min. 9,6
N30	223–247	28–31	10,8–11,5	Min. 10,0
N35	263–286	33–36	11,7–12,1	Min. 10,9
N38	286–302	36–38	12,1–12,5	Min. 11,3
N40	302–326	38–41	12,5–12,8	Min. 11,6
N42	318–342	40–43	12,8–13,2	Min. 11,6
N45	342–366	43–46	13,2–13,8	Min. 11,0

- utlenianie się zewnętrznej warstwy magnezu powoduje konieczność stosowania chromu jako warstwy zewnętrznej.

Dzięki zastosowaniu magnesów NdFeB, harvestery cechują się możliwie małymi wymiarami zewnętrznymi. Proces uwalniania energii, przez udarowe obciążenie, stał się inspiracją do budowy harvestera nowej generacji.

Ograniczona dostępność i wzrastająca cena pierwiastków ziem rzadkich jest powodem redukcji ich udziału w składzie magnesów stałych. Jest to jednocześnie powód intensywnych prac badawczych nad poprawą parametrów eksploatacyjnych magnesów, przy znaczącej obniżce kosztów ich wytwarzania. Z drugiej strony można zauważyć, iż, mimo popularności tzw. magnesów neodymowych, nie wszystkie ich możliwości zostały dostrzeżone i w pełni wykorzystane. Niewiele jest prac na rzecz wykorzystania magnesów NdFeB jako źródeł zmagazynowanej energii (ang.: *Energy Storage*), z których korzysta się w razie potrzeby dzięki demagnetyzacji w wyniku udaru mechanicznego. Ze względu na „długowieczność” magnesów można w nich przechowywać „zaprogramowaną energię” zdecydowanie dłużej niż w typowych bateriach alkalicznych czy akumulatorach. Oczywiście wielkość przechowywanej energii jest dużo mniejsza niż w typowych akumulatorach, np. litowych, ale w przypadku energii odzyskanej z magnesów nie występują ograniczenia w rodzaju prądu upływu, powodującego samowyczerpanie się akumulatorów. Możliwy jest także recykling magnesów po całkowitym ich rozmagnesowaniu.

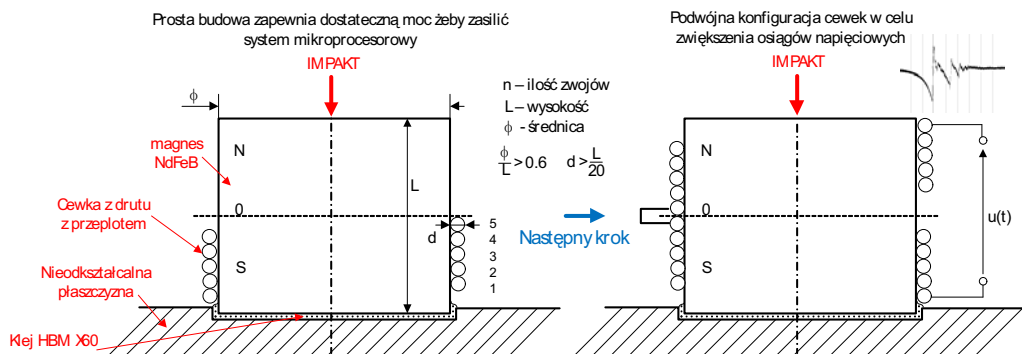
Założenia przyjęte podczas budowy harvestera udarowego:

- magnes neodymowy z „zapisaną” energią $(BH)_{max}$ można traktować jak magazyn z energią, z której można korzystać, stosując demagnetyzację udarową,
- harvester może być przechowywany w warunkach o wiele mniej korzystnych niż typowe akumulatory, nawet w wodzie morskiej,

¹ Użyto jednostek z cytowanej publikacji, 1 Oe = 1000/4π A/m ~ 79,577 A/m, 1 T = 10⁴ Gs.

- widoczny trend redukcji pierwiastków ziem rzadkich spowoduje spadek kosztów wytworzenia harvestera, jednak za wzorzec metody powinien zostać zastosowany magnes typu NdFeB,
- w obwodzie magnetycznym należy zastosować najprostszą konstrukcję sprzężenia magnetomechanicznego obwodu magnesu (zastosowanie docisku wstępnego, ekranów magnetycznych),
- energia „odzyskana” z magnesu trwałego może posłużyć do zasilania układu czujników małej mocy,
- elektronika zastosowana w wejściowym stopniu zasilającym człony mikroprocesorowe powinna cechować się minimalnym napięciem startowym rzędu kilku mV.

Znaleźć można przykłady generatorów ferromagnetycznych, które dzięki zastosowaniu udaru (eksplozji) wobec magnesu neodymowego uzyskują moce chwilowe sięgające MW, jednakże w aplikacji Energy Harvesting nie ma potrzeby destrukcji magnesu, lecz jedynie „lekkiego” udaru, który nie powodowałby jego szybkiego zniszczenia. Jediną drogą żeby przetworzyć energię na prąd elektryczny jest umieszczenie magnesu w cewce indukcyjnej, podobnie jak umieszcza się w niej i inne materiały, np. w elektromagnesach czy w przypadku Terfenolu-D [2]. Ze względu na zjawiska falowe, będące skutkiem udaru, cewka musi mieć specjalną budowę, także z powodu polaryzacji magnesu NdFeB. W przypadku przejścia fali nie jest konieczna duża liczba zwojów (rys. 8.31).



Rys. 8.31. Schemat budowy harvesterów MFT wraz opisem kluczowych elementów i parametrów [142]

Ze względu na impulsowe wyzwalamie energii zbyt duża indukcyjność obwodu magnetycznego powoduje redukcję odzyskiwanego prądu na skutek zwiększenia zastępczej impedancji wyjściowej. Wykonane uzwojenie powinno zostać trwale zamocowane na magnecie. Jedną z najważniejszych informacji o magnecie, jakiej nie można pominąć, jest kształt i rozmieszczenie linii zerowej. Uzwojenie powinno

być wykonane wyłącznie na jednym z biegunów, N lub S. Oznacza to, że magnes powinien odznaczać się jak największym stosunkiem wysokości do średnicy ϕ , ale przy $\phi > 10$ mm. Obecnie za standard przyjmuje się proporcję 0,6, jednakże zdarzają się rozwiązania o proporcji blisko 1. Należy uważać na rozmieszczenie linii zerowej, która ulega przesunięciu pod wpływem demagnetyzacji, nie wolno łączyć magnesów w kaskady N-S-N-S, ponieważ na tworzącej następuje złagodzenie przejścia N-S, co skutkuje gwałtownym obniżeniem osiągniętych prądów obwodu magnetycznego. Dużą szansą poprawy osiągniętych prądów jest zastosowanie macierzy Halbacha jako obiektu przeznaczonego do demagnetyzacji.

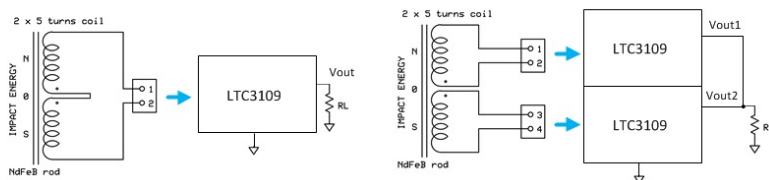
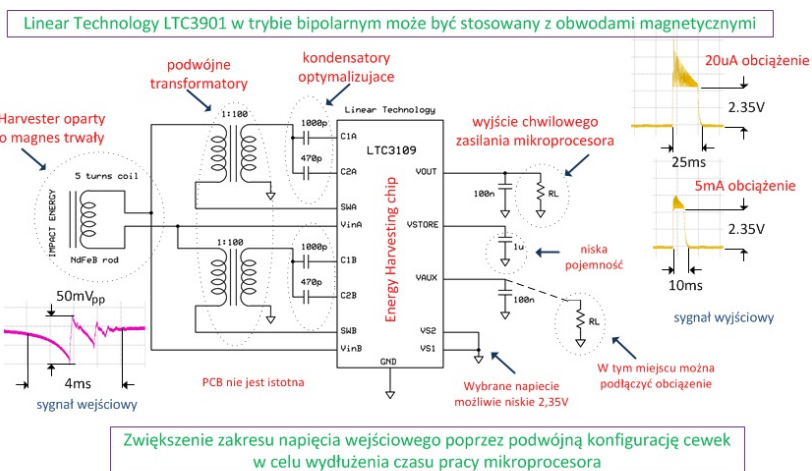
Harvestery wykorzystujące zjawisko udaru mechanicznego generują zmienny przebieg napięcia. Charakteryzuje się on jednocześnie silnym impulsem prądu, a w sygnale generowanym występują częstotliwości związane z rezonansem magnetycznym układu rdzeń–cewka. Dalej przedstawiono nową metodę pozyskiwania prądu elektrycznego w wyniku demagnetyzacji magnesów neodymowych w obwodzie z rdzeniem magnetostrykcyjnym.

Dedykowany system elektroniczny małej mocy dla harvesterów udarowych

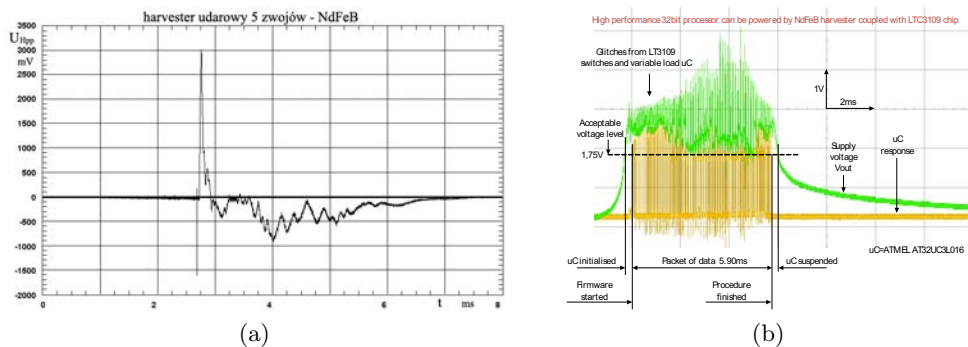
Zastosowanie małej liczby zwojów wokół magnesu umożliwia „przejście” generowanej energii elektrycznej związanej z szybką zmianą strumienia pola magnetycznego w następstwie uderzenia w magnes. Jednakże bardzo niski poziom napięcia, przy bardzo dużym uzyskiwanym prądzie, wymaga stosowania specjalistycznych elektronicznych przetworników zdolnych dostarczyć odpowiedni poziom napięcia do zasilania systemu mikroprocesorowego. Dlatego w oryginalny sposób zastosowano układ Linear Technology LTC3109 dedykowany do aplikacji termoelektrycznych, działający w dwubiegunowej konfiguracji, który, jak się doświadczało, umożliwia przetwarzanie napięcia z obwodów magnetycznych o małej impedancji. Otrzymane rezultaty wykazały przydatność systemu do częstotliwości rezonansowych bliskich 70 kHz. Najważniejsze cechy harwestera udarowego z układem LTC3109 zostały przedstawione na rysunku 8.32 [142].

Dzięki zastosowaniu układu LTC3109, który daje chwilowe naładowanie kondensatora o możliwie małych stratach (parametr rezystancji dynamicznej ESR), wydłuża się czas pracy mikroprocesora. Szacuje się, że na harvesterze poddanym udarowi o impulsie siły trwającym 1 ms, dla kondensatora 100 nF gromadzącego energię, udaje się przedłużyć czas pracy mikroprocesora do 6 ms. Efekt ten został przedstawiony na rysunku 8.33, natomiast widok prototypowego systemu harwestera udarowego na rysunku 8.34 [121, 122, 142].

Należy mieć na uwadze to, że szacowana sprawność przekształcania udaru w demagnetyzacji magnesu neodymowego na prąd elektryczny wynosi zaledwie 0,02%.

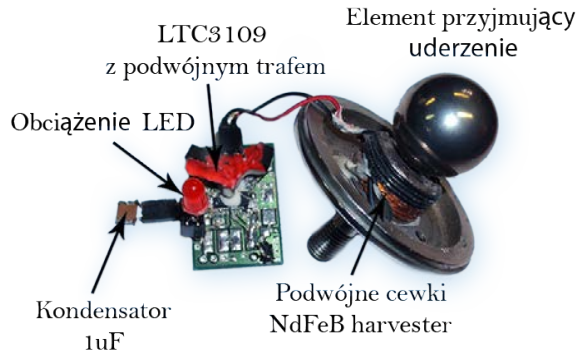


Rys. 8.32. Zastosowanie układu Linear Technology LTC3109 jako kondycjonera zasilania mikroprocesora [142]



Rys. 8.33. a) przykładowy przebieg uzyskany w wyniku stymulacji harwestera udarem mechanicznym, b) przebiegi na stopniu kondycjonera LTC3109 i mikroprocesora firmy Atmel wraz z opisem parametrów [121, 122, 142]

Dlatego kluczowym wyzwaniem jest lepsze przekształcanie energii, co wymaga zmian w konstrukcji harwestera. Ważnym aspektem jest standaryzacja harvesterów pod kątem ich wymiarów geometrycznych, uwarunkowana wymaganiami aplikacyjnymi. Można bowiem stworzyć ich typoszereg zarówno od wersji miniaturowych na



Rys. 8.34. Widok harvestera udarowego z kulą jako elementem przyjmującym uderzenie [121, 122, 142]

moce rzędu kilku watów, jak i stosunkowo dużych (np. z magnesami neodymowymi o średnicy 100 mm) do zastosowań np. w górnictwie. W dalszych pracach należy rozważyć możliwość zastąpienia względnie drogich magnesów neodymowych ich odpowiednikami pozbawionymi pierwiastków ziem rzadkich.

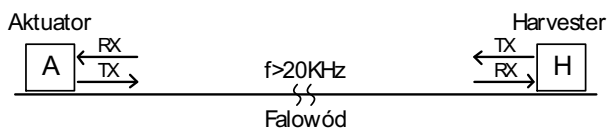
8.5.8. Bezprzewodowa transmisja energii i informacji z użyciem ultradźwięków. Badania własne

Upřednio opisano znaczenie tematyki bezprzewodowej transmisji energii i informacji oraz dokonano przeglądu literatury przedmiotu. Dalej z kolei scharakteryzowano skrótowo badania własne, realizowane od 2006 roku. Dorobek zespołu w zakresie transmisji energii i informacji za pomocą wzbudników oraz odbiorników wykorzystujących materiały Smart, takie jak Terfenol-D, był prezentowy na konferencji i targach *Energy Harvesting and Storage Europe 2013* w Berlinie [139].

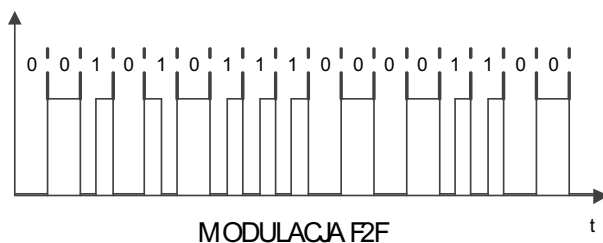
Metoda przesyłania energii i informacji z użyciem harvesterów z rdzeniem magnetostrykcyjnym

Zastosowanie materiałów Smart do bezprzewodowej transmisji mocy (oraz informacji) okazało się praktyczne, a uzyskiwane w czasie badań wyniki wskazywały na dużą efektywność tej metody. W następstwie dalszych prac powstał projekt SURPS (ang.: *Smart Ultrasonic Resonant Power System*), który przewiduje możliwość realizowania takowej transmisji przez różne media i za pomocą różnych konfiguracji nadajnik–odbiornik.

Mechanizm transmisji energii polega na „wysłaniu” energii mechanicznej przez aktuator w postaci czystej, sinusoidalnej fali ultradźwiękowej, a następnie jej



Rys. 8.35. Ideowy schemat transmisji mocy przez ultradźwięki [115, 123, 126–128, 132, 137, 138]



Rys. 8.36. Modulacja częstotliwości zastosowana w systemie SURPS [132, 139]

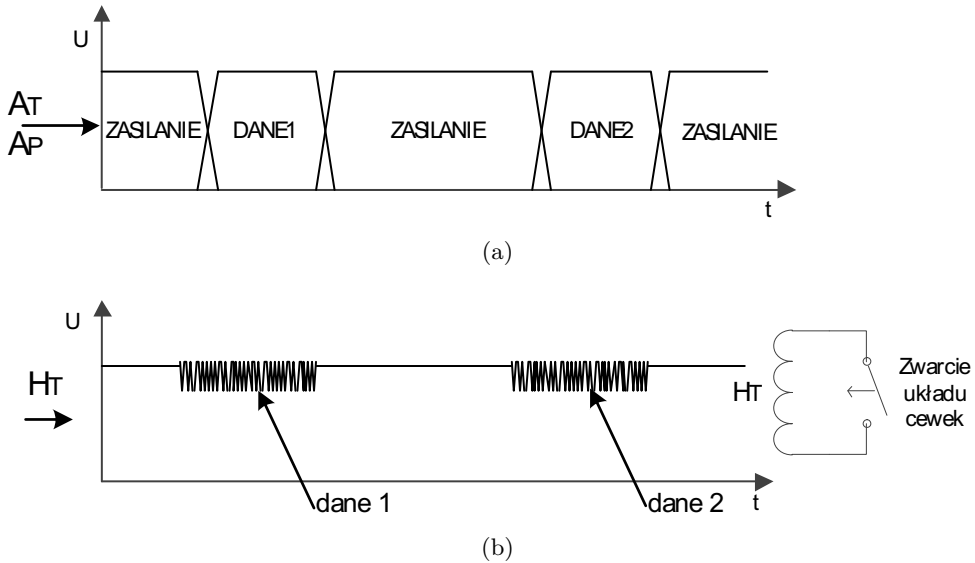
„odbiór” przez harvester przez materiał magneto- lub elektrostrykcyjny, który się w nim znajduje (rys. 8.35) [115, 123, 126–128, 132, 137, 138]. W ten sposób, energia (wraz z informacjami) może być przekazywana nie tylko przez różnego rodzaju ośrodki, ale też na różne odległości.

Do przesyłu informacji użyto modulacji częstotliwości (ang. FM – *Frequency Modulation*), która na potrzeby różnego rodzaju konstrukcji została odpowiednio zmodyfikowana tak, aby transfer danych był o rząd mniejszy od częstotliwości rezonansowej konstrukcji (rys. 8.36) [132, 139].

Metoda ta sprawdziała się podczas testów laboratoryjnych, a schemat jej działania zaprezentowano został na rysunku 8.37 [139], a na rysunku 8.37a przedstawiono ideowy schemat danych wysyłanych przez aktuator na podstawie Terfenolu-D (A_T) lub materiału piezoelektrycznego (A_P). Na rysunku 8.37b z kolei pokazano sygnał, jaki jest otrzymywany na harvesterze o rdzeniu z materiału magnetostrykcyjnego.

SURPS – mikroprocesorowy system transmisji zasilania i danych z wykorzystaniem elektro- i magnetostrykcyjnych przetworników

Pierwsze próby skonstruowania systemu do bezprzewodowej transmisji mocy powstały z użyciem – opisanych wcześniej – harvesterów z rdzeniem magnetostrykcyjnym. Wykorzystując rdzenie z Terfenolu-D, stworzono aktuator i harvester o szerokim paśmie przenoszenia, co ułatwiło transmisję energii elektrycznej przez drgania mechaniczne, w tym również w zakresie ultradźwięków. Na rysunku 8.38 przedstawiono schemat oraz rzeczywiste stanowisko do przeprowadzania tego rodzaju eksperymentów [128, 132, 139]. Składa się z aluminiowej belki długości 1 m oraz trzech przetworników magnetostrykcyjnych, z których jeden stanowi



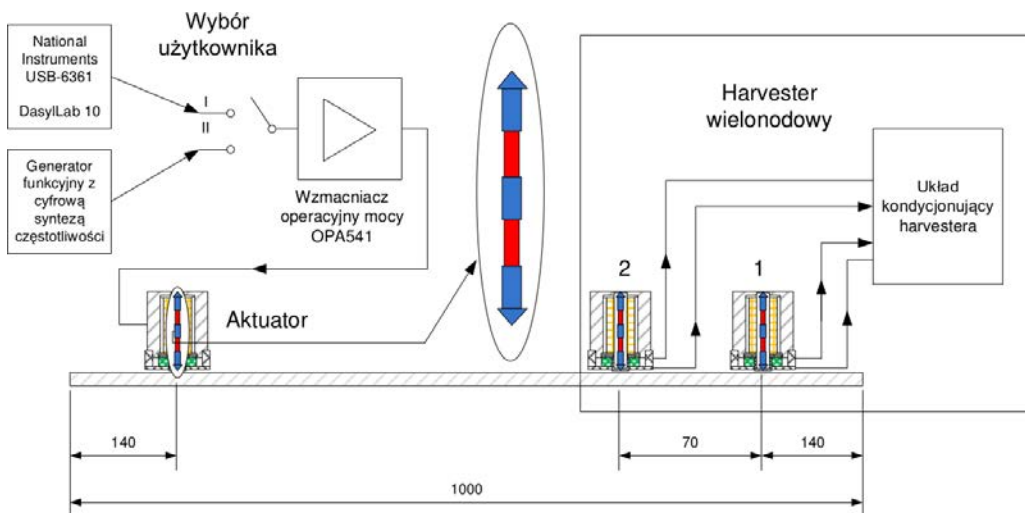
Rys. 8.37. a) schemat danych wysyłanych oraz b) odbieranych przez elementy systemu SURPS; $A_{T/P}$ – aktuator na bazie Terfenolu-D/materiału piezo; H_T – harvester na bazie Terfenolu-D [139]

nadajnik, a dwa pozostałe odbiorniki drgań ultradźwiękowych, które służą tu za nośniki mocy. Opracowano ponadto metody pomiarowe umożliwiające optymalizację podobnych konstrukcji, w celu uzyskania możliwie dużej sprawności transformacji energii.

Opierając się na wcześniejszych doświadczeniach zespołu, opracowany został system do jednoczesnej transmisji zasilania i danych o nazwie SURPS, przystosowany do obsługi stanowiska wykorzystującego połączone szeregowo harvestery, umieszczone pomiędzy dwiema połączonymi na sztywno szynami. Układ ten charakteryzuje się częstotliwością rezonansu magnetycznego o wartości powyżej 20 kHz. Schemat rozmieszczenia aktuatora i harvesterów na szynach został przedstawiony na rysunku 8.39 [128, 132, 139].

Założono naprężenie wstępne pomiędzy szynami (oznaczono na rys. 8.39 jako PS1–PS3), co uzyskano za pomocą elementów z tworzywa sztucznego, osobno przy każdym przetworniku magnetostrykcyjnym. Wywołało to wzajemne sprzężenie mechaniczne aktuatora i harvesterów, zapewniając możliwość regulacji rezonansowej częstotliwości leżącej w paśmie ponadakustycznym.

Na rysunku 8.40 przedstawiono widok układu szyn z przetwornikami magnetostrykcyjnymi, z możliwością jednoczesnego zasilania systemu mikroprocesorowego po stronie harvesterów i przesyłania danych w obie strony [132, 138, 139].

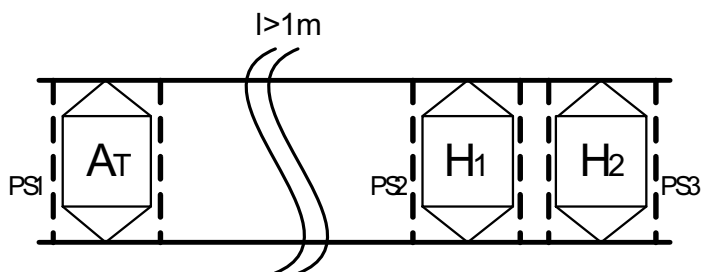


(a)



(b)

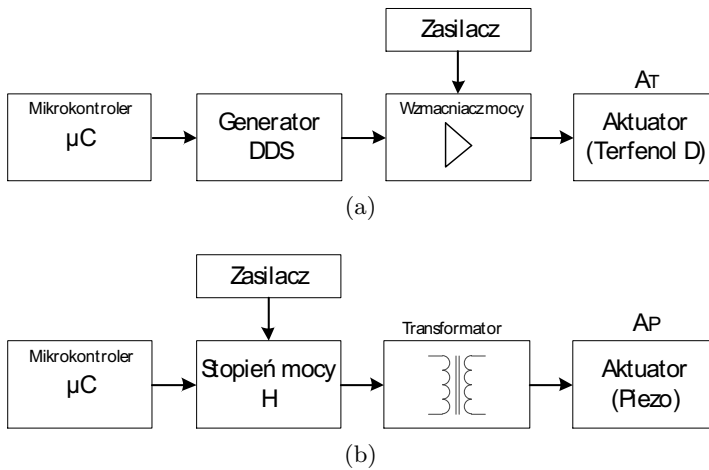
Rys. 8.38. Sprzężenie aktuatora i harwestera w układzie belki:
a) schemat stanowiska, b) widok stanowiska [128, 132, 139]



Rys. 8.39. Schemat stanowiska do transmisji energii i informacji w postaci szyny podwójnej oraz aktuatora i harvesterów [128, 132, 139]



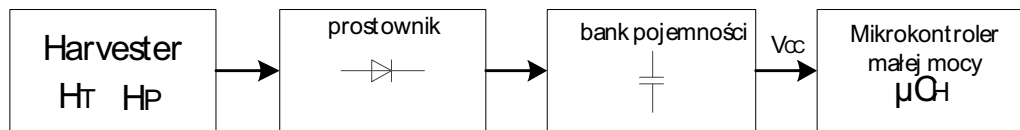
Rys. 8.40. Widok układu dwóch szyn z zaznaczonym akkuratorem i członami odzyskującymi energię (harvesterami) z drgań mechanicznych [119, 132, 138, 139]



Rys. 8.41. Wyszczególnienie poszczególnych sekcji członu akuatora:
a) magnetostrykcyjnego, b) elektrostrykcyjnego [132, 139]

Na rysunku 8.41 przedstawiono różnicę w budowie członów akuatorów wykorzystujących przetworniki magnetostrykcyjne i piezoelektryczne [132, 139]. Charakterystyczne różnice dotyczą sposobu generowania sygnału zasilającego dany akuator. W przypadku magnetostrykcyjnych, w których obciążeniem jest cewka indukcyjna, podstawowym problemem jest uzyskanie dostatecznego poziomu magnetostrykcji przy prądzie niepowodującym nadmiernego przegrzewania obwodu magnetycznego z rdzeniem. Aktuatory piezoelektryczne wymagają natomiast napięcia zasilającego na poziomie $200 V_{RMS}$, które uzyskuje się przez szerokopasmowy transformator z uzwojeniem pierwotnym dopasowanym impedancyjnie do stopnia mocy bazującym na układzie tranzystorów MOSFET w konfiguracji typu H.

Człony harwestera magnetostrykcyjnego i piezoharwestersów z przetwornikiem w postaci litych pierścieni nie różnią się istotnie. W przypadku harwestrów PZT



Rys. 8.42. Schemat budowy zasilacza systemu mikroprocesorowego zasilanego energią odzyskaną z drgań mechanicznych w zakresie ponadakustycznym [132, 139]

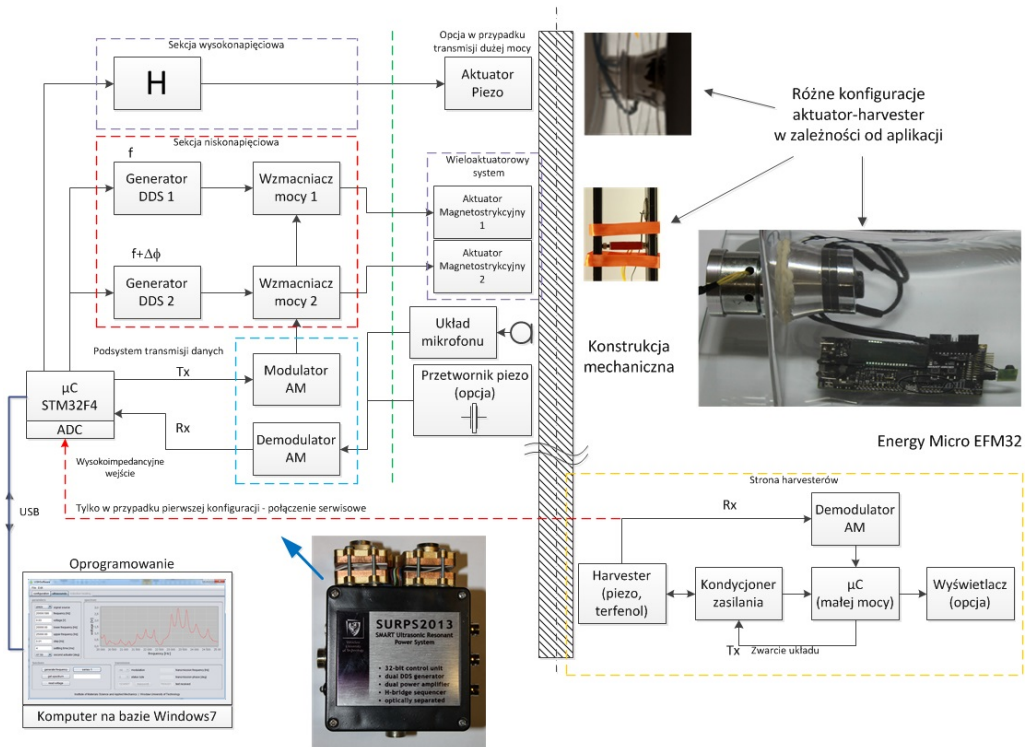
w postaci tzw. patchy stosuje się specjalizowane układy kondycjonerów odzyskanej mocy elektrycznej, takie jak Linear Technology LTC3588 (zagadnienia tego nie rozwijano). Na rysunku 8.42 ukazano schemat blokowy zasilacza harvestingowego dla systemu mikroprocesorowego [132, 139].

Na podstawie założeń, jakie opisane zostały wcześniej, a także obecnego stanu wiedzy z dziedziny ultradźwiękowej, bezprzewodowej transmisji mocy, zaprojektowany został kompletny system nadawczo-odbiorczy, składający się z mikrokontrolera, modulatora częstotliwości i specjalnego oprogramowania. Schemat działania tego układu przedstawiono na rysunku 8.43, na którym rozróżnić można kilka rodzajów realizacji tegoż układu, w zależności od rodzaju medium, przez jakie transmitowana ma być moc czy informacja [115, 132, 138]. Szczegółowe informacje na temat tych rozwiązań znajdują się w dalszej części rozdziału.

Reasumując, można wykazać, iż główne możliwości systemu SURPS to:

- obsługa aktuatorów/harvesterów piezoelektrycznych i z przetwarzaniem magnetycznym,
- wyszukiwanie i generowanie częstotliwości rezonansowej konstrukcji mechanicznej,
- skanowanie zadanego przedziału częstotliwości konstrukcji z wykorzystaniem układu aktuator–harvester z odczytem parametrów w czasie rzeczywistym,
- odczytywanie aktualnego napięcia RMS z harwestera,
- możliwość generowania sygnałów dla dwóch aktuatorów wytwarzających drgania o tej samej częstotliwości, ale przesuniętych względem siebie w fazie,
- transmisja danych pomiędzy sekcją aktuatora i harwestera w obie strony (Tx, Rx),
- zakres generowanych częstotliwości 0,1–50 000 Hz, co 0,1 Hz (zastosowany generator DDS firmy Analog Devices AD9851).

Na rysunku 8.44 przedstawiono odpowiedź częstotliwościową konstrukcji mechanicznej [132, 137, 139] z rys. 8.40. Na uwagę zasługuje fakt, że największe osiągi (największe napięcie) znajdują się w przedziale ponadakustycznym (powyżej 20 kHz). Strefa SW oznacza dopuszczalny zakres częstotliwości rezonansowych, leżący w pobliżu 20 kHz. Na charakterystyce, linią przerywaną, zaznaczona jest wartość napięcia 2,5 V, gwarantująca start systemu mikroprocesorowego. Zaznaczone na przebiegu punkty A i B odpowiadają najkorzystniejszym zakresom

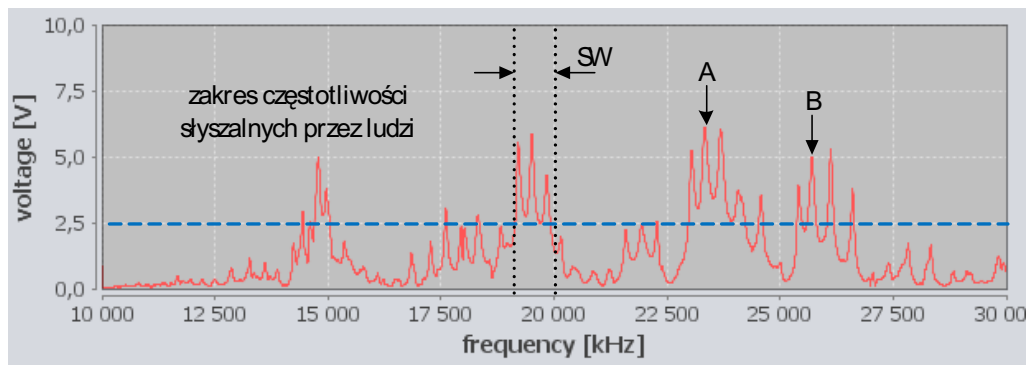


Rys. 8.43. Diagram blokowy struktury systemu SURPS z wyszczególnieniem możliwych rodzajów konstrukcji mechanicznych, w których może on znaleźć zastosowanie [115, 119, 132, 138]

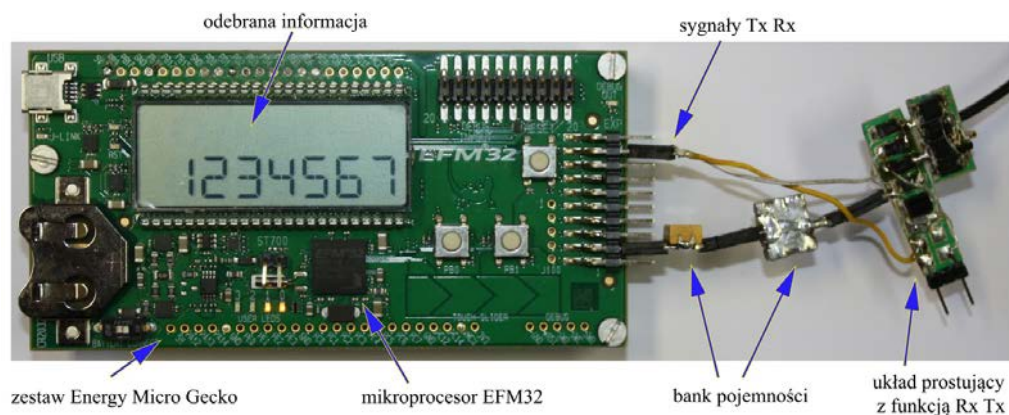
częstotliwości nośnych, oznacza to też, że jest więcej częstotliwości zdolnych do zasilenia układu, co ułatwia – w zależności od potrzeb – wybieranie żądanych zakresów fal nośnych. Możliwa jest również praca większej liczby mikroprocesorów podłączonych do tych samych harvesterów, ale aktywowanych ściśle określoną częstotliwością. Ta druga opcja umożliwia stosowanie opisywanego rozwiązania w aplikacjach SHM, co oznacza, że energia „trafia” do dedykowanego czujnika z wykorzystywaniem innego pasma częstotliwości.

Jako wzorcowy system mikroprocesorowy zastosowano rozwiązanie firmy Energy Micro (obecnie Silicon Laboratory) o nazwie Gecko z procesorem 32 bit typu Cortex-M3 o oznaczeniu EFM32TG840 (rys. 8.45) [132, 137, 139].

We wszystkich aplikacjach rozwiązanie musiało zagwarantować zdolność do zasilenia tego typowo przemysłowego układu, z jednoczesną transmisją informacji w trybie półduplex (transmisja danych w jednym kierunku i w zadanym czasie w kanale dwukierunkowym). Mikroprocesor miał oryginalny kod programu (ang.: *firmware*) z wieloma użytecznymi funkcjami, które zobrazowane są na



Rys. 8.44. Odpowiedź częstotliwościowa układu podwójnych szyn [132, 137, 139]

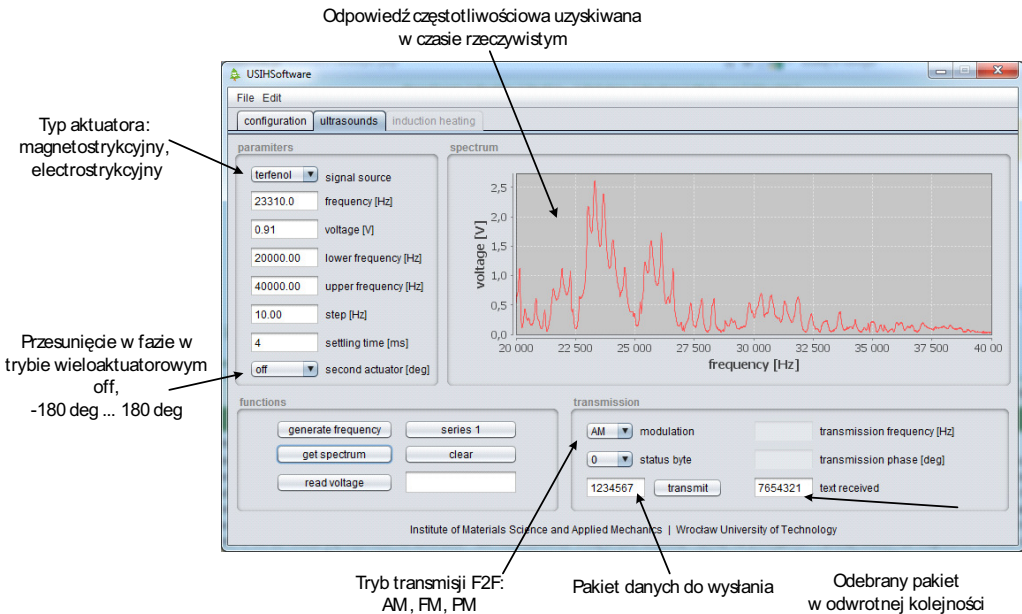


Rys. 8.45. System mikroprocesorowy Geco (producent: Energy Micro; obecnie Silicon Laboratory) z procesorem 32 bit oraz przykładem odebranej informacji [132, 137, 139]

rysunku 8.46 [115, 132, 138, 139]. Przedstawiono tam również tzw. okno programu konfiguracyjnego systemu SURPS, stworzonego w środowisku Java, co umożliwia wykonanie zdalnego dostępu do systemu również przez przeglądarkę internetową (co ma kluczowe znaczenie w przypadku skanowania zakresu akustycznego ze względu na hałas).

Transfer danych odbywał się za pomocą algorytmu F2F-AM. Dzięki temu przepływ informacji jest znacznie mniejszy od częstotliwości rezonansowej wywoływanej przez ultradźwięki lub samą konstrukcję i może uzyskać wartość nawet do 1000 bps. Większe wskaźniki przepływu informacji mogą zostać uzyskane przez zastosowanie innych rodzajów modulacji częstotliwości.

Na rysunku 8.47 zaprezentowano rezultat działania stanowiska z dwiema szynami i przetwornikami magnetostrykcyjnymi [115, 138, 139]. Częstotliwość nośna

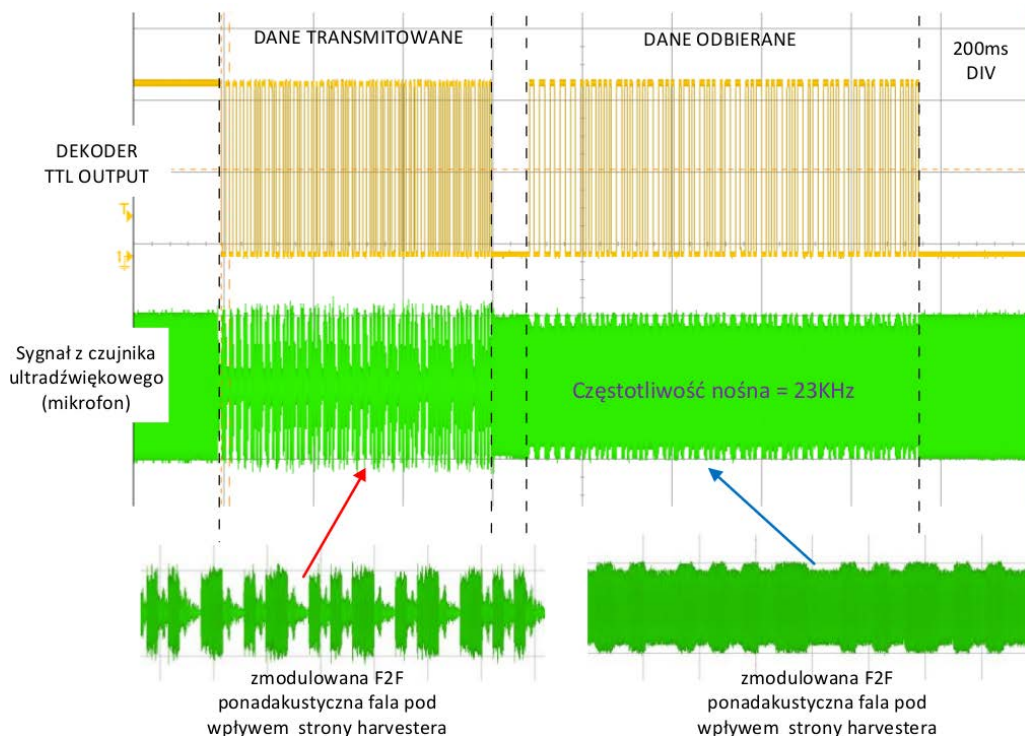


Rys. 8.46. Okno programu do obsługi stanowiska SURPS [115, 119, 132, 138, 139]

sinusoidalna o małych zniekształceniach harmonicznym (w poniższym przypadku: 23 kHz), generowana przez aktuator w celu transmisji danych do mikroprocesora zasilanego z harvesterów, jest modulowana w trybie „włącz–wyłącz”, czyli w niektórych „odcinkach” czasowych aktuator nie pracuje, odłączając chwilowo zasilanie strony harvestingowej. Ponieważ zasilacz z harvesterami wyposażony został w bank kondensatorów o pojemności wystarczającej na 0,5 s pracy mikroprocesora – bez „wsparcia” przez harvestry, osiągnięto zadowalające rezultaty nawet podczas transmisji wielu bajtów informacji zakodowanej zgodnie ze znakami ASCII.

Dzięki poczynionym obserwacjom stwierdzono, że zastosowanie rozwiązań z użyciem systemu SURPS umożliwia przesyłanie energii na duże odległości bez użycia kabli, lecz jedynie przez wykorzystanie drgań mechanicznych w paśmie ultradźwiękowym, a więc niesłyszalnym dla użytkownika. Jednakże lokalizacja harvesterów w różnych rodzajach konstrukcji nie może być dowolna. Jest ona ściśle powiązana z ośrodkiem, w jakim dokonuje się transmisji, a także z długością ultradźwiękowej fali nośnej.

Aby zoptymalizować transmisję, uzyskując przede wszystkim jej dużą efektywność oraz akceptowalnie niski poziom natężenia hałasu generowanego przez układ, opracowane zostało specjalne oprogramowanie umożliwiające zarówno dobór odpowiedniego rodzaju aktuatora, jak i rodzaju modulacji czy zalecanego pasma częstotliwości, w którym, z dużą dokładnością, wyszukiwana zostaje wartość



Rys. 8.47. Graficzna prezentacja rezultatów transmisji zasilania i danych z użyciem drgań mechanicznych z zastosowaniem systemu SURPS [115, 119, 138, 139]

rezonansowa, a następnie ta najbardziej efektywna wykorzystywana zostaje do transmisji.

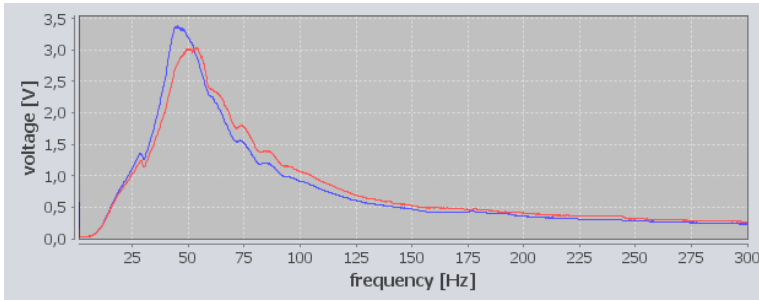
Zastosowanie systemu SURPS do badania odpowiedzi harvesterów różnych typów

Ze względu na dużą uniwersalność systemu skanującego SURPS dokonano badań odpowiedzi częstotliwościowych opracowanych wcześniej harvesterów, w których wykorzystano efekt Faradaya.

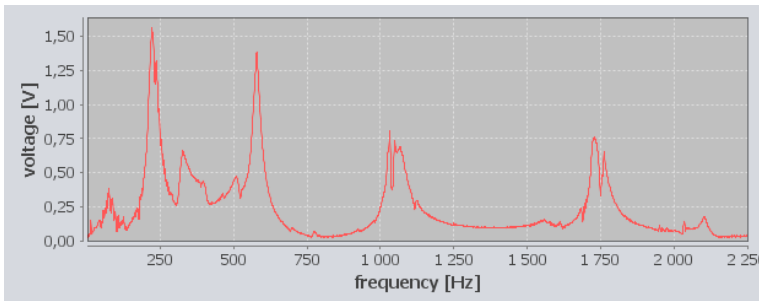
Zalecane przedziały częstotliwości dla wskazanych rozwiązań harvestingowych, to odpowiednio:

- 0,1–300 Hz – harwestery wykorzystujące efekt Faradaya,
- 50–1000 Hz – transfer mocy i odzysk energii przez silnik krokowy,
- 10 000–50 000 Hz – transfer mocy przez układy magnetostrykcyjne i elektrostrykcyjne.

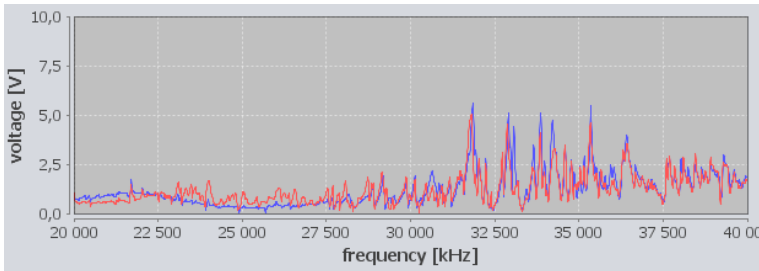
Program umożliwia porównywanie odpowiedzi amplitudowej dla różnych modyfikacji w harvesterze, np. dodane masy (rys. 8.48) [138, 139].



Rys. 8.48. Porównanie odpowiedzi częstotliwościowej harwestera z rysunku 8.12. Bez – (czerwony) i z dodaną masą (niebieski) w postaci kuli [138, 139]



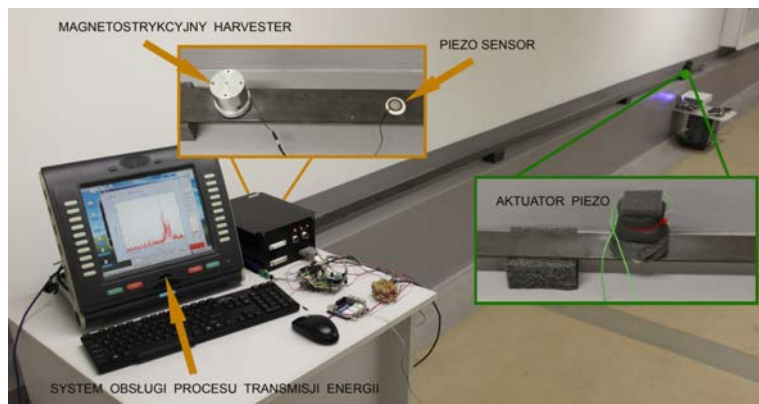
Rys. 8.49. Odpowiedź częstotliwościowa harwestera wibracyjnego na bazie silnika krokowego [138, 139]



Rys. 8.50. Wpływ niewielkiej zmiany naprężenia wstępnego na rezonans mechaniczny konstrukcji harwestera z rdzeniem magnetostrykcyjnym [137]

System SURPS umożliwia również otrzymanie odpowiedzi częstotliwościowej podczas wzbudzenia drgań mechanicznych w obwodzie magnetycznego silnika krokowego (400 kroków na obrót; rys. 8.49) [138, 139].

System umożliwia też dobór naprężenia wstępnego i kontrolę nawet niewielkiej jego zmiany w harvesterze magnetostrykcyjnym, co przedstawione zostało na rysunku 8.50 [137].



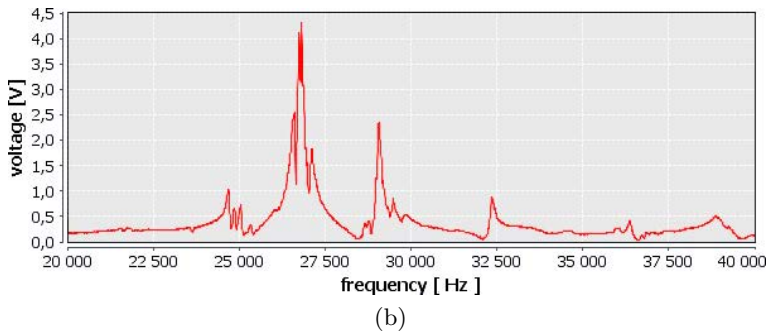
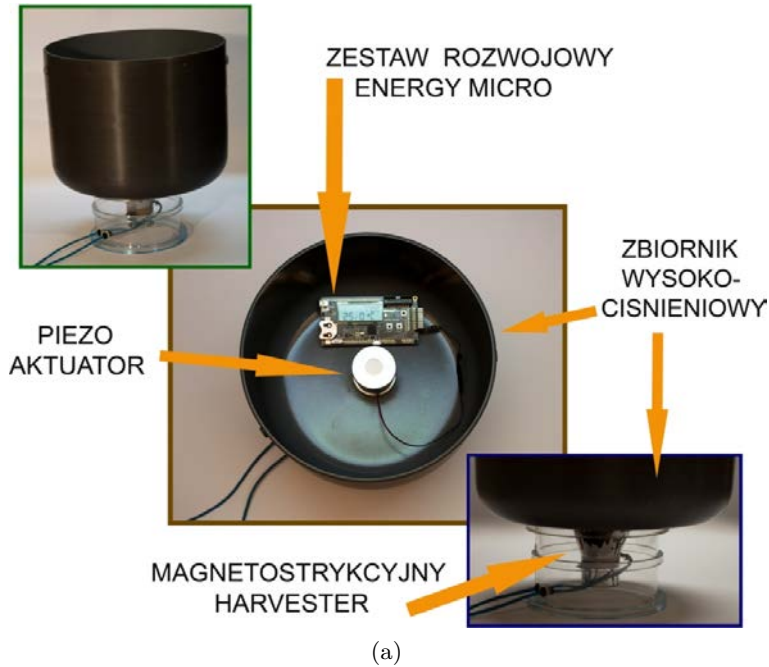
Rys. 8.51. Stanowisko do transmisji zasilania przez metalową szynę długości 6 m [119, 126, 139]

Aplikacje systemu SURPS do transmisji zasilania przez drgania mechaniczne

Kolejnym etapem badań była konstrukcja, w której elementem nośnym transmitowanej energii była metalowa szyna długości 6 metrów. Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość transferu energii przez system SURPS na duże odległości (rzędu kilkunastu metrów) przez transmisję aktuatorami piezoelektrycznymi o mocy powyżej 50 W. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 8.51 [126, 139].

Ze względu na potencjalne możliwości zastosowań systemu SURPS, konieczne stało się stworzenie konstrukcji, która sprawdzi możliwości przesyłania danych równocześnie z energią potrzebną do poprawnej pracy systemu czujników, zasilanego z odbiornika energii. W tym celu wykonano konstrukcję odzwierciedlającą fragment zbiornika wysokociśnieniowego. Po obu stronach ścianki umieszczono parę nadajnik (aktuator)–odbiornik (harvester). Otrzymane wyniki zaprezentowane są – wraz ze zdjęciami układu – na rysunku 8.52 [119, 139]. Warto zaznaczyć, że wyniki te były porównywalne również w różnych konfiguracjach rozmieszczenia aktuatora i harwestera.

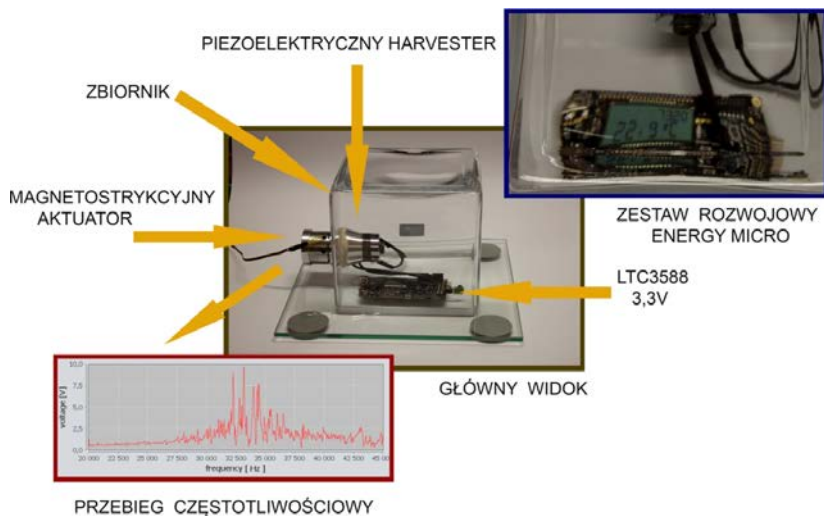
Powstał także prototyp systemu (rys. 8.53) jednoczesnego zasilania i transmisji danych do mikroprocesorowego systemu czujników przez szklaną ścianę hermetycznego zbiornika w wyniku stymulacji falą ultradźwiękową [139]. Choć jego konstrukcja jest podobna, uzyskane odpowiedzi częstotliwościowe różnią się ze względu na inną częstotliwość rezonansową piezoelektrycznego harwestera. W tym przypadku aktuatorem był szerokopasmowy magnetostrykcyjny aktuator, natomiast harvesterem piezoelektryczny przetwornik stożkowy o częstotliwości drgań własnych 38 kHz. Konfiguracja zapewniła uzyskanie satysfakcjonującego rezultatu. Widok prototypowego stanowiska przedstawiony jest na rysunku 8.53.



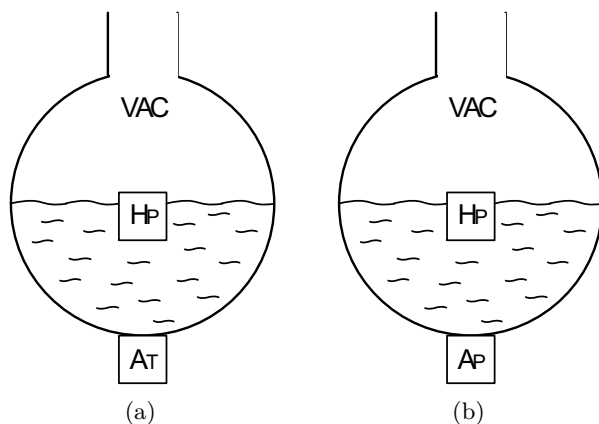
Rys. 8.52. Jednoczesny transfer mocy i danych przez ścianę zbiornika wysokociśnieniowego: a) widok demonstratora, b) odpowiedź częstotliwościowa harwestera magnetostrykcyjnego [119, 139]

Innym przykładem prac nad technologią SURPS jest układ aktuatora piezoelektrycznego oraz zbioru małych, niezależnych odbiorników, w których skład wchodzi harvester na bazie piezoelementu firmy TDK sprzężony z systemem mikroprocesorowym. W toku prowadzonych prac uznano, że aktuatorem może być zarówno przetwornik magnetostrykcyjny, jak i piezoelektryczny.

Podane idee wykorzystano do opracowania koncepcji i demonstratora pływających harvesterów, co przedstawia rys. 8.54 [139]. Zagadnienie jest istotne



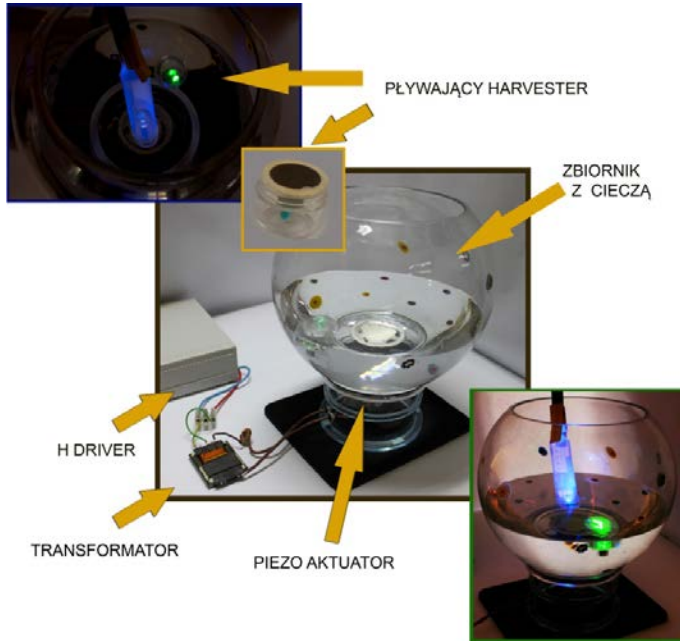
Rys. 8.53. Widok oraz odpowiedź częstotliwościowa układu do jednoczesnej transmisji mocy przez ścianę hermetycznego pojemnika szklanego o grubości ścianki około 10 mm [139]



Rys. 8.54. Pływające harvestery zasilane z drgań cieczy poddanej wzbudzeniu aktywatorem: a) magnetostrykcyjnym, b) piezoelektrycznym [139]

w przypadku aplikacji, np. w wysokociśnieniowych (i/lub kriogenicznych) zbiornikach do gromadzenia paliw gazowych [151–155].

Dzięki umieszczeniu pod zbiornikiem z cieczą aktyuatorowi, możliwe jest bezprzewodowe zasilanie odbiorników swobodnie unoszących się na jej powierzchni w szerokim paśmie częstotliwości. W celu wizualizowania tej zależności powstał zbiór odbiorników z różnokolorowymi diodami, świecącymi z różnym natężeniem



Rys. 8.55. Układ do transmisji mocy falą ultradźwiękową do autonomicznych pływających harvesterów, mogących zasilać podłączone do nich mikroprocesory w sposób ciągły [119, 139]

(bądź mrugającymi z różnymi częstotliwościami) w zależności od miejsca, w którym pływają, mocy drgań mechanicznych i głębokości zanurzenia (rys. 8.55) [139].

Podsumowanie

Uzyskano jednoczesne zasilanie układu czujników skonstruowanego z użyciem przemysłowego 32-bitowego systemu mikroprocesorowego i transmisję danych w trybie półduplex z prędkością około 1000 bps przy odzysku energii z drgań mechanicznych o częstotliwości ponadakustycznej (tab. 8.4). Większe prędkości transmisji są możliwe dzięki przejściu ze stosowanej modulacji amplitudowej do modulacji fazy, jednak nie było to przedmiotem szeroko zakrojonych działań.

Opracowano technikę zasilania systemu mikroprocesorowego z harvesterów połączonych w różne konfiguracje dla częstotliwości nośnych zależnych od częstotliwości drgań własnych konstrukcji zawierającej dedykowane akтуatory i zespoły harvesterów z przetwornikami elektro- i magnetostrykcyjnymi. Wyszczególniono typy akтуatorów:

- magnetostrykcyjny, z wykorzystaniem Terfenolu-D – oznaczenie A_T ;
- elektrostrykcyjny, z wykorzystaniem piezo – oznaczenie A_P ;

Tabela 8.4. Dopuszczalne konfiguracje pracy z jednoczesną transmisją zasilania i danych [139]

Rodzaj konfiguracji	Cechy szczególne
$A_T \rightarrow H_T$	Bezszelestny transport mocy, zakres częstotliwości do 40 kHz, dane Rx, Tx
$A_T \rightarrow H_P$	Bezszelestny transport mocy, mały prąd–duże napięcie, dane Rx,
$A_P \rightarrow H_T$	Możliwy niewielki hałas, transport dużej mocy, dane Rx, Tx
$A_P \rightarrow H_P$	Możliwy niewielki hałas, transport dużej mocy, dane Rx,

typy harvesterów:

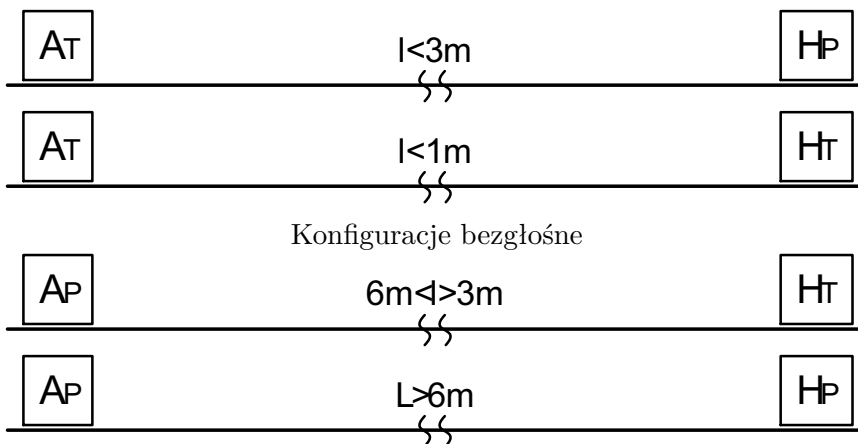
- magnetostrykcyjny, z wykorzystaniem Terfenolu-D – oznaczenie H_T ;
- elektrostrykcyjny, z wykorzystaniem piezo – oznaczenie H_P .

Struktury wielowęzłowe

$$A_{T\varphi} + A_{T\Delta\varphi} \rightarrow H_T + H_T$$

Podany sposób transmisji umożliwia przesłanie większej mocy w magnetostrykcyjnych systemach wielowęzłowych, gdyż pojedynczy węzeł ma ograniczoną moc w zakresie pasma ultradźwiękowego, ze względu na mały przekrój rdzenia z Terfenolu-D.

Dopuszczalne konfiguracje konstrukcji szynowych zaprezentowano na rysunku 8.56 [115, 119, 128, 132, 138, 139].



Rys. 8.56. Konfiguracje dużej mocy [115, 119, 128, 132, 138, 139]

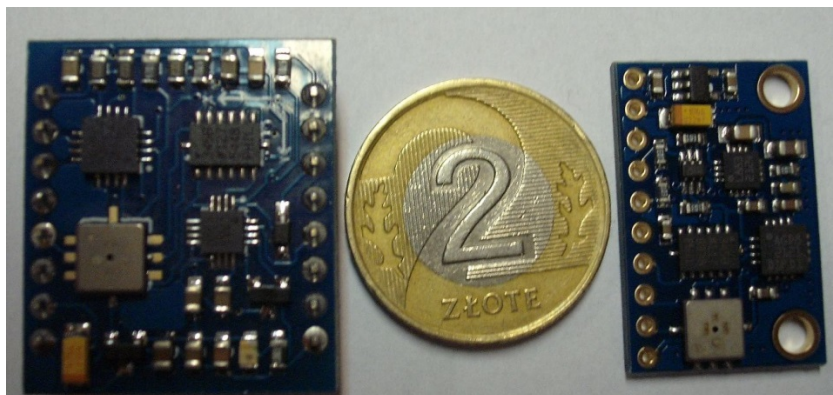
8.5.9. Autonomiczny system diagnostyki parametrów środowiskowych i eksploatacyjnych Multi-DOF

Rozwój systemów ciągłego diagnozowania konstrukcji (SHM) i zasilania sieci czujników z zastosowaniem koncepcji Energy Harvesting wymaga stworzenia tzw. autonomicznego systemu diagnostyki parametrów środowiskowych i eksploatacyjnych Multi-DOF. Zagadnienie to rozważono z myślą o aplikacjach w takich obiektach jak wysokociśnieniowe zbiorniki do paliw gazowych, rury do różnych mediów oraz duże konstrukcje stacjonarne (kotły energetyczne, instalacje odsiarczania spalin, budynki, mosty itp.). Dynamiczny rozwój technologii MEMS w budowie czujników doprowadził do znacznego ograniczenia poboru mocy elektrycznej w autonomicznych systemach pomiarowych, torując drogę do zasilania przez harvestery. Zastosowanie MEMS nie tylko zwiększyło jakość pomiarów i ich digitalizację, ale ułatwiło zarządzanie poborem mocy w urządzeniach dzięki wykryciu bodźca aktywującego główny algorytm działania systemu. Ważną aplikacją dla sensorów MEMS stają się pomiary parametrów zewnętrznych pojazdów lądowych, obiektów pływających i latających. W tym przypadku wymagana jest duża odpowiedzialność systemu, stąd większa precyzja i stabilność niż w innych zastosowaniach. Czujniki z grupy MEMS stanowią doskonały wybór w tworzeniu najnowszych rozwiązań z zastosowaniem harvesterów o działaniu magnetycznym.

W systemie Multi-DOF w określeniu pozycji obiektu wykorzystuje się 10 czujników MEMS wyznaczających stopnie swobody (ang.: DOF – *Degree Of Freedom*). System ma niewielkie wymiary zewnętrzne (rys. 8.57) i zawiera:

- akcelerometr 3D: A_x, A_y, A_z ; pomiar drgań,
- żyroskop 3D: Q_x, Q_y, Q_z ; pomiar obrotu,
- magnetometr: H_x, H_y, H_z ; pomiar anomalii magnetycznych,
- czujnik ciśnienia atmosferycznego do określenia wysokości nad poziomem morza: P ,
- dostępne dwie wersje PCB z różnym rozmieszczeniem czujników bazowych,
- mikrofony cyfrowe, które można wykorzystać do pomiaru natężenia dźwięku (rys. 8.58) [130, 139].

Innym typem są czujniki wilgotności i temperatury o konstrukcji cienkowarstwowej, mogące dostarczyć dodatkowych informacji o stanie obiektu badanego. Ze względu na parametry magistrali cyfrowej można doposażyć system o sensory: temperatury (T) i wilgotności (R). Dodatkowo możliwy staje się pomiar składu gazów atmosferycznych. Ze względu na nowe metody ich pomiaru, również nadające się do aplikacji harvestingowych, można np. zastosować układ do wyznaczenia zawartości CO_2 . Łatwa dostępność czujników natężenia światła umożliwia też pomiar oświetlenia. Daje to do dyspozycji użytkownika łącznie 15 parametrów opisujących, co dzieje się z obiektem badanym.



Rys. 8.57. Wielkość modułów z czujnikami MEMS [130, 139]



Rys. 8.58. Widok czujnika hałasu [130, 139]

W przypadku harvestingu ważnym aspektem jest pobór prądu i zakres napięć pracy. Cyfrowe czujniki oparte na technologii MEMS zapewniają dolny próg działania na poziomie poniżej 2 V, jednak należy pamiętać, że nie jest on standardem i każdy typ czujnika ma odmienny zakres napięcia pracy.

8.5.10. Bezprzewodowe węzły harvestingowe w ramach systemu Multi-DOF

Możliwe jest też zastosowanie gotowych modułów z wbudowanym procesorem sygnałowym (DSP), który zarządza obsługą wszystkich czujników i ułatwia obliczenia, np. częstotliwości drgań mechanicznych z wykorzystaniem algorytmu FFT, sprawiając że zewnętrzny mikroprocesor dostaje gotowe wyniki i nie musi być bardzo wydajny obliczeniowo, jedynie może pełnić funkcję interfejsu bezprzewodowego. Dopasowanie harwestera o działaniu magnetycznym do zasilania tego modułu i przyszła aplikacja przyspieszają prace nad wdrożeniem.

Zestawienie zakresów pomiarowych, jakie musi zaoferować system pomiarowy:

- trójosiowy, cyfrowy akcelerometr ± 18 g,
- trójosiowy, cyfrowy żyroskop o zakresie dynamicznym $\pm 450^\circ/\text{s}$,

- trójosiowy odczyt przyrostu kąta i prędkości,
- trójosiowy cyfrowy magnetometr $\pm 2,5$ Gs,
- poniżej $\pm 0,05^\circ$ błędu w dopasowaniu prostopadłości sensorów,
- cyfrowy czujnik ciśnienia 300–1100 mbar,
- krótki czas startu,
- zakres temperatury dla kalibracji: -40 °C do $+70$ °C.

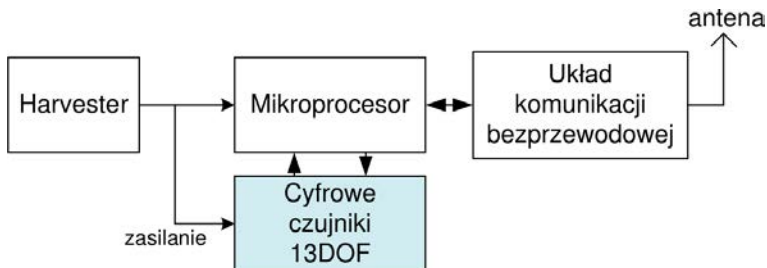
Zastosowanie systemu Multi-DOF do diagnostyki i eksploatacji obiektów w odległych i niedostępnych miejscach umożliwi odbiór istotnych parametrów i określenie wystąpienia stanu alarmowego (rys. 8.59). Zasilanie przez harvesting wyeliminuje utrudnione prowadzenie kabli (rys. 8.60). Łączność bezprzewodowa umożliwi zebrać i zarchiwizować otrzymane informacje z zabezpieczeniem antysabotażowym transmisji z poszczególnych odbojników. System czujników musi spełniać normy odnośnie do pracy w trudnych warunkach.

8.5.11. Energy Harvesting. Przykłady aplikacji innych materiałów Smart w badaniach własnych

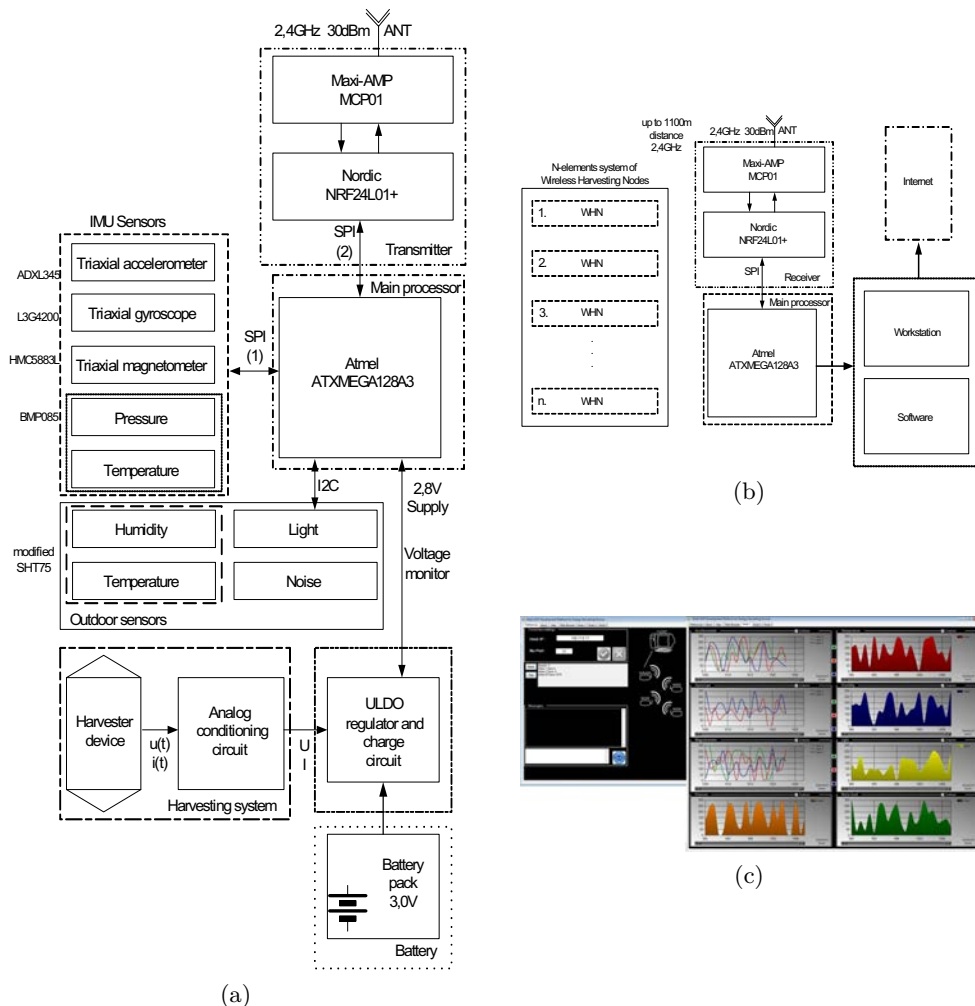
W badaniach, mimo dominującej roli materiałów magnetycznych, podejmowano również prace mające na celu wykorzystanie innych grup materiałów Smart w tworzeniu oryginalnych rozwiązań harvestingowych. Dalej przedstawiono skrótowo wybrane dwa przykłady dotyczące odpowiednio piezolaminatów PZT i polimerów elektroaktywnych DEAP.

Harvestery piezoelektryczne

Materiały piezoelektryczne (PZT) w postaci tzw. patchy mogą być stosowane jako czujniki drgań, ale mogą też być używane jako harvestery. W Laboratorium Dynamiki Politechniki Wrocławskiej dokonano szczegółowego przeglądu materiałów piezoelektrycznych stosowanych jako harvestery do odzysku energii



Rys. 8.59. Struktura bezprzewodowego węzła harvestingowego z wyróżnionym blokiem DOF [118, 130, 131]



Rys. 8.60. Struktura autonomicznego systemu Multi-DOF do diagnostyki parametrów środowiskowych i eksploatacyjnych obiektów wykorzystującego czujniki bezprzewodowo zasilane ze źródeł harvestingowych [119, 130, 139]

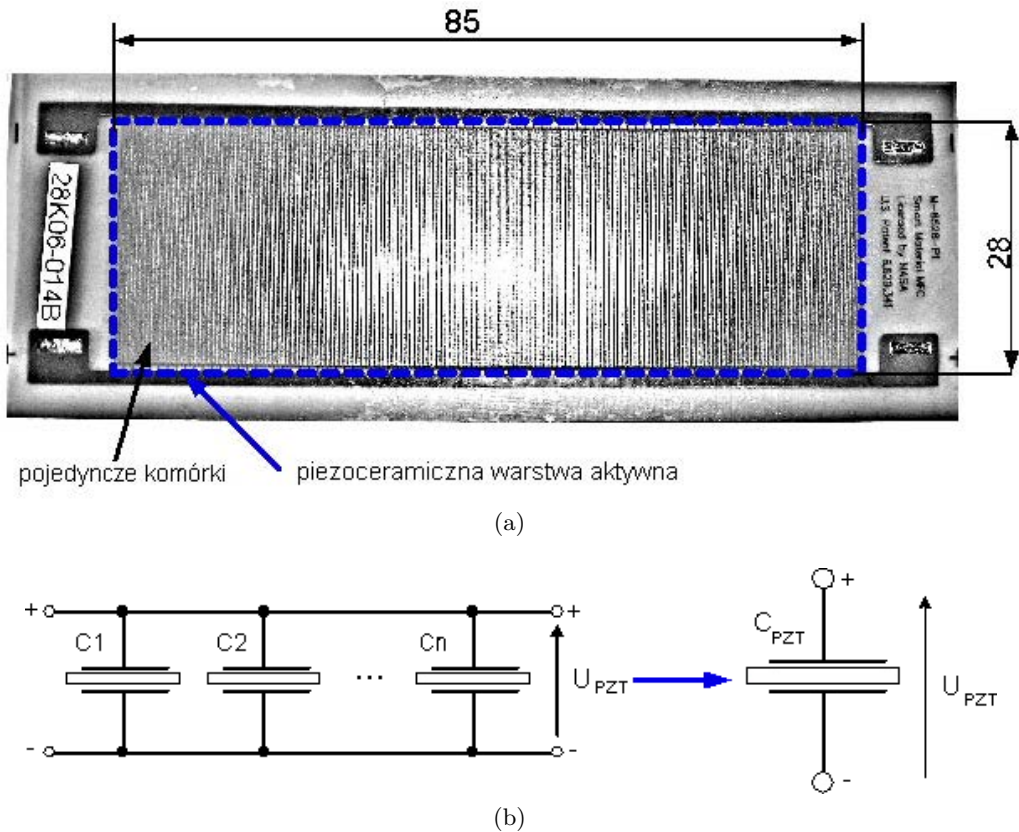
z niskoczęstotliwościowych drgań mechanicznych. Główne rezultaty dotyczyły zastosowania zaawansowanego materiału piezoelektrycznego w formie laminatu.

Na rysunku 8.61a przedstawiono wymiary zastosowanego elementu PZT. Należy mieć na uwadze, że pod względem aplikacyjnym, standardowo, wymieniony piezolaminat preferowany jest jako akuator typu Smart. Dlatego podjęto prace na rzecz sprawdzenia możliwości zastosowania tego elementu jako harvestera do odzyskania energii z drgań mechanicznych.

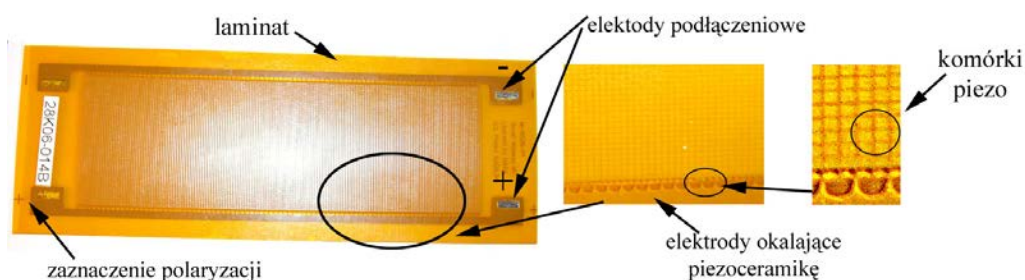
Tabela 8.5. Zestawienie najważniejszych parametrów piezolaminatów PZT [147]

Rodzaj struktury MFC	P1	P2
Zakres napięcia pracy w trybie aktuatora	-500-1500 V	-60-360 V
Pojemność elektryczna	0,42 nF/cm ²	4,5 nF/cm ²
Odształcenie pod wpływem napięcia	0,7-0,9 [0-1500 V]	-2 [0-360]
Współczynnik generowanego napięcia pod wpływem odkształcenia	1670 [pC/ppm] [>100 V]	3250 [pC/ppm] [<100 V]

W tabeli 8.5 zestawiono najważniejsze parametry posiadanego piezolaminatu PZT, które są niezbędne do wyznaczenia jego zakresu stosowalności w przypadku wykorzystania do budowy aktuatora.



Rys. 8.61. Zastosowany element PZT: a) wymiary warstwy aktywnej, b) schemat elektryczny [147]



Rys. 8.62. Widok zastosowanego piezolaminatu PZT wraz z opisem jego charakterystycznych cech [156]

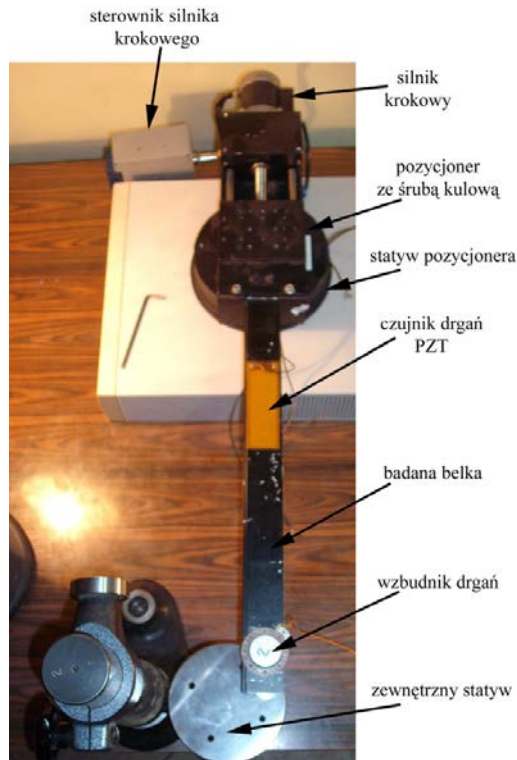
Na rysunku 8.62 przedstawiono z kolei widok elementu PZT [156] jako laminatu. Wymiary pojedynczej komórki piezo są mikroskopowe, co sprawia, że przetwornik nadaje się do aplikacji szerokopasmowych. Z danych producenta wynika, że Piezo Patche tego typu można stosować jako akuator do częstotliwości około 5 kHz, toteż przyjęto taki zakres częstotliwości, rozpatrując element jako potencjalny harvester do odzysku energii z drgań mechanicznych.

Na rysunku 8.63 przedstawiono widok stanowiska z belką; opisano poszczególne elementy składowe [147]. Układem zadającym określoną długość belki jest pozycjoner z mechanizmem śrubowym na precyzyjnych śrubach kulowych. Układem napędowym jest silnik krokowy, który sterowany jest przez sterownik Wobit SMC64 podłączony pod wyjścia cyfrowe karty NI USB-6361. Rejestracja danych oraz budowa algorytmów następuje w środowisku DasyLab, na mobilnym komputerze T30 wraz ze stacją dokującą [147].

Na rysunku 8.64 przedstawiono przebieg drgań [156] belki przez zastosowanie wymuszenia skokowego (belka była ręcznie wychylana do stałego zadanego położenia i zwalniana). Najpierw przebadano układ bez wzbudnika, a następnie dodano wzbudnik i badania powtórzono. Masa wzbudnika wynosiła 83 g z okablowaniem [147]. Na rysunku 8.64 z kolei przedstawiono przebieg drgań belki o różnych długościach.

Możliwości budowy harvesterów opartych na polimerach elektroaktywnych

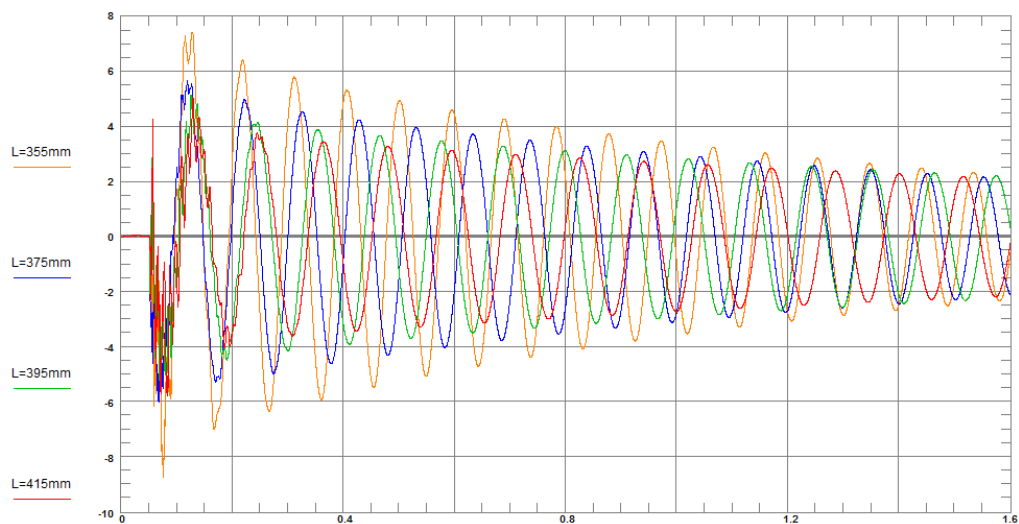
Wśród polimerów elektroaktywnych (ang.: *Electro-Active Polymer* – EAP) wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje: elektronowe oraz jonowe [157, 158]. Pierwsza grupa polimerów (m.in.: elektrostatyczne, piezoelektryczne, ferroelektryczne) z reguły wymagają dużych pól aktywacyjnych, które są bliskie poziomowi destrukcji materiału. W związku z tym materiały te sterowane są dużym napięciem i charakteryzują się dużą gęstością energii oraz krótkim czasem odpowiedzi. Tymczasem



Rys. 8.63. Widok układu ze zmienną długością belki utwierdzonej jednostronnie wraz z opisem elementów składowych [147]

elektroaktywne polimery jonowe, w postaci żelu lub kompozytu polimer-metal oraz węglowych nanorurek, wymagają stosunkowo niskich napięć sterowania (ok. 1–5 V). Ich wadą jest konieczność pracy w stanie zwilżenia lub w stałych elektrolitach. Jednocześnie otrzymana siła jest względnie mała w porównaniu z elektronowymi polimerami, ale za to materiały te odznaczają się znacznie większą deformacją [159].

Zazwyczaj polimery elektroaktywne stosowane są jako akulatory [160] lub czujniki. Obecnie do pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych wykorzystuje się również polimery elektroaktywne jako harvestery elektrostatyczne, które zapewniają sygnał o wysokim napięciu. Koszty materiałów oraz procesu technologicznego są stosunkowo małe. Zaletą jest też możliwość miniaturyzacji urządzenia, wadą generatorów elektrostatycznych jest natomiast konieczność projektowania układu sterującego [161]. Zasada działania elektrostatycznych generatorów (harvesterów) polega na wykonaniu pracy przez siłę zewnętrzną przeciw siłom przyciągania przeciwnie naładowanych elektrod. Urządzenia można podzielić na dwie klasy w zależności od metody generowania i transportowania ładunku.

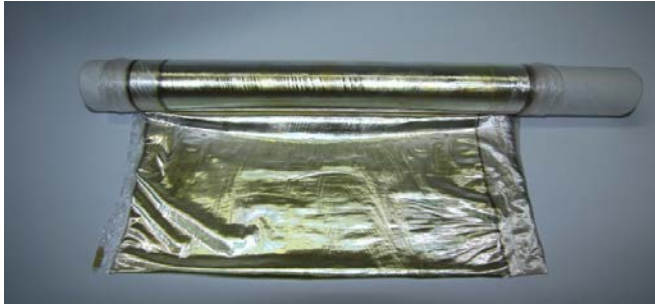


Rys. 8.64. Przebieg drgań belki o różnych długościach poddanej wymuszeniu jednostkowemu [147]

W pierwszej – ładunek jest transportowany na powierzchni ciała (np. generator Van de Graafa) albo przez łuk elektryczny. W drugiej – układ działa jak kondensator, a zewnętrzna siła porusza jego elektrody [162]. Mankamentem elektrostatycznych generatorów jest też konieczność zasilania ich ze źródła o napięciu początkowym. Ponadto w układzie musi znajdować się przełącznik zsynchronizowany z częstotliwością cyklu ładowania i rozładowywania kondensatora.

W pracy [161] rozpatrywany jest wpływ temperatury i częstotliwości pracy tej klasy polimeru na jego właściwości mechaniczne oraz elektryczne. Zaprezentowano oraz porównano tam również cykle pracy, w ramach których może odbywać się „zbieranie” energii. Pod uwagę zostały wzięte następujące cykle: Ericsona, Stirlinga, hybrydowy (połączenie cyklu Stirlinga oraz Ericsona), tzw. pasywny oraz pseudopiezoelektryczny (działający w trybie AC lub DC). W podsumowaniu porównano teoretyczną ilość pozyskanej energii oraz jej straty. W przypadku harvestingu dla małych częstotliwości (poniżej 1 Hz) i dużych odkształceń sugerowane są cykle pracy Stirlinga i Ericsona. Dla dużych częstotliwości zaleca się z kolei cykl pseudopiezoelektryczny, w którym uzyskiwana gęstość energii jest niższa niż w przypadku cyklu Stirlinga lub Ericsona, ale współczynnik strat jest również mniejszy.

Firma Danfoss wytworzyła film (błone) Polypower (Danfoss, 2012) jako inteligentny elastomer z aplikacjami obejmującymi czujniki i aktuatory. Wśród wielu zastosowań, które Danfoss sprawdził, są roboty przemysłowe, systemy redukcji szumów oraz drgań. Generowanie energii elektrycznej z energii mechanicznej,



Rys. 8.65. Folia PolyPower nawinięta na rolkę [164]

w przypadku materiału PolyPower, może odbywać się w układzie elektrycznym zaprezentowanym, np. w [163].

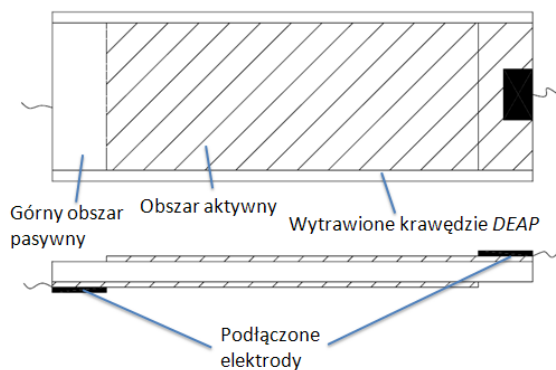
Celem prac własnych była transmisja mocy elektrycznej przez drgania mechaniczne z wykorzystaniem układu „błona PolyPower-PZT”. W fazie początkowej kluczowe znaczenie miało opanowanie technologii przygotowania elektrod z dielektrycznego polimeru elektroaktywnego (ang.: *Dielectric Electro-Active Polymer* – DEAP), ich preparatyka oraz sprzężenie z piezoharvesterem PZT. Dodatkowo należało dokonać pomiaru odpowiedzi mechanicznej na zadany bodziec elektryczny (czyli wysokie napięcie).

Pierwszym etapem było przygotowanie membran do badania. W trakcie ich wycinania ze szpuli DEAP należało uważać, aby wycinać je wzdłuż zwoju, na który nawinięty był materiał i nie wywołać niepotrzebnych naprężeń (rys. 8.65) [164].

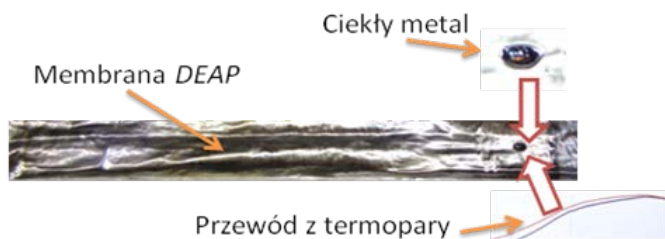
Niezwykle istotne było dokładne wycięcie membran, prostopadłe do orientacji pofalowanej struktury materiału. Ułatwiało to precyzyjne wykorzystanie elektrycznych właściwości. Ponadto nieostrożne działanie mogło spowodować nieodwracalne zmiany w strukturze materiału [164]. W szczególnych przypadkach należało przewidzieć odpowiednie naddatki folii. Tak więc dobór metody i parametrów cięcia wynikał zarówno z właściwości materiału, jak i sposobu cięcia.

Drugim krokiem było specjalne wytrawienie krawędzi (szerokości 4 mm), wcześniej wyciętych błon z PolyPower. Następnie usunięto warstwy przewodzące specjalnym preparatem konsystencji żelu o jak najmniejszych uszkodzeniach, co miało na celu uniknięcie przebicia elektrycznego i „nadpalenia” krawędzi błony DEAP. Schemat preparatyki membran z zaznaczonymi obszarami aktywnymi, pasywnymi oraz widocznym obszarem wytrawionym przedstawiono na rysunku 8.66 [164].

Kolejnym zabiegiem było podłączenie elektrod, po przeciwnych stronach, do aktywnego obszaru wcześniej przygotowanych membran. Miało to na celu zapewnienie zasilania napięciem sterującym. Za przewody doprowadzające użyto elastycznych i lekkich drutów termoparowych typu T grubości 0,08 mm. Aby zwiększyć elektryczną przewodność połączenia błony i elektrody, w miejscu ich styku



Rys. 8.66. Schemat preparatyki membran DEAP wraz z podłączonymi przewodami oraz zaznaczonymi obszarami aktywnymi i pasywnymi [164]



Rys. 8.67. Schemat membrany PolyPower wraz z miejscem podłączenia przewodu z termopary wraz z ciekłym metalem [160, 164, 165]

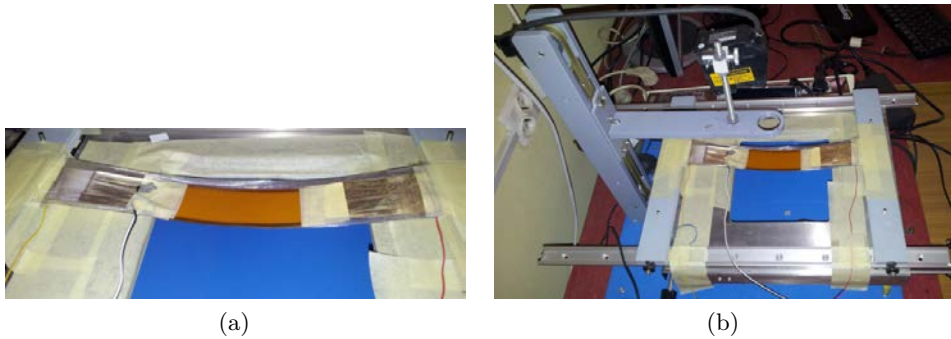
umieszczono ciekły metal (rodzaj stopu Indu i Galu). Następnie całe połączenie pokryto warstwą kleju cyjanoakrylowego (rys. 8.67) [160, 164, 165].

Działania te umożliwiły w rezultacie stworzenie stanowiska do wytwarzania mocy elektrycznej przez drgania mechaniczne układu „błona PolyPower-PZT”, w zakresie częstotliwości rezonansowej układu (rys. 8.68) [164, 165]. Układ poddano szczegółowym badaniom w zakresie zmienności parametrów zadawanych i uzyskiwanych odpowiedzi oraz efektywności transmisji energii.

8.5.12. Energy Harvesting. Kierunki dalszych badań własnych

Tematyka EH należy dzisiaj do tak zwanego gorącego trendu badań (ang.: *cutting edge science topics*). Łatwo też uzyskać się w tej dziedzinie wdrożenia. Wszystko to skłania do intensywnego kontynuowania badań. Szczególnie sensowne wydaje się to w następujących kierunkach, a mianowicie:

- doskonalenie wiedzy z zakresu materiałów Smart niezbędnych do realizacji EH, a w tym głównie materiałów o gigantycznej magnetostrykcji (litych, prosz-



Rys. 8.68. Transmisja mocy elektrycznej przez drgania mechaniczne układu błona PolyPower–PZT w zakresie częstotliwości rezonansowej układu: a) sprzężenie błony PolyPower z piezolaminatem PZT, b) widok stanowiska [119, 164, 165]

kowych, krystalicznych, amorficznych itp.) oraz kompozytów z ich udziałem, a także uzupełniająco – magnesów neodymowych,

- rozwój metod i technologii mających na celu przekształcanie energii mechanicznej (udar, drgania) w elektryczną, głównie w zakresie małych mocy, umożliwiającących zasilanie systemów pomiarowych SHM (ang.: *Structural Health Monitoring*); uzupełniająco należy podejmować prace w zakresie odzysku energii z „odpadowego” ciepła,
- stworzenie palety harvesterów jako demonstratorów laboratoryjnych prezentujących możliwości aplikacji, głównie w zakresie pojazdów (w tym głównie samochodów), obiektów stacjonarnych (np. budowle, maszyny, rurociągi, zbiorniki), jak i medycyny (np. tzw. bioharvesting),
- wzrost sprawności przekształcania energii w harvesterach; niezbędny jest w tym zakresie rozwój opierających się zarówno na dotychczasowych zastosowanych ideach fizykalnych EH, jak i nowych,
- opanowanie gromadzenia energii elektrycznej (o nieustalonych parametrach) z harvesterów w superkondensatorach i przekształcanie jej do postaci użytecznej dla systemów elektronicznych,
- integracja harvesterów wielowzłowych, wykorzystujących różne idee fizykalne, w spójny układ gromadzenia energii,
- rozwój bezprzewodowego transferu energii i informacji z użyciem ultradźwięków w różnych mediach (ciało stałe, ciecz, gaz),
- modelowanie numeryczne zjawisk krzyżowych występujących w harvesterach, w celu optymalizacji materiałów i konstrukcji; równolegle należy doskonalić techniki eksperymentalne do identyfikacji modeli (np. z wykorzystaniem magnetowizji).

Bibliografia

- [1] Roundy S., Wright P.K., Rabaey J.M., *Energy scavenging for wireless sensor networks: with special focus on vibrations*, Springer, Berlin, Heidelberg 2004.
- [2] Roundy S., Steingart D., Frechette L., Wright P., Rabaey J., *Power sources for wireless sensor networks*, [w:] *Wireless Sensor Networks*, H. Karl, A. Wolisz, A. Willig (red.), 2920, Springer, Berlin, Heidelberg 2004, 1–17.
- [3] Beeby S.P., Tudor M.J., White N.M., *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*, *Measurement Science and Technology*, 17, 12, 2006, R175.
- [4] Fukuda T., Menz W. (red.), *Handbook of sensors and actuators. Micro Mechanical Systems*, 6, Elsevier Science, Amsterdam 1998.
- [5] Arnold D.P., *Review of microscale magnetic power generation*, *IEEE Transactions on Magnetics*, 43, 11, 2007, 3940–3951.
- [6] Kompis C., Aliwell S. (red.), *Energy Harvesting Technologies to Enable Remote and Wireless Sensing* 2008.
- [7] Green P.L., *Nonlinear Energy Harvesting*, rozprawa doktorska, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, 2012.
- [8] *Energy autonomous systems: Future trends in devices, technology, and systems*, http://www.catrene.org/web/about/EAS_ExecutiveSumm_v7CAT.pdf 2009.
- [9] Angrist S.W., *Direct energy conversion*, Allyn and Bacon, Inc., Boston 1976.
- [10] Dobrucki A.B., Kacprzyk R., Kaleta J., *Wybrane materiały i struktury aktywne do pozyskiwania energii (energy harvesting) z wykorzystaniem drgań mechanicznych i fal akustycznych*, rap. tech., Politechnika Wroclawska, Wrocław 2011.
- [11] Paradiso J.A., Starner T., *Energy scavenging for mobile and wireless electronics*, *IEEE Pervasive Computing*, 4, 1, 2005, 18–27.
- [12] Starner T., *The challenges of wearable computing: Part 1, 2*, *IEEE Micro*, 21, 4, 2001, 44–67.
- [13] Mitcheson P.D., Green T.C., Yeatman E.M., Holmes A.S., *Architectures for vibration-driven micropower generators*, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13, 3, 2004, 429–440.
- [14] Hudak N.S., Amatucci G.G., *Small-scale energy harvesting through thermoelectric, vibration, and radiofrequency power conversion*, *Journal of Applied Physics*, 103, 10, 2008, 101301–101301.
- [15] Mitcheson P.D., Yeatman E.M., Rao G., Kondala, Holmes A.S., Green T.C., *Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices*, *Proceedings of the IEEE*, 96, 9, 2008, 1457–1486.
- [16] *Energy harvesting for structural monitoring a roadmap to new research challenges*, http://eh-network.org/files/structural_monitoring.pdf 2011.
- [17] Beeby S., White N.M., *Energy harvesting for autonomous systems*, Artech House 2010.
- [18] Torah R., Glynne-Jones P., Tudor M., O'Donnell T., Roy S., Beeby S., *Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting*, *Measurement Science and Technology*, 19, 12, 2008, 125202.

- [19] Williams C.B., Yates R.B., *Analysis of a micro-electric generator for microsystems*, Sensors and Actuators A: Physical, 52, 1, 1996, 8–11.
- [20] Backhaus S., Swift G.W., *New varieties of thermoacoustic engines*, [w:] *Proceedings of the Ninth International Congress on Sound and Vibration 2002*, 8–11.
- [21] Backhaus S., Swift G.W., *A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study*, The Journal of the Acoustical Society of America, 107, 2000, 3148.
- [22] Beale W., *Free piston stirling engines-some model tests and simulations*, [w:] *International Automotive Engineering Congress*, 690230, Society of Automotive Engineers, Detroit, Michigan 1969.
- [23] Ceperley P.H., *A pistonless Stirling engine – the traveling wave heat engine*, The Journal of the Acoustical Society of America, 66, 1979, 1508.
- [24] de Blok C.M., *Thermoacoustic system*, dutch patent PCT/NL98/00515.
- [25] Grzebielec A., *Termodynamiczne podstawy przenoszenia ciepła w termoakustycznych urządzeniach chłodniczych*, Chłodnictwo: Organ Naczelnej Organizacji Technicznej, 44, 7, 2009, 12–16, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPG5-0039-0002>.
- [26] Piechna J., *Termoakustyka przyszłością chłodnictwa?*, Chłodnictwo i Klimatyzacja, nr 4, 2005, 72–77, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPS1-0018-0044>.
- [27] Harrop P., Das R., *Energy harvesting and storage for electronic devices 2011–2021*, rap. tech., IDTechEx 2011.
- [28] Zervos H., *Energy harvesting for automotive applications*, rap. tech., IDTechEx 2011.
- [29] Zervos H., Harrop P., *Energy Harvesting for Electric Vehicles 2011–2021*, Energy harvesting market reports, IDTechEx 2011.
- [30] Tie S.F., Tan C.W., *A review of power and energy management strategies in electric vehicles*, [w:] *2012 4th IEEE International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, 1, 2012, 412–417.
- [31] Wang Y., Dai C., Wang S., *Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source*, Applied Energy, 112, 2013, 1171–1180.
- [32] Phillip N., Maganga O., Burnham K.J., Ellis M.A., Robinson S., Dunn J., Rouaud C., *Investigation of maximum power point tracking for thermoelectric generators*, Journal of Electronic Materials, 42, 7, 2013, 1–7.
- [33] Kumar S., Heister S.D., Xu X., Salvador J.R., Meisner G.P., *Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems Part I: Numerical modeling and baseline model analysis*, Journal of Electronic Materials, 42, 4, 2013, 665–674.
- [34] Yu C., Chau K.T., *Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking*, Energy Conversion and Management, 50, 6, 2009, 1506–1512.
- [35] Stabler F., *Automotive applications of high efficiency thermoelectrics*, [w:] *Proceedings of DARPA/ONR/DOE High Efficiency Thermoelectric Workshop*, San Diego, California 2002, 1–26.
- [36] Rowe D.M., *Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source*, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, 1, 1, 2006, 13–23.

- [37] Rowe D.M. (red.), *CRC handbook of thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton 1995.
- [38] Crane D.T., LaGrandeur J.W., *Progress report on BSST-Led US department of energy automotive waste heat recovery program*, Journal of Electronic Materials, 39, 9, 2010, 2142–2148.
- [39] Lee H., Jang H., Park J., Jeong S., Park T., Choi S., *Design of a piezoelectric energy-harvesting shock absorber system for a vehicle*, Integrated Ferroelectrics, 141, 1, 2013, 32–44.
- [40] Li Z., Zuo L., Kuang J., Luhrs G., *Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier*, Smart Materials and Structures, 22, 2, 2013, 025008.
- [41] Stevic Z., Radovanovic I., *Energy efficiency of electric vehicles*, [w:] *New Generation of Electric Vehicles*, Z. Stevic (red.), InTech 2012.
- [42] Tie S.F., Tan C.W., *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 2013, 82–102.
- [43] Galchev T.V., McCullagh J., Peterson R.L., Najafi K., *Harvesting traffic-induced vibrations for structural health monitoring of bridges*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 21, 10, 2011, 104005.
- [44] Kurata M., Lynch J.P., Galchev T., Flynn M., Hipley P., Jacob V., van der Linden G., Mortazawi A., Najafi K., Peterson R.L., et al., *A two-tiered self-powered wireless monitoring system architecture for bridge health management*, [w:] *Proc. SPIE 7649, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2010*, International Society for Optics and Photonics 2010, 76490K–76490K.
- [45] Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B.R., Czarnecki J.J., *A review of structural health monitoring literature: 1996–2001*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2004.
- [46] Ashebo D.B., Tan C.A., Wang J., Li G., *Feasibility of energy harvesting for powering wireless sensors in transportation infrastructure applications*, [w:] *The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics 2008, 69340Y–69340Y.
- [47] Nagayama T., Jung H.J., Spencer B.F., Jang S., Mechitov K., Cho S., Ushita M., Yun C.B., Agha G., Fujino Y., *International collaboration to develop a structural health monitoring system utilizing wireless smart sensor network and its deployment on a cable-stayed bridge*, [w:] *5th World Conference on Structural Control and Monitoring 2010*.
- [48] Mateu L., Moll F., *Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics*, [w:] *Proc. SPIE 5837, VLSI Circuits and Systems II*, 5837 2005, 359–373.
- [49] Lei W., *Vibration Energy Harvesting by Magnetostrictive Materials for Powering Wireless Sensors*, rozprawa doktorska, North Carolina State University, Raleigh, NC 2007.
- [50] Morton D.J., *Human locomotion and body form: a study of gravity and man*, The Williams & Wilkins Co., Baltimore 1952.
- [51] Starner T., *Human-powered wearable computing*, IBM Systems Journal, 35, 3.4, 1996, 618–629.

- [52] *Harvesting energy from humans*, Popular Science, 2009, <http://www.popsoci.com/environment/article/2009-01/harvesting-energy-humans>.
- [53] Highfield R., *Knee-brace gizmo to generate electricity*, Telegraph.co.uk, 2008, <http://www.telegraph.co.uk/science/science-news/3324635/Knee-brace-gizmo-to-generate-electricity.html>.
- [54] Starner T., Paradiso J.A., *Low-power Electronics Design*, rozdz. *Human generated power for mobile electronics*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004, 1–35.
- [55] Antaki J.F., Bertocci G.E., Green E.C., Nadeem A., Rintoul T., Kormos R.L., Griffith B.P., *A gait-powered autologous battery charging system for artificial organs*, ASAIO Journal, 41, 3, 1995, M588–M595.
- [56] Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., Gershenfeld N., *Parasitic power harvesting in shoes*, [w:] *Second International Symposium on Wearable Computers, 1998. Digest of Papers*, IEEE, Pittsburgh, Pennsylvania, 1998, 132–139.
- [57] Drake J., *The greatest shoe on earth*, Wired, 9, 02, 2001, <http://www.wired.com/wired/archive/9.02/baylis.html>.
- [58] Mickey Z., *TLC cooking "Get fit, stay green with Adam Boesel of Portland's Green Microgym (interview)"*, <http://recipes.howstuffworks.com/adam-boesel-of-the-green-microgym-portland-interview.htm> 2012.
- [59] Fildes J., *Knee dynamo taps 'people power'*, BBC, 2008, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/7226968.stm>.
- [60] *Sustainable dance floor*, http://www.sustainabledanceclub.com/products/sustainable_dance_floor/ 2011.
- [61] Rome L.C., Flynn L., Goldman E.M., Yoo T.D., *Generating electricity while walking with loads*, Science, 309, 5741, 2005, 1725–1728.
- [62] Granstrom J., Feenstra J., Sodano H.A., Farinholt K., *Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps*, Smart Materials and Structures, 16, 5, 2007, 1810.
- [63] *Energy harvesting work stations*, <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/energy-harvesting-work-stations-00004372.asp> 2012.
- [64] Toon J., *Nano-generators could power small electronic devices*, The Whistle, 2008, <http://www.whistle.gatech.edu/archives/08/feb/18/nanopower.shtml>.
- [65] *Energy harvesting from human power a roadmap to new research challenges*, http://eh-network.org/files/human_power.pdf 2011.
- [66] Silva N.M., Santos P.M., Ferreira J.A.F., Soares dos Santos M.P., Ramos A., Simões J.A.O., Reis M.J.C.S., Morais R., *Power management architecture for smart hip prostheses comprising multiple energy harvesting systems*, Sensors and Actuators A: Physical, 202, 2013, 183–192.
- [67] Zhang Y., Xiong P., Luo Y., Li L., *Design of remote home environment monitoring and health care monitoring system based on data confusion*, [w:] *2011 IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, IEEE, Chongqing, China, 2011, 35–39.
- [68] Chávez-Santiago R., Khaleghi A., Balasingham I., Ramstad T.A., *Architecture of an ultra wideband wireless body area network for medical applications*, [w:] *2nd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, Bratislava 2009, 1–6.

- [69] Yu B., Xu L., Li Y., *Bluetooth low energy (BLE) based mobile electrocardiogram monitoring system*, [w:] *2012 International Conference on Information and Automation (ICIA) 2012*, 763–767.
- [70] Stankovic J.A., Cao Q., Doan T., Fang L., He Z., Kiran R., Lin S., Son S., Stoleru R., Wood A., *Wireless sensor networks for in-home healthcare: Potential and challenges*, [w:] *High confidence medical device software and systems (HCMDSS) workshop 2005*, 2–3.
- [71] Hanson M.A., Powell H.C., Barth A.T., Ringgenberg K., Calhoun B.H., Aylor J.H., Lach J., *Body area sensor networks: Challenges and opportunities*, *Computer*, 42, 1, 2009, 58–65.
- [72] Chen H., Liu M., Hao W., Chen Y., Jia C., Zhang C., Wang Z., *Low-power circuits for the bidirectional wireless monitoring system of the orthopedic implants*, *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 3, 6, 2009, 437–443.
- [73] Guilar N., Chen A., Kleeburg T., Amirtharajah R., *Integrated solar energy harvesting and storage*, [w:] *Proceedings of the 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design, 2006. ISLPED '06 2006*, 20–24.
- [74] Manyika J., Chui M., Bughin J., Dobbs R., Bisson P., Marrs A., *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy*, rap. tech., McKinsey Global Institute 2013, http://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/Insights/%20and/%20pubs/MGI/Research/Technology/%20and/%20Innovation/Disruptive/%20technologies/MGI_Disruptive_technologies_Full_report_May2013.ashx.
- [75] Smith I.G. (red.), *The Internet of Things 2012 New Horizons*, CASAGRAS2: IERC, Halifax, UK 2012.
- [76] Allen J.J., Smits A.J., *Energy harvesting eel*, *Journal of Fluids and Structures*, 15, 3, 2001, 629–640.
- [77] Shenck N.S., Paradiso J.A., *Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics*, *IEEE Micro*, 21, 3, 2001, 30–42.
- [78] McKnight W.H., McGinnis W.C., *Energy-harvesting device using electrostrictive polymers*, US Patent 6,433,465 2002.
- [79] Taylor G.W., Burns J.R., Kammann S.A., Powers W.B., Welsh T.R., *The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator*, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26, 4, 2001, 539–547.
- [80] Ramsay M.J., Clark W.W., *Piezoelectric energy harvesting for bio-MEMS applications*, [w:] *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, International Society for Optics and Photonics, Newport Beach, CA, 2001, 429–438.
- [81] Ottman G.K., Hofmann H.F., Bhatt A.C., Lesieutre G.A., *Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17, 5, 2002, 669–676.
- [82] Litak G., Borowiec M., Friswell M.I., Adhikari S., *Energy harvesting in a magnetopiezoelastic system driven by random excitations with uniform and gaussian distributions*, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 49, 3, 2011, 757–764.

- [83] Kitio Kwuimy C.A., Litak G., Borowiec M., Nataraj C., *Performance of a piezoelectric energy harvester driven by air flow*, Applied Physics Letters, 100, 2, 2012, 024103–024103.
- [84] Litak G., Friswell M.I., Kwuimy C.A.K., Adhikari S., Borowiec M., *Energy harvesting by two magnetopiezoelectric oscillators with mistuning*, Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2, 4, 2012, 043009–043009.
- [85] Friswell M.I., Ali S.F., Bilgen O., Adhikari S., Lees A.W., Litak G., *Non-linear piezoelectric vibration energy harvesting from a vertical cantilever beam with tip mass*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 23, 13, 2012, 1505–1521.
- [86] Litak G.A., Manuel A., Toma D.M., Vinolo C., *Energy harvesting from sea waves*, [w:] *Workshop on “Nonlinear dynamics phenomena in mechanical, aerospace, and civil engineering”*, Politechnika Lubelska, CEMCST, Lublin 2012, 69–69.
- [87] Borowiec M., Litak G., Friswell M.I., Ali S.F., Adhikari S., Lees A.W., Bilgen O., *Energy harvesting in piezoelectric systems driven by random excitations*, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 13, 7, 2013, 1340006.
- [88] Borowiec M., Litak G., *Noise effected energy harvesting in a beam with stopper*, [w:] *New Advances in the Nonlinear Dynamics and Control of Composites for Smart Engineering Design: proceedings of the Euromech Colloquium*, Senigallia (Ancona), Italy 2013, 53–53.
- [89] Zylka P., *Current progress in ambient energy harvesting using piezoelectric materials and electroactive polymers*, Institute of Electrical Engineering Fundamentals, NN510, 2117, 2009, 33.
- [90] Harb A., *Energy harvesting: State-of-the-art*, Renewable Energy, 36, 10, 2011, 2641–2654.
- [91] Mech R., *Odzyskiwanie energii*, rap. tech., Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, raport na prawach rękopisu, materiał niepublikowany.
- [92] Murry E.J., *A unique system for transmission of ultrasonic energy over fibrous bundles*, Ultrasonics, 8, 3, 1970, 168–173.
- [93] Sherman M.L., Castellano T.M., *Ultrasound energy delivery system and method*, US patent 5,735,280, 1989.
- [94] Denisov A., Yeatman E., *Stepwise microactuators powered by ultrasonic transfer*, Procedia Engineering, 25, 2011, 685–688.
- [95] Ozeri S., Shmilovitz D., *Ultrasonic transcutaneous energy transfer for powering implanted devices*, Ultrasonics, 50, 6, 2010, 556–566.
- [96] Mazzilli F., Thoppay P.E., Praplan V., Dehollain C., *Ultrasound energy harvesting system for deep implanted-medical-devices (IMDs)*, [w:] *2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, IEEE, Seoul 2012, 2865–2868.
- [97] Shigeta Y., Yamamoto T., Fujimori K., Sanagi M., Nogi S., Tsukagoshi T., *Development of ultrasonic wireless power transmission system for implantable electronic devices*, [w:] *European Wireless Technology Conference*, IEEE, Rome 2009, 49–52.
- [98] Kim H.W., Batra A., Priya S., Uchino K., Markley D., Newnham R.E., Hofmann H.F., *Energy harvesting using a piezoelectric “cymbal” transducer in dynamic environment*, Japanese Journal of Applied Physics, 43, 2004, 6178.

- [99] Hu Y., Zhang X., Yang J., Jiang Q., *Transmitting electric energy through a metal wall by acoustic waves using piezoelectric transducers*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 50, 7, 2003, 773–781.
- [100] Ishiyama T., Kanai Y., Ohwaki J., Mino M., *Impact of a wireless power transmission system using an ultrasonic air transducer for low-power mobile applications*, [w:] *2003 IEEE Symposium on Ultrasonics*, 2, IEEE, Honolulu 2003, 1368–1371.
- [101] Li P., Wen Y., *Energy harvesting transducer by collecting electromagnetic energy based on ultrasonic horn*, [w:] *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, IEEE, Shandong, China, 2006, 550–555.
- [102] Roes M.G.L., Hendrix M.A.M., Duarte J.L., *Contactless energy transfer through air by means of ultrasound*, [w:] *Proceedings IECON 2011 – 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Melbourne 2011, 1238–1243.
- [103] Lomonova E., Roes M., Duarte J., Hendrix M., *Acoustic energy transfer: A review*, IEEE Industrial Electronics, 60, 2013, 242–248.
- [104] Kural A., Pullin R., Featherston C.A., Lees J., Naylon J., Paget C., Holford K.M., *Wireless power transmission using ultrasonic guided waves—electric circuit measurement and simulation*, Key Engineering Materials, 518, 2012, 445–454.
- [105] Kural A., Pullin R., Featherston C., Lees J., Naylon J., Paget C., Holford K., *Wireless electric power transmission using ultrasonic guided waves*, [w:] *Energy Harvesting 2012*, Cardiff University, London 2012, <http://eh-network.org/events/eh2012.php>.
- [106] Saulnier G.J., Scarton H.A., Gavens A.J., Shoudy D.A., Murphy T.L., Wetzel M., Bard S., Roa-Prada S., Das P., *P1g-4 through-wall communication of low-rate digital data using ultrasound*, [w:] *2006 IEEE Ultrasonics Symposium*, IEEE, Vancouver, Canada, 2006, 1385–1389.
- [107] Lawry T., *A high performance system for wireless transmission of power and data through solid metal enclosures*, rozprawa doktorska, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 2011.
- [108] Lawry T.J., Wilt K.R., Ashdown J.D., Scarton H.A., Saulnier G.J., *A high performance ultrasonic system for the simultaneous transmission of data and power through solid metal barriers*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 60, 1, 2013, 194–203.
- [109] Lawry T.J., Wilt K.R., Scarton H.A., Saulnier G.J., *Analytical modeling of a sandwiched plate piezoelectric transformer-based acoustic-electric transmission channel*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 59, 11, 2012, 2476–2486.
- [110] Sherrit S., Mukherjee B.K., *The use of complex material constants to model the dynamic response of piezoelectric materials*, [w:] *1998 IEEE Ultrasonics Symposium*, IEEE, 1998, 633–640.
- [111] Sherrit S., Badescu M., Bao X., Bar-Cohen Y., Chang Z., *Efficient electromechanical network model for wireless acoustic-electric feed-throughs*, [w:] *Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics 2005, 362–372.
- [112] Sherrit S., Doty B., Badescu M., Bao X., Bar-Cohen Y., Aldrich J., Chang Z., *Studies of acoustic-electric feed-throughs for power transmission through structures*,

- [w:] *Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics 2006, 617102–617102.
- [113] Sherrit S., *The physical acoustics of energy harvesting*, [w:] *IEEE Ultrasonics Symposium IUS 2008*, IEEE 2008, 1046–1055.
- [114] Sherrit S., Walkemeyer P., Bao X., Bar-Cohen Y., Badescu M., *Acoustic mechanical feedthroughs*, [w:] *Proc. SPIE 8692, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2013*, International Society for Optics and Photonics, San Diego, California, USA, 2013, 86920P–86920P.
- [115] Mirosławski M., *Stan prac z dziedziny Energy Harvesting w Laboratorium Dynamiki; stan wiedzy z dziedziny bezprzewodowego, ultradźwiękowego przesyłu energii na świecie*, rap. tech., Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, materiał niepublikowany.
- [116] Karcz M., *Budowa harvestera magnetomechanicznego z wykorzystaniem magnesu NdFeB i kompozytu o gigantycznej magnetostrykcji*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2010.
- [117] Kaleta J., Karcz M., Mech R., Wiewiórski P., *Charakterystyki magnetomechaniczne harvestera do odzysku energii z układów drgających*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania: materiały XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Bydgoszcz–Pieczyńska 2010, 57–58.
- [118] Rusak W., *Budowa generatora prądu (harvestera) z użyciem materiałów magnetycznych Smart, w celu odzysku energii z drgającej sprężyste płyty*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2011.
- [119] *Energy harvesting: Downloads*, <http://www.energyharvesting.pl/download.html> 2013.
- [120] Ghemari A., *The usage of selected methods of Energy Harvesting in mechanics; construction and applications*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2010.
- [121] Kaleta J., Wiewiórski P., *Rapid demagnetization of neodymium magnets, due to mechanical shock, as a pulse power supply for microprocessor system*, [w:] *4th International Conference on Integrity, Reliability & Failure*, Funchal 2013.
- [122] Kaleta J. and Wiewiórski P., *Generowanie energii elektrycznej z magnesów neodymowych w następstwie udaru mechanicznego. Energy harvesting*, [w:] *The 7th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures*, Augustów, Poland 2013.
- [123] Kaleta J., Kot K., Mech R., Wiewiórski P., *Dobór parametrów magnetomechanicznych dla efektywnego odzysku energii z drgań (energy harvesting)*, [w:] *XIV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce–Cedzyna 2013.
- [124] Królewicz M., *Analysis of principal thermal energy harvesting technologies. Green Kitchen. Energy efficiency, optimised resources use and process innovation of home appliances and their domotic integration*, rap. tech., Wrocław University of Technology, Institute of Materials Science and Applied Mechanics 2012, Marie Curie Project. IAPP. Grant agreement 251600.
- [125] *Energy harvesting*, <http://www.energyharvesting.pl/> 2013.
- [126] Bomba J., *Investigation of GMM actuator as a communications system. Topic: Communications system application of GMM 2006*, Na prawach rękopisu.

- [127] Bomba J., *Tłumienie w materiale o gigantycznej magnetostrykcji: eksperyment, modelowanie, identyfikacja*, Raporty Inst. Mater. PWr., 2009, ser. PRE, nr 2, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2010.
- [128] Panek M., *Raport z badań dotyczących tłumienia drgań konstrukcji mechanicznych oraz zagadnienia harvestingu na bazie rezonatora ultradźwiękowego*, rap. tech., Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2012.
- [129] Kaleta J., *Solid-state harvesters based on magnetic methods for selected mechanical applications*, [w:] *Energy Harvesting & Storage Europe*, Berlin, Germany 2012, <http://www.idtechex.com/users/filedownload.asp?documentid=7494>.
- [130] Kaleta J., Kot K., Rikitatt M., Wiewiórski P., *Multidof wireless sensor system based on IMU-MEMS technology supported by energy harvesting methods*, [w:] *4th International Conference on Integrity, Reliability & Failure*, Funchal 2013.
- [131] Kaleta J., Lewandowski D., Wiewiórski P., Mech R., Liberda M., *Power generating by high pulse mechanical stimulation of magnetic coupled NdFeB and Terfenol-D*, [w:] *Proc. SPIE 7644, Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2010*, International Society for Optics and Photonics, San Diego, California, 2010, 76440U–76440U.
- [132] Kaleta J., Kot K., Mech R., Wiewiórski P., *Ultrasonic energy harvesting system based on magneto- and electrostrictive actuators*, [w:] *The 7th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures: conference proceedings*, Augustów, Poland 2013, 133–137.
- [133] Kaleta J., Lewandowski D., Liberda M., Mech R.P., Wiewiórski P.K., *Energy harvester with high pulse mechanical stimulation*, [w:] *27th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics.*, Wrocław University of Technology, Wrocław 2010.
- [134] Bomba J., Kaleta J., *Sprawność przekształcania energii w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji*, [w:] *IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania 2003*, 47–54.
- [135] Bomba J.M., Kaleta J., *Przekształcanie energii w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji w następstwie cyklicznego obciążania*, [w:] *Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Bydgoszcz–Pieczyśka 2006, 23–26.
- [136] Mech R., *Badanie właściwości magnetomechanicznych kompozytów na bazie próbek z materiałów o gigantycznej magnetostrykcji*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2008.
- [137] Kaleta J., Kot K., Mech R., Wiewiórski P., *Zastosowanie efektu Villariego do oceny sprawności odzysku energii z drgań mechanicznych (energy harvesting)*, [w:] *XIV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce–Cedzyna 2013.
- [138] Kaleta J., Kot K., Mech R., Wiewiórski P., *Zastosowanie rdzeni magnetostrycyjnych do wytwarzania drgań i odzysku energii z drgań, w zakresie wybranych częstotliwości*, [w:] *XIV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce–Cedzyna 2013.
- [139] Lewandowski D., *Electric power and digital data interface through ultrasonic vibrations using magnetostrictive actuators and harvesters*, [w:] *Harvesting*

- Energy Harvesting & Storage Europe*, Berlin, Germany 2013, <http://www.idtechex.com/events/presentations/electric-power-and-digital-data-interface-through-ultrasonic-vibrations-using-magnetostrictive-actuators-and-harvesters-003861.asp>.
- [140] *Energy harvesting: Contact brochure*, http://www.energyharvesting.pl/images/energy_harvesting_7.png 2013.
- [141] Huggins C., *Key messages*, [w:] *ESP KTN IdTechEx conference 2012*, <https://connect.innovateuk.org/documents/2864009/3709276/IdTechEx+EH+conference+report+May+2012.pdf/ae39d45b-b82a-41f2-8c92-10cf74d00dcf;jsessionid=B77BA3056B3CDAD35F8F03B5C830B7FD.3>.
- [142] Lewandowski D., *Solid state magnetic phenomena harvesters and their power conditioners for low power applications*, [w:] *Harvesting & Storage Europe*, Berlin, Germany 2013.
- [143] Kaleta J., Wiewiórski P., *Magnetic field distribution detecting and computing methods for experimental mechanics*, *Engineering Transactions*, 58, 2012, 97–118.
- [144] Kaleta J., Wiewiórski P., Lewandowski D., *The advanced magnetovision system for Smart application*, [w:] *Proc. SPIE 7649, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2010*, International Society for Optics and Photonics, San Diego, California, 2010, 764920–764920.
- [145] Holt T.A., *Explosively-driven helical magneto-cumulative generators*, praca magisterska, Texas Tech University, Lubbock, TX 2002.
- [146] Lee J., Choi J.S., Ryu J.H., Kim C.H., *Maximizing the energy output of explosively-driven ferromagnetic generators*, *Electromagnetic Phenomena*, 3, 3, 2003, 11.
- [147] Kristiansen M., Worsey P., Freeman B., Stefani F., Giesselmann M., *Explosive-driven pulsed generation for directed-energy munitions*, rap. tech., Texas Tech University, Lubbock, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Lubbock, TX, 2003.
- [148] Talantsev E.F., Shkuratov S.I., Baird J., Altgilbers L.L., Stults A.H., *Analytical model for explosive-driven ultracompact shock-wave ferromagnetic generators*, [w:] *16th IEEE International Pulsed Power Conference*, 2, IEEE, Albuquerque, New Mexico, 2007, 1137–1140.
- [149] Shkuratov S.I., Talantsev E.F., Baird J., Altgilbers L.L., Stults A.H., *Explosive-driven mini-system based on shock wave ferromagnetic seed source and loop magnetic flux compression generator*, [w:] *16th IEEE International Pulsed Power Conference*, 2, IEEE, Albuquerque, New Mexico, 2007, 1141–1145.
- [150] Ozaki O., Kiyoshi T., Matsumoto S., Wada H., et al., *Ferro-magnetic force field generator*, US Patent 7,286,033, 2007.
- [151] Błażejowski W., Czulak A., Gašior P., Kaleta J., Mech R., *Smart composite high pressure vessels with integrated optical fiber sensors*, [w:] *Proc. SPIE 7647, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*, 7647 2010, 764712–1.
- [152] Gašior P.P., Błażejowski W., Kaleta J., *Smart fibre optic methods for structural health monitoring of high pressure vessels for hydrogen storage*, [w:] *18th World*

- Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC 2010*, Essen 2010, 309–314, http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/4195/1/SII_pp_Gas_Gasior.pdf.
- [153] Gašior P., Kaleta J., Sankowska A., *Optical fiber sensors in health monitoring of composite high-pressure vessels for hydrogen*, [w:] *Optical Metrology*, International Society for Optics and Photonics 2007, 66163G–66163G.
- [154] Błażejowski W., Gašior P.P., Kaleta J., Rybaczuk M., *The IV generation vessels for hydrogen storage applied in vehicles: modelling, technology and experiment*, Bulletin of Polish Hydrogen and Fuel Cell Association, 6, 2011, 82–89, 3rd Polish Forum Smart Materials for Hydrogen and Renewable Energy, Warsaw, 29–30 November 2011.
- [155] Błażejowski W., Gašior P.P., Kaleta J., *Advances in Composite Materials – Ecodesign and Analysis*, rozdz. *Application of optical fibre sensors to measuring the mechanical properties of composite materials and structures*, InTech 2011, 221–246, <http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-ecodesign-and-analysis/application-of-optical-fibre-sensors-to-measuring-the-mechanical-properties-of-composite-materials-a>.
- [156] Rusak W., *Opracowanie systemu aktywnego tłumienia drgań wybranego układu mechanicznego*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2011.
- [157] Bar-Cohen Y., Sherrit S., Lih S.S., *Characterization of the electromechanical properties of EAP materials*, [w:] *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, International Society for Optics and Photonics 2001, 319–327.
- [158] Bar-Cohen Y., *Transition of EAP material from novelty to practical applications: are we there yet?*, [w:] *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, International Society for Optics and Photonics 2001, 1–6.
- [159] Otake M., *Electroactive Polymer Gel Robots: Modelling and Control of Artificial Muscles*, Springer 2010.
- [160] Kaleta J., Kot K., Niemiec K., Wiewiórski P.K., *Zastosowanie aktuatorów z polimeru elektroaktywnego (PolyPower) do budowy 3-segmentowego adaptronicznego analogu układów kręgów ssaka*, [w:] *VII-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures, conference proceedings*, Augustów 2013, 139–142.
- [161] Baginsky I.L., Kostsov E.G., *High Energy Density Capacitance Microgenerators*, InTech 2012.
- [162] Boisseau S., Despesse G., Seddik B.A., *Electrostatic conversion for vibration energy harvesting*, arXiv preprint arXiv:1210.5191, 2012.
- [163] *Danfoss*, <http://www.polypower.com/> 2012.
- [164] Kaleta J., Królewicz M., Niemiec K., Wiewiórski P.K., *Efekty krzyżowe w wysokonapięciowych membranach polimerowych o zadanej strukturze*, [w:] *VII-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures, conference proceedings*, Augustów 2013, 147–150.
- [165] Błachut A., *Badanie własności elektromechanicznych polimeru elektroaktywnego typu dielektrycznego PolyPower*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 2013.

Smart magnetic materials. Structure, manufacturing, testing properties, application

Materials from the Smart Materials (SM)⁴ group form a large group of new construction materials. The phenomenon of Smart materials is based on the fact that their main useful features, expressed as magnitude of one physical field (e.g. mechanical field), depend on the magnitude of another field (e.g. magnetic, electric or temperature field). Therefore, during the description and application of these materials cross effects have a crucial meaning. Depending on type of the Smart material, different effects may play the key role, as follows: magnetomechanical, electromechanical, magnetothermal, etc. Thanks to their particular features these materials enable construction of the systems with adaptive properties (Smart Structures) that have not been possible to obtain with the use of conventional materials.

A significant group of SM are materials whose main application features can be stimulated by magnetic field (Smart Magnetic Materials – SMM). The following materials should be mentioned as representatives of the group: magnetorheological, giant magnetostriction and giant magnetoresistance, magnetocaloric, magnetically activated shape memory and other materials. It means that the diverse properties of SMM – such as viscosity, shape, stiffness, temperature, electric resistance, colour – can be modified with the use of magnetic stimulation.

Today it can be assumed that the rate of dissemination of the Smart materials is one of the measures of innovation of the national and regional economy. Production of the Smart materials also stimulates the development of fundamental research in the area of various cross effects. Current and forecast applications of the SMM have a great commercial and military significance. “Intelligent” vibration damping of such stationary constructions as buildings, bridges, pipelines, electrical grids can be mentioned as an example. Another very important area of the SMM

⁴ During last years it has been attempted to find polish equivalent for the term “Smart Materials”. Suggestions of use of such terms as “materiały sprytne” (clever materials), “materiały cwane” (shifty materials), “materiały adaptacyjne” (adaptive materials) so far have not get acceptance from the scientific community. Attempt to introduce the term “materiały inteligentne” (intelligent materials) rises doubts as to the precision of the term. Although adaptive materials is the most appropriate according to the author, he has decided to use term Smart.

applications is transportation (automotive, train, aeroplane). Number of medical applications is growing and the examples are intelligent prosthetics, telemedicine, new methods for cancer treatment and magnetic markers for drug delivery. Very promising are the SMM materials for securing information transferred via wire. Among the examples, a development of the new non-destructive test methods such as magnetovision should also be mentioned. In the last few years great interest is caused by the application of SMM in Energy Harvesting (EH) from common sources (the so-called background energy sources) that are usually unwelcome and are being damped. EH can be used as power supply for the sensors and measurement systems used for permanent diagnostics of constructions – Structural Health Monitoring (SHM).

the mentioned assets of SMM altogether are the reason for the intensified research in many scientific institutes and industrial centres.

Smart Magnetic Materials can be categorized according to several criteria. One of the possible classifications differentiates the following types of SMM:

- Materials with variable internal structure:
 - MagnetoRheological Fluids – MRF,
 - Ferrofluids – FRF,
 - porous materials filled with magnetorheological fluids – Magnetorheological Composites (MRC),
 - gels (lubricants) filled with ferromagnetic powders,
 - fluids with powders of magnetocaloric materials.
- Materials with continuous internal structure:
 - Solid magnetostrictive materials, including those with the so called Giant Magnetostriction – Giant Magnetostrictive Materials (GMM),
 - elastomers filled with ferromagnetic powders (e.g. carbonyl iron, GMM or their mixture),
 - polymers based on the epoxy resins, containing powdered ferromagnetic materials,
 - solid and powdered magnetocaloric materials.

In this monograph selected SMM and their applications are discussed, including:

- composites based on a porous matrix filled with magnetorheological fluid – Magnetorheological Composites (MRC),
- Giant Magnetostrictive Materials (GMM),
- composites filled with powdered giant magnetostrictive materials – Giant Magnetostrictive Materials composites (GMMc),
- MagnetoCaloric Materials (MCM),
- MagnetoRheological Elastomers (MRE) also known as Magneto-Active Elastomers (MAE),

- magnetovision,
- Energy Harvesting from the environment, mainly from vibrations and mechanical shocks.

In each presented example the manufacturing technology is described as well as the method of stimulation by magnetic field, methodology of testing and identification of parameters and exemplary applications. Each chapter is enriched with literature review and with results of author's own experimental research.

In the second chapter (Composites based on the magnetorheological fluids) it is presented that shaping of the external dimensions of the material can be obtained also by filling the porous structure with fluid (MRF). The carrier matrix can be made of a sponge, fabric, felt or any other porous elastic material. By saturating the matrix material one can obtain a material which, like fluid (MRF), is characterized by the dependence of its mechanical parameters on magnetic field. The growing interest in these materials and attempts of their wide application, especially in the area of active damping, leads to their more precise studying and description. Because of the complex structure of the matrix and the filling material, it was decided that such material should be referred to as Magnetorheological Composite (abbreviated as MRC), which is used further in the paper. The method for production of the magnetorheological fluid for MRC is described, including the discussion of the influence of additives and examination of the sedimentation process. Next, a magnetorheological composite is manufactured based on a matrix made of elastic porous materials (polyurethane sponges) and a magnetorheological fluid. Analysis of the MRC properties is performed under cyclic and shock loading. Author's own test stands and testing procedures are presented.

In the third chapter (Terfenol-D as a material with giant magnetostriction) the materials exhibiting the so-called giant magnetostriction are presented; it is shown that the key role of GMM in many areas results from their ability to convert magnetic energy into mechanical energy (work as an actuator) and mechanical energy into magnetic energy (work as a sensor) with high efficiency. It enables various applications in aerospace, automotive, naval and building constructions as well as effective applications in medicine, mining industry, acoustic apparatus and many more. GMM can be used as active vibration dampers that do not absorb energy (like magnetorheological materials), but are used to produce "counter" vibrations that will suppress the emission of a source. These materials also play important role in the area of Energy Harvesting (EH) from vibrations, which is discussed in the eighth chapter. The tested material was Terfenol-D. A necessary condition for effective application of GMM in adaptive systems is identification of the materials' reaction to various physical fields. That is why modelling of the giant magnetostriction effect, including eddy currents,

and their identification, played the key role. Author's own research on Terfenol-D covered various aspects. Chemical composition was determined, microstructure was investigated and measurements of the following parameters were performed: magnetization, resonance frequency, magnetostriction under static and cyclic loading; the Villari effect was also investigated. The test stands in form of the laboratory magnetostriction actuators and the model of the magnetostriction actuator, including the influence of eddy currents, were prepared. Moreover, the examples of application of Terfenol-D in construction of dampers and actuators were proposed and usefulness of these systems was proven in mechanical constructions.

In the fourth chapter (Composites based on the Terfenol-D) presents that the previously described solid Terfenol-D, despite its advantages (large saturation magnetostriction, good dynamical properties) has some disadvantages that limit its applicability. Eddy currents induced by the magnetic field reduce the range of effective work of these materials to the frequencies in the range of a few kilohertz. Another important disadvantage of the solid Terfenol-D is its brittleness and very low ultimate tensile strength as well as its price.

It has justified the need to develop a new group of materials - GMM composites. In these materials a resin filled with magnetostrictive material in the form of powder, rods or flakes is usually selected as a matrix. The resin binder creates electrically non-conductive layer between particles that significantly reduces the area in which the eddy currents are induced. It has simplified application of the composite to work at frequencies much higher than those of the solid material. Additional advantage of the composites is their ultimate tensile strength and the easiness of forming them into any shapes. Authors own experimental research was aimed at: development of the manufacturing procedure for the chosen type of magnetostrictive composites based on the Terfenol-D powders, manufacture of the composite test samples with various polarization and various content volume of Terfenol-D in the matrix, construction of the test stand and development of the testing methodology, development of the technology and manufacturing samples containing different additives (except for the Terfenol-D powder), performing the magnetostriction tests, investigation of magnetic properties and pointing out the potential areas of application.

In the fifth chapter (Magnetocaloric effect) experimental testing of the chosen magnetocaloric material that changes its temperature under cyclic change of the magnetic field is presented. Gadolinium is the object of the study – the material is attractive for the manufacturers of cooling devices thanks to its Curie temperature (T_c) close to the room temperature and a relatively large change in temperature and magnetic entropy. At the same time it is a reference material that is used for comparison in research on the effect with the use of more advanced alloys

exhibiting this effect. The source of the magnetic field are permanent magnets (in form of the so-called Halbach array) that do not need any external power supply or cooling system; their disadvantage is limited value of the generated magnetic field (maximum of 2 T). The goal of the author's own research was to construct a cooling system demonstrator which would allow testing of other materials. To obtain that goal following assumptions concerning the construction and working principles of the demonstrator are made: work cycle – AMR (*Active Magnetic Regenerator*), method for placement of the magnetocaloric material into magnetic field is realized mechanically by a cyclic reciprocating motion. Three types of demonstrators are discussed and the experimental results from the use of one of them are presented.

In the sixth chapter (Magnetorheological elastomers) studies on composites with elastomer matrix, the so-called magnetorheological elastomers (also known as magnetoactive elastomers) are discussed. Stimulation with external magnetic field causes nonlinear and reversible change of several of its characteristics (e.g. viscosity, stiffness) at the same time.

When designing magnetorheological elastomers, the goal is to obtain maximum change of the properties under magnetic field stimulation. Unlike MR fluids which work above the yield point, typical working range of magnetorheological elastomers is below this point. Therefore it can be sad that as far as application is concerned, those materials do not compete but complement each other.

Magnetorheological elastomers are composed of two elements: non-magnetic, polymer matrix and magnetically active particles distributed within it. Thanks to the cross-linked structure of the matrix particles of the magnetic filler are not able to move freely inside it. Therefore, the effect of sedimentation does not take place. Because of the restricted movement of the particles, the response of the material to the application of magnetic field (magnetorheological effect) can be faster than in MR fluids, even below 10 milliseconds.

A thermoplastic elastomer is used for the studies which can be repeatedly thermally processed. The filling of the matrix material are soft ferromagnetic particles (including carbonyl iron used in MR fluids). Both shape and size of the magnetically active components have a significant influence on the performance of the composite. An important parameter influencing the magnetorheological effect noticeable in the elastomer is particle volume concentration in the matrix.

Following objectives of the study are decided: manufacturing of the magnetorheological composites based on solid matrices with the use of thermoplastic elastomers, development of the testing procedure and estimation of the influence of magnetic field, production of series of magnetorheological elastomer samples for various compositions and internal structures, investigation of the arrangement

of the structure of magnetorheological elastomers and of the influence of the plasticizing additives. Furthermore, the issues concerning the modelling of the cross effect and application of the elastomers were discussed.

In the seventh chapter (Magnetovision) describes a study that led to the development of the unique non-destructive test method named magnetovision (similarly to, for example, the term “thermovision” used for measurements of the thermal fields). Construction and measuring capabilities of the magnetovision systems are presented – these systems are the newest generations of the various magnetic field scanners with useful features allowing user to obtain fast visualization of the magnetic field around various flat and cylindrical objects. Several types of heads, cameras and scanners, based on measurement systems containing passive magnetoresistive sensors or using e.g. the Hall effect, were constructed. Furthermore, a methodology for examining magnetic fields with the use of the mentioned devices was developed. It is shown that the system for magnetic field measurement can be used either as an autonomous system or as a system coupled (also by joint control) with e.g. a typical testing machine for static and cyclic investigations. The main application goal is mastering the measurement, with the use of an adequate sensor, of very small magnetic fields (comparable to the Earth’s magnetic field) that are present around loaded (deformed) ferromagnetic elements. The following areas of application are considered particularly promising: examination of magnetomechanical phenomena and identification of their models, localization of the deformation fields and the areas of plastic strains, detection of the nonlinearities in a structure (e.g. inclusions, textures, micro cracks, phase identification), identification of the loading history of a material and examining kinetics of the phase transformations (e.g. athermal martensitic transformation, investigation of the shape memory alloys). Moreover, the usefulness of magnetovision for testing in the following areas was shown: sheet metal forming process, heterogeneity of magnetization, magnetic printing effects. Also, the usability of this measuring method for the study of Smart magnetic materials and harvesters is shown.

In the eighth chapter (Energy Harvesting) results obtained in the area of Energy Harvesting (further mentioned as EH), also known in the literature as a power harvesting or energy scavenging, are presented. EH is a set of methods which make it possible to acquire electrical power from surrounding sources such as: mechanical, thermal, solar and electromagnetic energy, salinity gradients, etc. In general the idea is to use common sources in our surroundings (the so-called background energy) that are unwelcome and usually damped (e.g. noise, mechanical shocks and vibrations of devices and constructions, electromagnetic smog, heat generated as a result of friction and combustion, electrical power

transfer and cooling of engines, etc.) or easily available (sunlight, wave energy, differences in salinity, biochemical processes, e.g. in plants) or related to the human biology (movement, body heat, etc.). Nowadays it is considered that EH can be an effective source of “no-cost” power (after subtracting installation costs) for low-power devices (e.g. electronics, sensor systems, etc.). Hence an increasing interest in commercial and military applications. It is assumed that in the future vast harvester systems will also be a source of high-power electrical energy. Leading economies and research centres spend significant resources on fundamental and applied research in the area of EH. This trend will continue for many years; the forecasts in this area are unequivocal. It is estimated that in the year 2011 the harvester market was worth 700 million dollars and in the year 2021 it will rise to more than 4 billion dollars. For example, it is estimated that (in the year 2011) 1.6 millions of harvesters were applied in the systems of wireless sensors and commercial electronic devices only. It should be highlighted that in this area the Polish science and economy diverge from the main trends. The broad scope of the subject requires imposing restrictions. Therefore, magnetostrictive harvesters using GMM materials are considered to be the most crucial. Thanks to their use of them it is possible to obtain systems capable of acquiring energy from vibrations and sources that have not been utilized before, such as mechanical shock. Large group of own constructed harvesters and results of the experiments conducted on them are presented. Moreover, the results related to the energy and information transfer with the use of ultrasounds are described.

In the monograph the results obtained by the team led by the author are presented. They are obtained thanks to the realisation of grants, including those financed by national and European sources. The following projects should be mentioned:

- Villari Effect in the process of fatigue of the ferrite-pearlite steel, research project KBN, 1992–1994.
- Accumulation of the energy in defects during fatigue process and quantitative measures of fatigue process, research project KBN, 1995–1998.
- Non-destructive diagnostics of fatigue loaded ferromagnetics, research project KBN, 1999–2002.
- Cyclic Plasticity Induced Martensitic Transformation, Siegen University – Wrocław University of Technology, research project, bilateral polish-german project, 1999–2001.
- Description of the properties of the material undergoing martensitic transformation induced by plastic deformation in the range of various length scales, research project KBN, 2001–2004.

- Designing, manufacturing, structure, properties and applications of intelligent metallic materials and polymers, sub-project: Designing – manufacturing – structure – properties – application of the magnetorheological and magnetostrictive materials, commissioned project, KBN, 2006–2008.
- Green Kitchen; 7th Framework Program, “People”, Program: Marie Curie Actions “Industry-Academia Partnerships and Pathways” (IAPP), 2010–2012.
- Nanocomposites and Smart materials. Sub-project: Magnetic materials from the Smart group. Project realized as part of the contract between Wrocław University of Technology and Wrocław Research Center EIT+ (financing: structural founding), 2010–2014.

Part of the results have been obtained as part of the internal projects related to the realization of the PhD theses and the research financed from the statutory funds of the Institute of Materials Science and Applied Mechanics of Wrocław University of Technology.

The author would like to acknowledge the employees, PhD students and graduate students of the Continuum Mechanics Division in the Institute of Materials Science and Applied Mechanics of Wrocław University of Technology as well as the scientific partners from other national and foreign research centres, whose assistance was essential in realization of the research in the area of Smart magnetic materials and made it possible to prepare this monograph. The author also acknowledges the reviewers of this monograph.