



Politechnika Wroclawska

WŁAŚCIWOŚCI TŁUMIĄCE ELASTOMERÓW  
MAGNETOREOLOGICZNYCH.  
BADANIA, MODELE, IDENTYFIKACJA.

mgr inż. Piotr Zając

promotor:

dr hab. inż. JERZY KALETA, prof. nadzw. PWr.

promotor pomocniczy:

dr inż. DANIEL LEWANDOWSKI

Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej

Wrocław 2014



## Streszczenie

Celem jaki przyjęto w pracy była identyfikacja właściwości magnetomechanicznych wybranej klasy kompozytów magnetoreologicznych w warunkach cyklicznego ścinania. Do badań wybrano kompozyt z matrycą elastomerową wypełnioną cząstkami żelaza. Ze względu na rodzaj matrycy materiały z tej grupy nazywane są elastomerami magnetoreologicznymi.

Do badań wstępnych wybrano dwie różne matryce: silikonową oraz wykonaną z polimeru termoplastycznego. Wypełnienie stanowiły cząstki żelaza o wymiarach od  $3\ \mu m$  do  $150\ \mu m$ . Opracowano technologię wytwarzania kompozytów oraz zbudowano stanowisko testowe do badania właściwości magnetomechanicznych próbek wytworzonych materiałów.

Wytworzone próbki prostopadłościennne poddawano cyklicznemu odkształcaniu w polu magnetycznym o różnych wartościach natężenia. Po serii badań selekcyjnych wybrano materiał wykazujący największe zmiany pod wpływem działania pola magnetycznego jednocześnie wykazujący optymalne parametry mechaniczne umożliwiające ewentualne zastosowanie opracowanego materiału w aplikacjach przemysłowych.

Do szczegółowych badań wybrano kompozyt z matrycą wykonaną z polimeru termoplastycznego, będącego mieszaniną kopolimeru blokowego SEBS z dodatkiem polipropylenu i oleju parafinowego. Jego wypełnienie stanowiły cząstki żelaza o wielkościach do  $60\ \mu m$ . Próbki wytworzonego materiału badano w warunkach ścinania dla różnych wartości amplitudy oraz częstotliwości wymuszania przy różnych wartościach natężenia zewnętrznego pola magnetycznego.

W kolejnym etapie pracy zaproponowano model matematyczny opisujący zachowanie badanego materiału. W pierwszej kolejności podjęto próbę zamodelowania właściwości magnetomechanicznych za pomocą modelu Kelvina-Voigta, który jednak okazał się niewystarczający do opisu tego typu materiału. W kolejnym kroku zaproponowano model sprężysto-lepkoplastycznego z kinematycznym wzmocnieniem, który w zdecydowanie lepszym stopniu odzwierciedla zachowanie badanego materiału w polu magnetycznym.

# Spis treści

|   |           |
|---|-----------|
| Contents . . . . .  | 5         |
| <b>1. Wprowadzenie . . . . .</b>  | <b>9</b>  |
| 1.1. Materiały SMART . . . . .  | 9         |
| 1.2. Materiały magnetoreologiczne . . . . .   | 9         |
| 1.3. Cel pracy i działania o znaczeniu kluczowym . . . . .  | 10        |
| <b>I. Materiały magnetoreologiczne - przegląd literatury</b>  |           |
| <b>2. Klasyfikacja materiałów magnetoreologicznych . . . . .</b>                                    | <b>12</b> |
| 2.1. Ciecze magnetoreologiczne . . . . .  | 12        |
| 2.2. Ciecze ferro i ferrożele . . . . .   | 16        |
| 2.3. Żele magnetoreologiczne i magnetostrykcyjne . . . . .  | 18        |
| 2.4. Kompozyty magnetoreologiczne z porowatą matrycą wypełnioną ciecżą magnetoreologiczną . . . . . | 19        |
| <b>3. Elastomery magnetoreologiczne . . . . .</b>   | <b>21</b> |
| 3.1. Budowa i zasada działania elastomerów magnetoreologicznych . . . . .                           | 21        |
| 3.2. Technologia wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych . . . . .                             | 32        |
| 3.3. Badania elastomerów magnetoreologicznych . . . . .   | 34        |
| 3.3.1. Badania elastomerów magnetoreologicznych w warunkach ścinania . . . . .                      | 35        |
| 3.3.2. Badania elastomerów magnetoreologicznych w warunkach ściskania . . . . .                     | 38        |
| 3.3.3. Badania elastomerów magnetoreologicznych w warunkach rozciągania . . . . .                   | 42        |
| 3.3.4. Badanie dynamicznych efektów czasowych w elastomerach magnetoreologicznych . . . . .         | 43        |
| 3.3.5. Inne badania elastomerów magnetoreologicznych . . . . .                                      | 43        |
| 3.4. Zastosowania elastomerów magnetoreologicznych . . . . .  | 46        |
| 3.5. Modele matematyczne elastomerów magnetoreologicznych . . . . .                                 | 56        |
| <b>II. Wytworzenie i badania elastomerów magnetoreologicznych</b>                                   |           |
| <b>4. Elastomery magnetoreologiczne - badania wstępne . . . . .</b>                                 | <b>65</b> |
| 4.1. Elastomery magnetoreologiczne z matrycą silikonową . . . . .                                   | 65        |
| 4.2. Elastomery magnetoreologiczne z matrycą termoplastyczną . . . . .                              | 69        |
| 4.2.1. Wytworzenie próbek elastomeru magnetoreologicznego . . . . .                                 | 69        |
| 4.2.1.1. Dobór materiału matrycy . . . . .  | 69        |
| 4.2.1.2. Wypełnienie ferromagnetyczne - cząstki żelaza z firmy Höganäs AB . . . . .                 | 71        |
| 4.2.1.3. Wypełnienie ferromagnetyczne - żelazo karbonylkowe z firmy BASF AG . . . . .               | 73        |
| 4.2.1.4. Skład materiału na próbki . . . . .  | 73        |



|  |   |            |
|--|---|------------|
| 4.2.1.5.   | Technologia wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych . . . . .  | 74         |
| 4.2.1.6.   | Przygotowanie próbek do badań cyklicznych . . . . .   | 76         |
| 4.2.2.   | Stanowisko badawcze . . . . .   | 79         |
| 4.2.3.   | Procedura badawcza . . . . .  | 81         |
| 4.2.4.   | Wpływ wypełnienia na właściwości elastomeru MR . . . . .  | 85         |
| 4.2.5.   | Badania cykliczne elastomerów magnetoreologicznych . . . . .  | 86         |
| <b>5.</b>  | <b>Elastomer magnetoreologiczny - badania wybranego typu . . . . .</b>  | <b>90</b>  |
| 5.1.   | Procedura wykonywania elastomerów typu Ed . . . . .   | 90         |
| 5.1.1.   | Badania mikroskopowe struktury wewnętrznej . . . . .  | 93         |
| 5.1.2.   | Badania właściwości magnetomechanicznych . . . . .  | 95         |
| 5.1.3.   | Szczegółowa analiza wybranego materiału - wytrzymałość na rozrywanie . . . . .  | 98         |
| <b>III. Modelowanie właściwości magnetoreologicznych</b> |   |            |
| <b>6.</b>  | <b>Weryfikacja modelu . . . . .</b>   | <b>101</b> |
| 6.1.   | Model Kelvina-Voigta . . . . .  | 102        |
| 6.1.1.   | Podstawowe zależności . . . . .   | 102        |
| 6.1.2.   | Moduł moduł zachowawczy $G'$ i moduł stratności $G''$ . . . . .   | 103        |
| 6.2.   | Wpływ amplitudy odkształcenia na parametry modelu . . . . .   | 105        |
| 6.2.1.   | Identyfikacja parametrów modelu - Test-1 . . . . .  | 106        |
| 6.3.   | Wpływ pola magnetycznego na parametry modelu . . . . .  | 109        |
| 6.3.1.   | Identyfikacja parametrów modelu - Test-2 . . . . .  | 112        |
| 6.4.   | Wpływ częstotliwości wymuszenia na parametry modelu . . . . .   | 112        |
| 6.4.1.   | Identyfikacja parametrów modelu - Test-3 . . . . .  | 112        |
| 6.5.   | Porównanie otrzymanych wyników z wynikami z literatury przedmiotu . . . . .   | 115        |
| 6.6.   | Podsumowanie . . . . .  | 118        |
| <b>7.</b>  | <b>Analiza możliwości opisu materiału za pomocą modelu sprężysto-plastycznego . . . . .</b>                                   | <b>121</b> |
| 7.1.   | Model sprężysto-lepkoplastyczny . . . . .   | 121        |
| 7.2.   | Model sprężysto-plastyczny z kinematycznym wzmocnieniem liniowym . . . . .  | 123        |
| 7.2.1.   | Procedura identyfikacji parametrów $G_1$ i $\tau_{o2}$ . . . . .  | 123        |
| 7.2.2.   | Procedura identyfikacji parametru $G_2$ . . . . .   | 125        |
| 7.2.3.   | Wyniki identyfikacji dla różnych amplitud odkształcenia przy stałej częstotliwości. . . . .                                   | 126        |
| 7.2.4.   | Wyniki identyfikacji dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego. Wpływ częstotliwości na wyniki identyfikacji. . . . . | 128        |
| <b>8.</b>  | <b>Wnioski i uwagi końcowe . . . . .</b>  | <b>135</b> |
| <b>9.</b>  | <b>Proponowane kierunki dalszych badań . . . . .</b>  | <b>138</b> |
|  | <b>Bibliografia . . . . .</b>   | <b>139</b> |
|  | <b>Summary . . . . .</b>  | <b>149</b> |
|  | <b>List of figures . . . . .</b>  | <b>150</b> |
|  | <b>List of tables . . . . .</b>   | <b>155</b> |
|  | <b>Podziękowania . . . . .</b>  | <b>156</b> |

# Contents

|  |    |
|--|----|
| <b>Contents</b> . . . . .  | 5  |
| <b>1 Introduction</b> . . . . .  | 9  |
| 1.1 SMART Materials . . . . .  | 9  |
| 1.2 Magnetorheological Materials . . . . .   | 9  |
| 1.3 Aim of the work and crucial activities . . . . .   | 10 |
| <b>I Magnetorheological Materials</b>  |    |
| <b>2 Classification of Magnetorheological Materials</b> . . . . .                                      | 12 |
| 2.1 Magnetorheological Fluids . . . . .  | 12 |
| 2.2 Ferrofluids . . . . .  | 16 |
| 2.3 Magnetorheological and Magnetostrictive Gels . . . . .   | 18 |
| 2.4 Magnetorheological Composites with Porous Matrix filled with<br>Magnetorheological Fluid . . . . . | 19 |
| <b>3 Magnetorheological Elastomers</b> . . . . .   | 21 |
| 3.1 Structure of Magnetorheological Elastomers . . . . .   | 21 |
| 3.2 Manufacturing of Magnetorheological Elastomers . . . . .   | 32 |
| 3.3 Investigation of Magnetorheological Elastomers . . . . .   | 34 |
| 3.3.1 Shearing of Magnetorheological Elastomers . . . . .  | 35 |
| 3.3.2 Compressing of Magnetorheological Elastomers . . . . .   | 38 |
| 3.3.3 Stretching of Magnetorheological Elastomers . . . . .  | 42 |
| 3.3.4 Dynamic time effects in Magnetorheological Elastomers . . . . .                                  | 43 |
| 3.3.5 Other types of Magnetorheological Elastomers investigation . . . . .                             | 43 |
| 3.4 Applications of Magnetorheological Elastomers . . . . .  | 46 |
| 3.5 Mathematical Models of Magnetorheological Elastomers . . . . .                                     | 56 |
| <b>II Manufacturing and investigation of Magnetorheological<br/>Elastomers</b>                         |    |
| <b>4 Investigation of Magnetorheological Elastomers</b> . . . . .                                      | 65 |
| 4.1 Basic Research - Magnetorheological Elastomers with Silicon Matrix                                 | 65 |
| 4.2 Magnetorheological Elastomers with Thermoplastic Matrix . . . . .                                  | 69 |
| 4.2.1 Manufacturing of Magnetorheological Elastomers . . . . .   | 69 |
| 4.2.1.1 Material selection for Magnetorheological Elastomer matrix                                     | 69 |
| 4.2.1.2 Ferromagnetic particles from <i>Höganäs</i> AB . . . . .                                       | 71 |
| 4.2.1.3 Ferromagnetic particles - carbonyl iron from BASF AG . . . . .                                 | 73 |
| 4.2.1.4 Specimens compositions . . . . .   | 73 |
| 4.2.1.5 Technology of Magnetorheological Elastomers manufacturing                                      | 74 |
| 4.2.1.6 Preparing specimens for cyclic tests . . . . .   | 76 |
| 4.2.2 The test stand . . . . .   | 79 |
| 4.2.3 Investigation procedure . . . . .  | 81 |
| 4.2.4 Influence of the filler on MRE properties . . . . .  | 85 |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 4.2.5  | Cyclic loading of MRE . . . . .  | 86         |
| <b>5</b>   | <b>Investigating properies of selected MRE type . . . . .</b>  | <b>90</b>  |
| 5.1  | Manufacturing Ed type of MRE . . . . .   | 90         |
| 5.1.1  | Microscopic investigation of internal structure . . . . .  | 93         |
| 5.1.2  | Detailed analysis of selected type of material - cyclic properties . .   | 95         |
| 5.1.3  | Detailed analysis of selected type of material - shear strength . . .  | 98         |
| <br>   |  |            |
| <b>III Mathematical modeling of material magnetorheological properties</b> |  |            |
| <b>6</b>   | <b>Model verification . . . . .</b>  | <b>101</b> |
| 6.1  | Kelvin-Voigt model . . . . .   | 102        |
| 6.1.1  | Basic relations . . . . .  | 102        |
| 6.1.2  | Storage modulus $G'$ and loss modulus $G''$ . . . . .  | 103        |
| 6.2  | Influence of strain amplitude on model parameters . . . . .  | 105        |
| 6.2.1  | Model parameters identification - Test-1 . . . . .   | 106        |
| 6.3  | Influence of magnetic field on model parameters . . . . .  | 109        |
| 6.3.1  | Model parameters identification - Test-2. . . . .  | 112        |
| 6.4  | Influence of frequency on model parameters . . . . .   | 112        |
| 6.4.1  | Model parameters identification - Test-3 . . . . .   | 112        |
| 6.5.0  | Obtained results versus results from the literture . . . . .   | 115        |
| 6.6  | Summary . . . . .  | 118        |
| <b>7</b>   | <b>Analysis of the possibility of material descritpion with the elastic-plastic model . . . . .</b>                            | <b>121</b> |
| 7.1  | Elastic-viscoplastic model . . . . .   | 121        |
| 7.2.0.0  | The elastic-plastic material model with kinematic linear hardening . . . . .   | 123        |
| 7.2.1  | $G_1$ and $\tau_{o2}$ parameters identification procedure . . . . .  | 123        |
| 7.2  | $G_2$ identification procedure . . . . .   | 125        |
| 7.2  | Identification results for different strain amplitudes with constant frequency. . . . .  | 126        |
| 7.2  | Identification results for different magnetic field strength values. Influence of frequency on identification results. . . . . | 128        |
| <b>8</b>   | <b>Conclusions and summary considerations . . . . .</b>  | <b>135</b> |
| <b>9</b>   | <b>Proposed next research directions . . . . .</b>   | <b>138</b> |
| <b>List of figures . . . . .</b>   |  | <b>150</b> |
| <b>List of tables . . . . .</b>  |  | <b>155</b> |

## Wykaz ważniejszych skrótów, pojęć i oznaczeń) <sup>1)</sup>

|                |   |   |
|----------------|---|---|
| $\rho_{Fe}$    | – | gęstość litego żelaza   |
| $\rho_n$       | – | gęstość nasypowa  |
| $\eta$         | – | lepkość   |
| $\phi$         | – | udział objętościowy cząstek aktywnych magnetycznie w kompozycie magnetoreologicznym |
| $\tau$         | – | naprężenie ścinające  |
| $\tau_0$       | – | granica plastyczności   |
| $\tau_a$       | – | amplituda naprężenia ścinającego  |
| $\gamma$       | – | odkształcenie poprzeczne, kąt odkształcenia postaciowego                            |
| $\gamma_a$     | – | amplituda odkształcenia   |
| $\dot{\gamma}$ | – | prędkość ścinania   |
| f              | – | częstotliwość   |
| F              | – | siła  |
| G              | – | moduł sprężystości postaciowej, moduł Kirchhoff'a                                   |
| H              | – | natężenie pola magnetycznego  |
| $H_0$          | – | minimalne natężenie pola magnetycznego podczas badań                                |
| $H_1$          | – | maksymalne natężenie pola magnetycznego podczas badań                               |
| $\mu_0$        | – | przenikalność magnetyczna próżni  |
| I              | – | natężenie prądu   |
| x              | – | przemieszczenie   |
| $\Delta W$     | – | pole pętli histerezy  |

---

<sup>1)</sup> W pracy wielokrotnie przytoczono równoległe angielskie nazewnictwo, którego tłumaczenie nie zawsze zostało powszechnie przyjęte w literaturze polskiej. Autor przetłumaczył wiele terminów samodzielnie, nie mając często możliwości porównania z piśmiennictwem polskim z zakresu tej klasy materiałów, często nielicznym lub w ogóle niewystępującym.

- CPVC – skrót od ang. Critical Particle Volume Concentration, oznaczający maksymalny udział procentowy cząstek w kompozycji
- GMM – skrót od ang. Giant Magnetostrictive Material, oznaczający materiał o tzw. gigantycznej magnetostrykcji
- MRE – skrót od ang. Magneto–Rheological Elastomer, oznaczający elastomer magnetoreologiczny
- MRF – skrót od ang. Magneto–Rheological Fluid, oznaczający ciecz magnetoreologiczną
- SEBS – trójblokowy kopolimer styren/etylen-butylen/styren
- SMART – określenie z języka angielskiego dotyczące grupy materiałów o własnościach adaptacyjnych
- SMM – skrót od ang. Smart Magnetic Materials, określający podgrupę materiałów typu SMART, aktywowanych polem magnetycznym

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Materiały SMART

Elastomery magnetoreologiczne (MRE)<sup>1)</sup> należą do szerokiej grupy materiałów zwanych angielskim terminem SMART. Cechą charakterystyczną tych materiałów jest specyficzny sposób w jaki reagują na działanie zewnętrznych pól fizycznych. Poprzez zmianę temperatury, pola magnetycznego, czy np. pola elektrycznego, można zmieniać choćby ich lepkość, czy kształt. Ze względu na dużą liczbę ich typów można je podzielić uwzględniając rodzaj oddziaływania aktywującego ich specyficzne własności. Jedną z większych grup tworzą materiały zmieniające swoje własności w polu magnetycznym, nazywane angielskim skrótem SMM – Smart Magnetic Materials [1]. Należą do nich między innymi materiały magnetoreologiczne<sup>2)</sup>, o których będzie mowa w kolejnym rozdziale, materiały magnetokaloryczne<sup>3)</sup> – w polu magnetycznym zmienia się ich temperatura, materiały magnetorezystywne<sup>4)</sup> – można zmieniać ich oporności oraz materiały o gigantycznej magnetostrykcji<sup>5)</sup>, w których obecność pola magnetycznego wywołuje zmianę kształtu.

## 1.2. Materiały magnetoreologiczne

Historia materiałów magnetoreologicznych sięga 1947 roku [2], w którym Jacob Rabinow, jeden z najbardziej twórczych inżynierów minionego wieku, autor 230 patentów, opisał ciecz magnetoreologiczną (ang. Magnetorheological Fluid – MRF), a następnie wykorzystał do budowy magnetycznego sprzęgła [3]. Cechą charakterystyczną tej cieczy jest to, że jej lepkość można zmieniać umieszczając ją w polu magnetycznym. Jej nazwa została stworzona poprzez połączenie słowa „magnetyzm” z „reologią”, czyli nauką o płynięciu (z greckiego rheo – płynąć i logos – nauka [4]). Ciecze te są zawiesiną cząstek z materiału miękkiego magnetycznie, o średnicy mierzonej w mikrometrach, w cieczy nośnej. W polu magnetycznym cząstki układają się wzdłuż linii działania wektora natężenia pola magnetycznego, co powoduje wzrost lepkości cieczy. Czas, w którym wzrasta lepkość cieczy magnetoreologicznej w obecności pola magnetycznego, czy później maleje do wartości początkowej po jego wyłączeniu, mierzy się w pojedynczych milisekundach.

<sup>1)</sup> skrót od ang. MagnetoRheological Elastomers

<sup>2)</sup> ang. Magnetorheological Materials

<sup>3)</sup> ang. Magnetocaloric Materials

<sup>4)</sup> ang. Magnetoresistive Materials

<sup>5)</sup> ang. Giant Magnetostrictive Materials, w skrócie GMM

W kolejnych latach udoskonalano własności tych cieczy, powstawały także nowe materiały o podobnych cechach. Obecnie można mówić o grupie materiałów magnetoreologicznych wśród której można wyróżnić:

- ciecze magnetoreologiczne,
- ciecze ferro,
- żele magnetoreologiczne,
- kompozyty magnetoreologiczne z porowatą matrycą wypełnioną cieczą magnetoreologiczną,
- elastomery magnetoreologiczne.

### 1.3. Cel pracy i działania o znaczeniu kluczowym

Za obiekt badań przyjęto materiał z ostatniej spośród wymienionych wcześniej grup – elastomer magnetoreologiczny. Pomimo krótkiej historii materiały tego typu znajdują wiele aplikacji przemysłowych, a lista zastosowań wciąż się wydłuża. Jednocześnie są one materiałami rozwojowymi. Mimo iż zajmuje się nimi coraz więcej ośrodków naukowych na świecie, w literaturze przedmiotu wciąż mało uwagi poświęca się szerokiej grupie izotropowych elastomerów magnetoreologicznych. Wciąż brakuje również modelu matematycznego dokładnie opisującego magneto – mechaniczne własności tych materiałów.

Uwzględniając powyższy stan wiedzy, przyjęto iż **głównym celem pracy** jest identyfikacja tłumienia w wybranych elastomerach magnetoreologicznych w warunkach cyklicznego obciążenia ścinającego.

**Sformułowano równocześnie tezę**, iż właściwości elastomeru magnetoreologicznego obciążanego cyklicznie w warunkach ścinania można opisać używając modelu matematycznego.

**Za kluczowe uznano:**

- opanowanie technologii wytwarzania kompozytów magnetoreologicznych,
- dobór matrycy i wypełnienia magnetycznie aktywnego,
- zbudowanie stanowiska pomiarowego,
- opracowanie metody pomiarów własności tłumiących w warunkach zmiennych wartości parametrów mechanicznych i magnetycznych,
- oszacowanie wpływu natężenia pola magnetycznego na własności tłumiące kompozytu,
- opracowanie modelu,
- identyfikację parametrów modelu.

Przedstawione zagadnienie zaprezentowane zostaną w kolejnych częściach pracy.

Część I

**Materiały magnetoreologiczne - przegląd  
literatury**



## 2. Klasyfikacja materiałów magnetoreologicznych

W niniejszym rozdziale przedstawiona zostanie krótka charakterystyka poszczególnych typów materiałów magnetoreologicznych. Elastomery magnetoreologiczne stanowią główny temat pracy, dlatego poświęcono im osobny rozdział dokładnie przedstawiający ich budowę, zastosowania oraz modele matematyczne opisujące ich własności magnetomechaniczne.

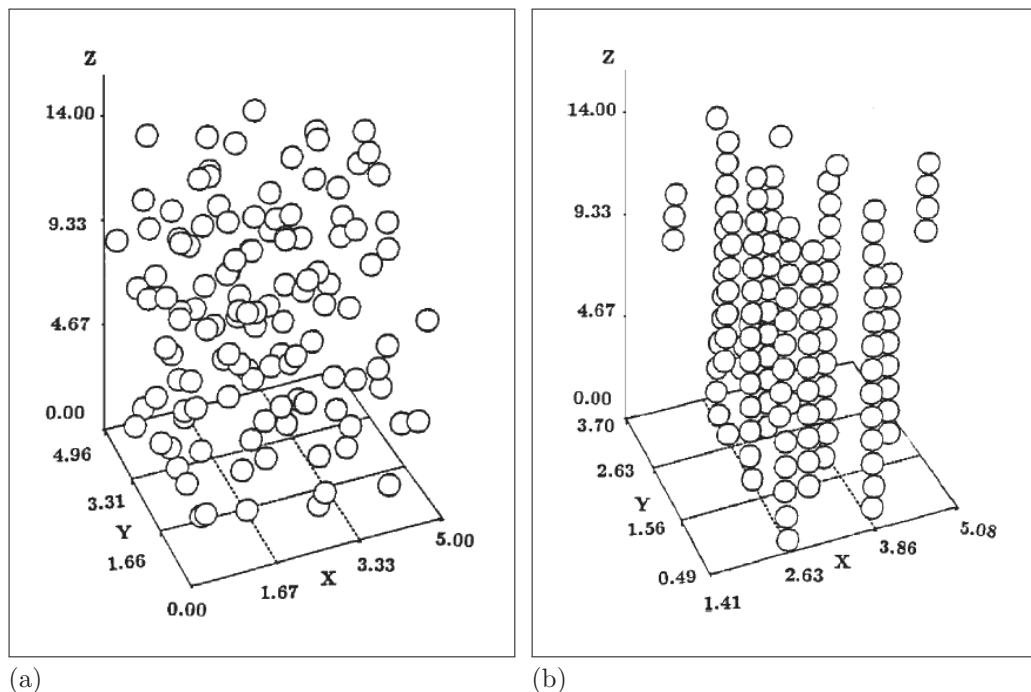
### 2.1. Ciecze magnetoreologiczne

Pierwsze ciecze magnetoreologiczne wytworzone przez Jakoba Rabinowa stanowiły mieszaninę żelaza karbonylkowego z olejem silikonowym, naftą lub olejem parafinowym, w proporcjach wagowych 9:1 [5]. Do wytworzenia ich współczesnych odpowiedników również stosuje się żelazo karbonylkowe, a także ferryty, czy stop żelazo-kobalt, które stanowią około 80 % masy. Wielkość cząstek mieści się w przedziale od 0,1  $\mu m$  do 10  $\mu m$ . Ciecz nośna jest elektrycznie i magnetycznie obojętna. Powinna charakteryzować się małą lepkością, stabilnością w szerokim zakresie temperatur, nie powinna być toksyczna. Może to być, podobnie jak w cieczy Rabinowa, olej silikonowy, bądź olej mineralny, syntetyczny, półsyntetyczny, węglowodorowy, czy na przykład woda.

Ciecz magnetoreologiczną można wytworzyć w warunkach domowych, jednak aby nadawała się do aplikacji komercyjnych konieczna jest spora liczba dodatków, często chronionych patentami, przez co cena takiej cieczy jest stosunkowo wysoka. Dodatki stosuje się choćby ze względu na niekorzystne w wielu zastosowaniach zjawisko sedymentacji wynikającej z dużej różnicy gęstości cieczy nośnej i cząstek. Maksymalny efekt magnetoreologiczny, czyli zmianę lepkości wywołaną zmianą natężenia pola magnetycznego, uzyskuje się dla określonego udziału cząstek w objętości. Przy niejednorodnym ich rozłożeniu mogą występować obszary nie spełniające tego kryterium, w sposób nieprzewidywalny zmieniający własności cieczy. Producenci musieli także rozwiązać problem, jakim jest zjawisko zwane po angielsku „In-Use-Thickening”, lub w skrócie IUT. Problem polega na tym, że górna granica wartości lepkości w polu magnetycznym pozostaje niezmienna, natomiast pod wpływem działania naprężeń ścinających rośnie wartość lepkości bez pola, co zawęża zakres pomiędzy wartościami lepkości minimalnej i maksymalnej.

W polu magnetycznym zmienia się lepkość cieczy magnetoreologicznej, przy czym bez zmian pozostaje jej objętość. Zmiana lepkości, która w cie-

czach magnetoreologicznych jest zjawiskiem odwracalnym, odbywa się w czasie kilku milisekund. Podstawowa teoria opisująca zasadę działania tych materiałów mówi o powstawaniu łańcuchów cząsteczek ułożonych wzdłuż linii przyłożonego pola magnetycznego (rysunek 2.1). Energia potrzebna do roz-

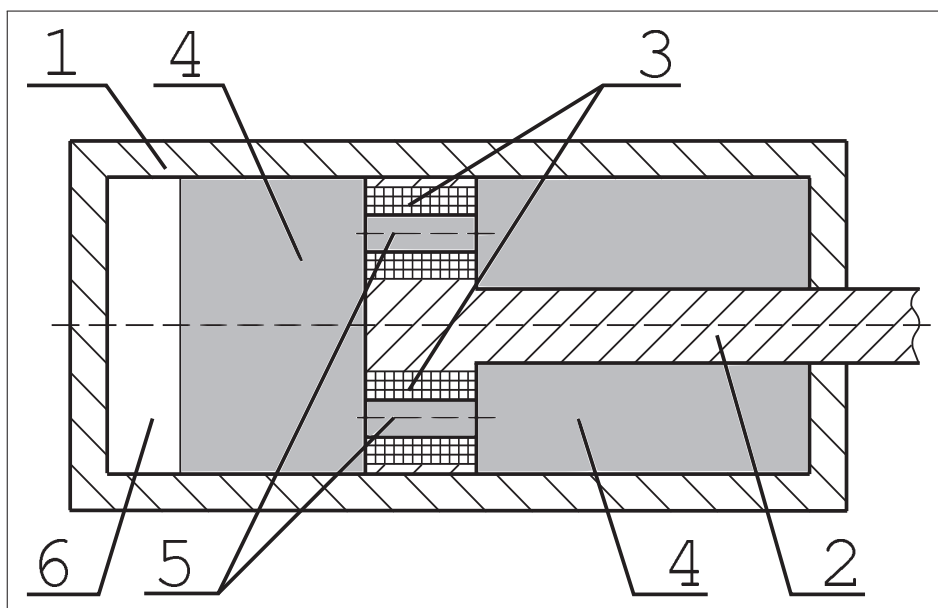


Rysunek 2.1. Schemat działania cieczy magnetoreologicznej: (a) – chaotycznie rozłożone cząstki przy braku pola magnetycznego, (b) – struktury łańcuchowe wzdłuż osi Z, zgodnej z wektorem natężenia pola magnetycznego [6].

bicia łańcuchów wzrasta wraz ze wzrostem jego natężenia. Bez obecności zewnętrznego pola magnetycznego cieczy MRF zachowują się jak cieczy newtonowskie.

Początkowo zainteresowanie cieczami magnetoreologicznymi w przemyśle było niewielkie, głównie ze względu na sedimentację cząstek, choć w latach pięćdziesiątych zastosowano je w sprzęgłach samochodowych, a w latach sześćdziesiątych znalazły zastosowanie w programie lotów kosmicznych Apollo. Przez dwie kolejne dekady zainteresowanie nimi zanikło. Ich wielki potencjał zauważono dopiero pod koniec minionego wieku. W 1997 wprowadzono na rynek urządzenia do ćwiczeń wykorzystujące własności cieczy magnetoreologicznych, takie jak rowery treningowe z regulowanym hamulcem [7].

Szacuje się, że obecnie na świecie jest już ponad pół miliona urządzeń z cieczami magnetoreologicznymi [8]. Najczęściej są to sterowalne tłumiki drgań [4,9,10]. Schemat takiego urządzenia pokazano na rysunku 2.2. W tłoczysku znajdują się otwory (pozycja 2 na rysunku 2.2), wokół których znajdują się cewki elektromagnesu (pozycja 3 na rysunku 2.2). Podczas ruchu tłoka ciecz magnetoreologiczna przepływa przez otwory z jednej części do tłumika do drugiej. Sterując natężeniem prądu płynącego w cewce można

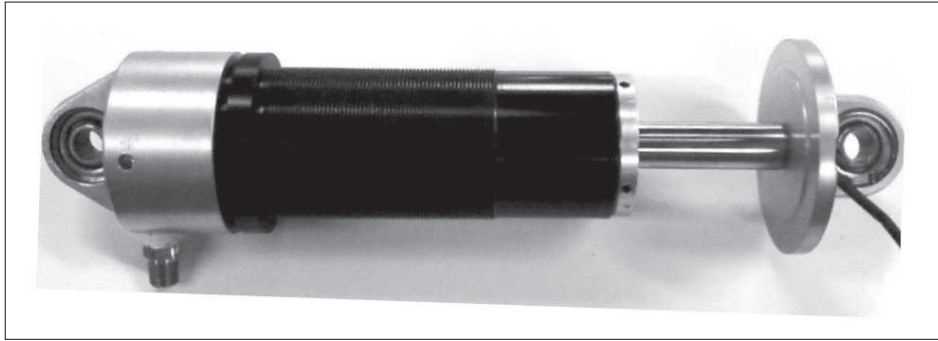


Rysunek 2.2. Schemat tłumika drgań z cieczą magnetoreologiczną. 1 – obudowa, 2 – tłok, 3 – elektromagnes, 4 – ciecz magnetoreologiczna, 5 – otwory w tłoczysku umożliwiające przepływ cieczy magnetoreologicznej, 6 – akumulator gazowy.

regulować natężenie pola magnetycznego w otworach, które zmienia lepkość przepływającej cieczy magnetoreologicznej. Im większa lepkość tym większa siła potrzebna do przemieszczenia tłoka. Zastosowania takich urządzeń o zmiennej sile tłumienia można znaleźć między innymi w przemyśle motoryzacyjnym, w półaktywnych <sup>1)</sup> zawieszeniach samochodów osobowych [11, 12]. Początkowo montowano je między innymi w limuzynie Cadillac Seville STS 2003, a obecnie już w szerokiej gamie pojazdów. Amortyzatory do sterowalnego zawieszenia MagneRide produkowane są również w Polsce, w zakładach Delphi w Krośnie [13]. Obecnie zakres zastosowań rozszerza się także na samochody ciężarowe [14], pojazdy gaśnicowe [15], motocykle [16], czy nawet samoloty [17]. Urządzenia z cieczami magnetoreologicznymi w przemyśle motoryzacyjnym mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w zawieszeniach pojazdów, ale na przykład w systemie regulacji kąta otwarcia drzwi [18]. Tradycyjne drzwi samochodowe mają blokadę zapobiegającą dalszemu otwieraniu tylko dla kilku pozycji, co na ciasnym parkingu może czasem prowadzić do uderzenia i porysowania karoserii samochodu parkującego obok. Zastosowanie urządzenia z cieczą umożliwia dokładną regulację kąta otwarcia drzwi. Jeszcze innym przykładem zastosowania tego typu urządzeń w transporcie jest amortyzacja siedziska w wozach bojowych [19] (rysunek 2.3).

Tłumik z cieczą magnetoreologiczną zastosowano także w dostępnej już na rynku protezie nogi [20]. Dzięki układowi sterującemu, zmieniającemu w czasie rzeczywistym parametry tłumienia, proteza umożliwia poruszanie się w różnych warunkach bez konieczności dodatkowej regulacji, czy dostrajania. Osoba używająca takiej protezy może bez problemu chodzić po schodach,

<sup>1)</sup> ang. semi-active



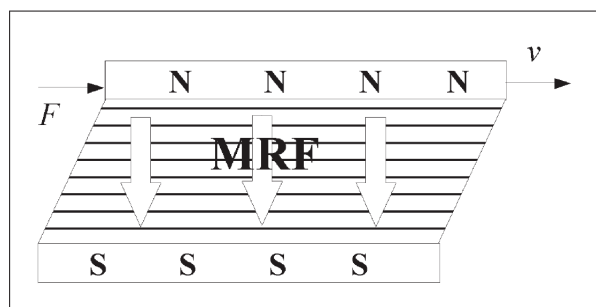
Rysunek 2.3. Tłumik drgań z cieczą magnetoreologiczną służący do amortyzacji fotela w pojeździe bojowym [19].

albo jeździć na rowerze, czy przenosić różnego typu ładunki, co wiąże się ze zmianą położenia środka ciężkości.

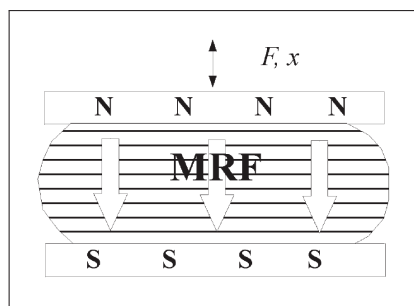
Jeszcze innym obszarem zastosowań tłumików drgań ze zmiennym tłumieniem jest budownictwo. Niewielkie tłumiki drgań o gabarytach takich jak amortyzatory używane w przemyśle samochodowym stosuje się do tłumienia drgań lin podtrzymujących mosty linowe. Zdecydowanie większe tłumiki znalazły zastosowanie w systemach zapobiegających tragicznym skutkom trzęsień ziemi w budynkach [21]. W przypadku ostatniej z wymienionych aplikacji, niezwykle ważne było wyeliminowanie sedymentacji cząstek. Urządzenia te pozostają w spoczynku przez długi okres czasu, dlatego muszą mieć stabilne parametry już w pierwszych sekundach po wykryciu drgań budynku. W tym celu opracowano specjalny rodzaj cieczy nośnej, która w stanie spoczynku ma konsystencję żelu. Znajdujące się w niej cząstki pozostają na swoich pozycjach przez wiele dni. W momencie aktywacji urządzenia, pod wpływem ścinania, jej lepkość osiąga wartość zbliżoną do lepkości typowych cieczy stosowanych w innych aplikacjach, dzięki czemu cząstki żelaza mogą się swobodnie przemieszczać.

Oprócz zastosowań, takich jak tłumiki drgań, cieczy magnetoreologiczne wykorzystuje się do budowy sterowanych polem magnetycznym sprzęgieł [22, 23] oraz hamulców [24,25], a także pochłaniaczy energii [26]. Na bazie tłumika drgań zbudowano także urządzenie umożliwiające zablokowanie elementu wykonawczego w wybranym przez użytkownika położeniu [27]. W wymienionych zastosowaniach cieczy magnetoreologiczne pracują według jednego z trzech trybów. Ciecz może być poddawana ścinaniu (rysunek 2.4 a), jeśli powierzchnie pomiędzy którymi się znajduje przesuwają się względem siebie, może być ściskana (rysunek 2.4 b), lub pracować w trybie zwanym „zaworowym” (rysunek 2.4 c), jeśli płynie pomiędzy nieruchomymi powierzchniami, prostopadle do wektora natężenia pola magnetycznego.

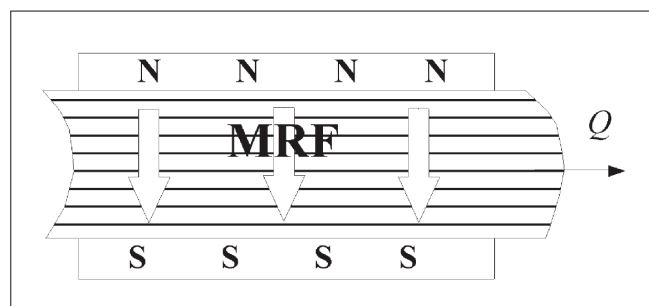
Zupełnie inaczej cieczy magnetoreologiczne wykorzystuje się w precyzyjnej obróbce ścierniej [29]. Jest ona używana jako narzędzie zbierające wierzchnią warstwę polerowanej powierzchni. Do cieczy bazowej dodaje się czasami komponenty o dobrych właściwościach ściernych, takie jak np.  $CeO_2$ ,



(a)



(b)



(c)

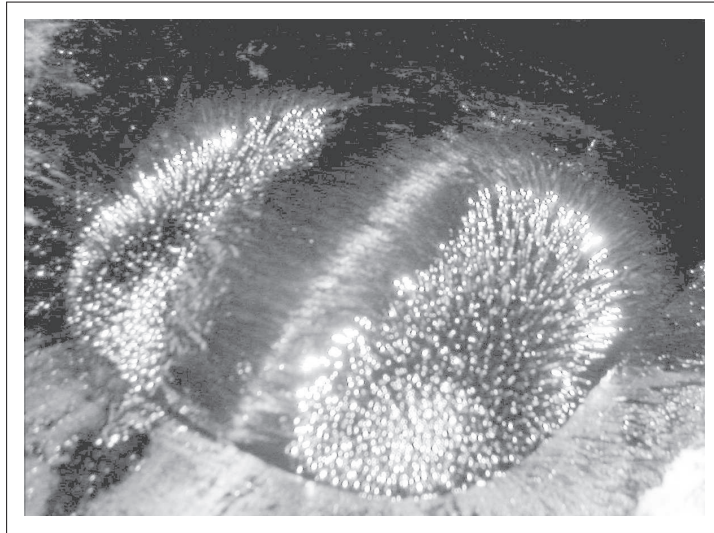
Rysunek 2.4. Trzy tryby pracy cieczy magnetoreologicznej: (a) – ścinanie, (b) – ściskanie, (c) – tryb „zaworowy”, gdzie strzałki pokazują wektor natężenia pola magnetycznego [28].

$Al_2O_3$  [30]. Polerowanie z użyciem cieczy magnetoreologicznej umożliwia uzyskanie chropowatości powierzchni około  $10 \text{ \AA rms}$ <sup>1)</sup> [31].

## 2.2. Ciecze ferro i ferrożele

Właściwością charakterystyczną cieczy ferro (rysunek 2.5) jest zmiana lepkości pod wpływem pola magnetycznego, jednak w przeciwieństwie do cieczy magnetoreologicznych nie wykazują one granicy plastyczności. Materiały te różnią się także budową. Jest to koloidalna zawiesina aktywnych magnetycznie cząstek o średnicy około 10 nm w niemagnetycznej cieczy. Cząstki, które mogą być wykonane z magnetytu, tlenków kobaltu lub innych ferromagnetycznych tlenków [33] stanowią od 7 do 10 %. Cieczą nośną mogą być różnego typu oleje, nafta lub woda.

<sup>1)</sup> ang. rms - root mean square, średnie kwadratowe odchylenie



Rysunek 2.5. Ciecz ferro w polu magnetycznym. Wyraźnie uformowane na brzegach charakterystyczne „szpilki” ułożone zgodnie z liniami sił pola magnetycznego [32].

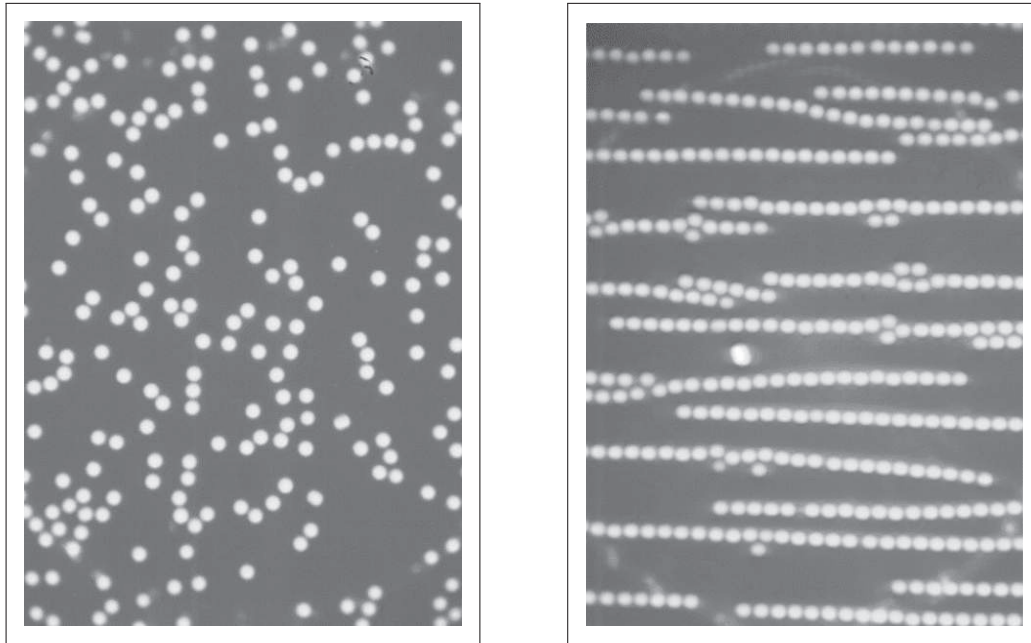
W cieczach ferro nie występuje problem sedymentacji. Dzięki małym rozmiarom cząstek występują termiczne fluktuacje oraz ruchy Browna powodujące ciągłe mieszanie. Aby natomiast zapobiec siłom Van der Waalsa, cząstki pokrywa się środkiem powierzchniowo czynnym.

Ciecze ferro, podobnie jak ciecze magnetoreologiczne, znalazły wiele zastosowań. Użyto ich między innymi do uszczelnienia wirujących wałów. Ciecz utrzymywana jest polem magnetycznym w szczelinie pomiędzy wałem, a otworem. Stosuje się także ciecze ferro do poprawy charakterystyki głośników oraz silników elektrycznych [34], a także do miejscowego smarowania węzłów łożyskowych [35]. Ciecze ferro wykorzystano do budowy aktuatora umożliwiającego regulowanie położenia platformy nośnej [36]. Prowadzone są także badania nad wykorzystaniem cieczy ferro w medycynie [37], do transportowania leków w organizmie człowieka [38]. Odpowiednio sterując wektorem natężenia pola magnetycznego można doprowadzić cząstki cieczy z przyczepionymi lekami do miejsc aplikacji leku, a następnie również poprzez sterowanie magnetyczne wyprowadzić z organizmu. Prowadzi się również badania nad wykorzystaniem cieczy ferro w leczeniu nowotworów [39]. Cząstki tworzą bariery odcinające komórki rakowe od źródeł tlenu i pożywienia powodując ich obumarcie.

Prowadzono także badania kompozytów, w których do cieczy ferro dodano niemagnetyczne cząstki o średnicy około  $10 \mu m$  (rysunek 2.6) [40]. Autorzy badań podkreślają, że w tych kompozytach, ze względu na zastosowanie niemagnetycznych cząstek, po wyłączeniu zewnętrznego pola magnetycznego nie występują aglomeracje cząstek, w przeciwieństwie do cieczy magnetoreologicznych. Dodatkowo można dobrać cząstki dodane do kompozytu w zależności od aplikacji.

Poprzez połączenie koloidalnych cząstek cieczy ferro ze strukturą łańcuchową żelu związku nieorganicznego lub organicznego otrzymuje się fer-





(a)

(b)

Rysunek 2.6. Kompozyt zbudowany poprzez dodanie do cieczy ferro polistyrenowych sfer o średnicy  $10 \mu m$ : (a) – bez pola magnetycznego, (b) – w polu magnetycznym [40].

rożele [41]. Podobnie jak w przypadku cieczy ferro, poprzez stymulację zewnętrznym polem magnetycznym można zmieniać charakterystykę tego materiału. Interesujące są właściwości mechaniczne i akustyczne, które bada się wykorzystując fale ultradźwiękowe [42].

### 2.3. Żele magnetoreologiczne i magnetostrykcyjne

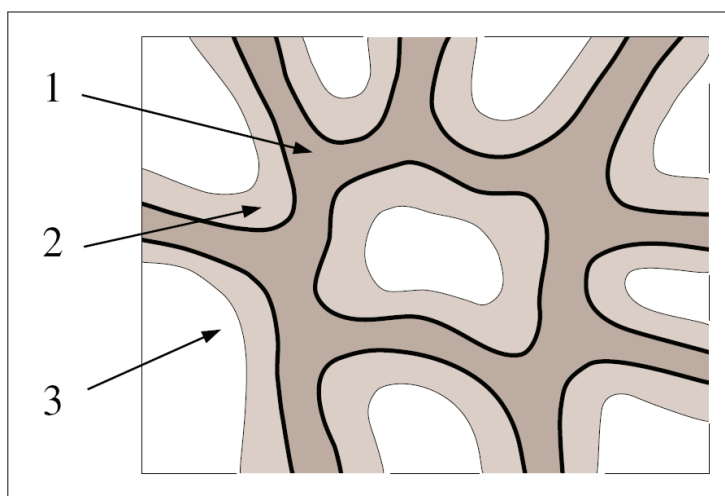
Inna grupa materiałów o własnościach zmienianych polem magnetycznym, wywodząca się od cieczy magnetoreologicznych, to żele magnetoreologiczne [43,44]. Zbudowane są z cząstek żelaza umieszczonych w żelu. Stosuje się między innymi żele silikonowe, poliuretanowe oraz poliamidowe [45]. Ze względu na różnicę gęstości pomiędzy cząstkami żelaza, a żelem w którym się one znajdują, obserwuje się w tych materiałach podobnie jak w cieczach magnetoreologicznych, zjawisko sedymentacji. W aplikacjach takich jak amortyzatory nie stanowi to jednak problemu ze względu na łatwość ponownego wymieszania. Dodatkowo stosuje się dodatki, które zdecydowanie spowalniają proces sedymentacji [46], a także ograniczają aglomerację cząstek wywołaną siłami van der Waalsa. Stosowane dodatki dają także możliwość obniżania lepkości przy braku pola magnetycznego tak, aby dobrać odpowiednie parametry dla poszczególnych aplikacji.

Wyróżniono także grupę polimerowych żeli magnetostrykcyjnych, w których matryca jest na tyle gęsta, że w procesie produkcji można formować z cząstek trwałe struktury uporządkowane. Dzięki własnościom magneto-

strykcyjnym można stosować je jako akulatory, na przykład jako sztuczne mięśnie [47].

## 2.4. Kompozyty magnetoreologiczne z porowatą matrycą wypełnioną cieczą magnetoreologiczną

Wady cieczy magnetoreologicznych, takich jak sedimentacja, czy konieczność stosowania uszczelnień, przy jednoczesnym zachowaniu ich unikatowych właściwości wyeliminowano w kompozytach z matrycą z materiału porowatego, nasączonego cieczą magnetoreologiczną (rysunek 2.7) [32, 48–54]. Takie roz-



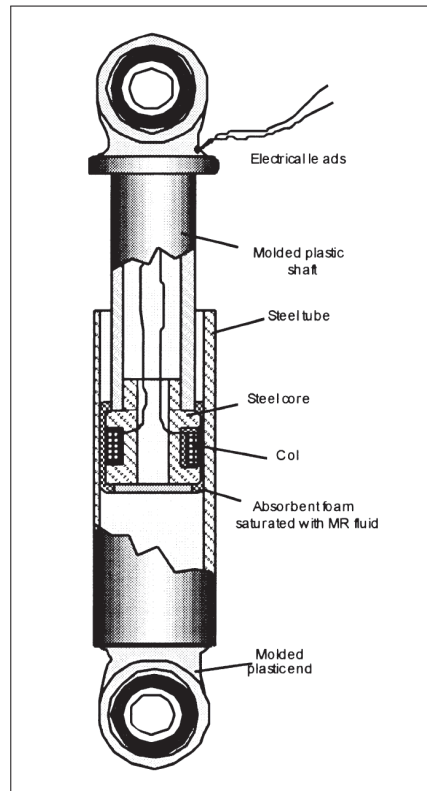
Rysunek 2.7. Schemat struktury kompozytu magnetoreologicznego zbudowanego poprzez nasączenie matrycy z materiału porowatego cieczą magnetoreologiczną: 1 - ścianki komórki matrycy, 2 - warstwa cieczy magnetoreologicznej, 3 - powietrze [53].

wiązanie poprawiło możliwość formowania kształtu, ograniczyło także koszty, gdyż część objętości zamiast drogiej cieczy magnetoreologicznej zastąpiono zdecydowanie tańszym materiałem, z jakiego wykonano matrycę. Może to być gąbka, tkanina, filc, albo inny materiał elastyczny o strukturze porowatej [55].

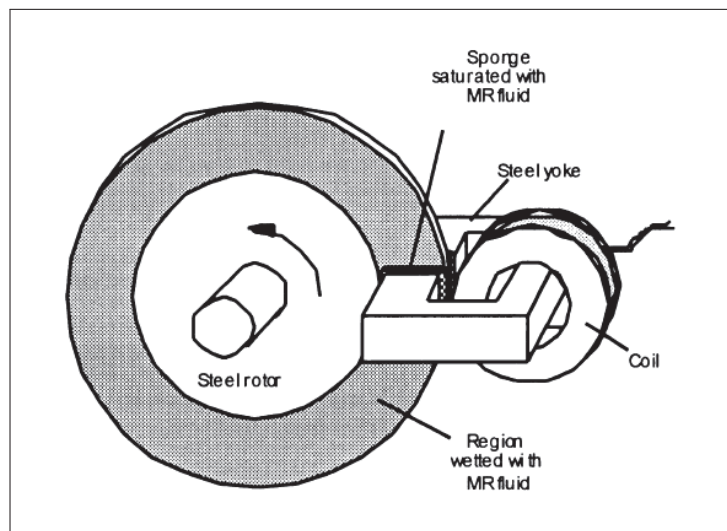
Ze względu na ograniczone parametry wytrzymałościowe matrycy zastosowanie tych materiałów ogranicza się do aplikacji, w których nie uzyskuje się dużych wartości obciążenia. Podobnie jak ciecze magnetoreologiczne zastosować je można do tłumienia drgań [56–59]. Tłumik drgań o sterowalnych parametrach, zbudowany z gąbki nasączonej cieczą magnetoreologiczną (rysunek 2.8), zastosowano między innymi do wytłumienia drgań pralki [60, 61]. Materiały z tej grupy stosować można także w hamulcach (rysunek 2.9). W aplikacjach tego typu sterując natężeniem pola magnetycznego działającego na kompozyt reguluje się siłę tarcia pomiędzy powierzchnią kompozytu, a współpracującą z nim powierzchnią w urządzeniu.

Kolejny obszar możliwych zastosowań tych materiałów to pochłaniacze energii [62] takie jak zagłówki w samochodach, czy kamizelki kuloodporne. Prace nad taką kamizelką, która umożliwiałaby swobodne poruszanie żołnie-





Rysunek 2.8. Tłumik drgań zbudowany na bazie gąbki nasączonej cieczą magnetoreologiczną. Gąbka nasączona cieczą magnetoreologiczną przymocowana jest na stałe do tłoka i współpracuje z wewnętrzną powierzchnią obudowy. W tłoku znajduje się elektromagnes, umożliwiający sterowanie lepkości cieczy, którą nasączona jest gąbka [55].



Rysunek 2.9. Hamulec zbudowany na bazie gąbki nasączonej cieczą magnetoreologiczną [55].

rza, ale usztywniałyby się tuż przed uderzeniem pocisku, prowadzono w Massachusetts Institute of Technology w USA.

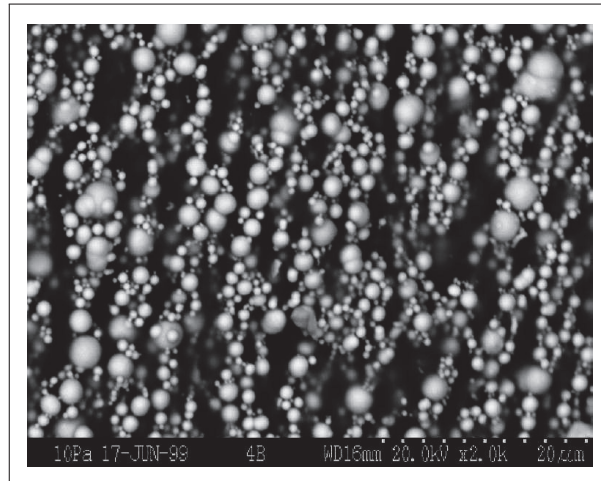
### 3. Elastomery magnetoreologiczne

Elastomery magnetoreologiczne, w literaturze często nazywane w skrócie „MRE” od angielskiej nazwy „Magnetorheological Elastomers”, lub „MAE” od angielskiej nazwy „Magneto-Active Elastomers”, to materiały sterowalne, zbudowane z magnetycznie polaryzowalnych cząstek umieszczonych w niepolaryzowalnej, elastomerowej matrycy. W materiałach tych obserwuje się zmianę modułu Kirchhoffa pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego, co określa się mianem efektu magnetoreologicznego. W przeciwieństwie do cieczy magnetoreologicznych, których obszar pracy mieści się poniżej granicy płynięcia, elastomery magnetoreologiczne pracują powyżej tej granicy. Można zatem stwierdzić, że materiały te nie są konkurencją dla cieczy magnetoreologicznych, ale ich uzupełnieniem. W przeciwieństwie do cieczy magnetoreologicznych, którymi zajmuje się już od kilkudziesięciu lat wiele ośrodków naukowych na świecie, elastomery magnetoreologiczne są materiałami nowymi, dla których wciąż pozostaje wiele problemów naukowych do rozwiązania, takich jak choćby optymalny dobór składników, technologia wytwarzania, czy opracowanie odpowiedniego modelu matematycznego do opisu ich własności mechanicznych. Analizując artykuły naukowe dotyczące tematyki kompozytów magnetoreologicznych, można zauważyć że materiały te są obiektami badań czołowych ośrodków badawczych w USA, Chinach, Finlandii, Francji, Kanadzie, Szwajcarii, czy Szwecji.

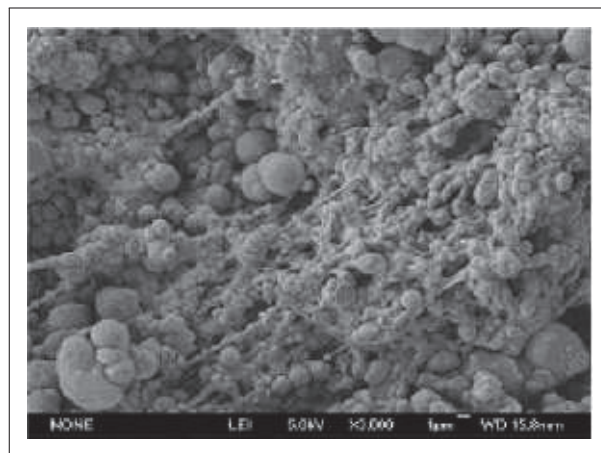
#### 3.1. Budowa i zasada działania elastomerów magnetoreologicznych

Rozróżnia się dwa zasadnicze typy elastomerów magnetoreologicznych: anizotropowe oraz izotropowe [63, 64]. W literaturze można spotkać także określenie elastomerów magnetoreologicznych skrótem EFC (ang. Elastomer-Ferromagnet Composite) [65, 66]. Kompozyty anizotropowe jako pierwsze stały się celem badań ośrodków naukowych. W materiałach tych cząstki tworzą w matrycy struktury łańcuchowe (rysunek 3.1).

Podczas utwardzania, kompozyt umieszczany jest w polu magnetycznym, które indukuje moment dipolowy w każdej z cząstek. Cząstki dążą do osiągnięcia minimum energetycznego, co w tym wypadku odpowiada ułożeniu łańcuchowemu z momentami dipolowymi równoległymi do linii wektora pola magnetycznego. Kiedy później kompozyt odkształcany jest w obecności pola magnetycznego, cząstki wyprowadzane są ze stanu minimum energetycznego, co wymaga dodatkowej pracy. Wartość tej dodatkowej pracy rośnie wraz ze wzrostem natężenia przyłożonego pola magnetycznego [55, 69].



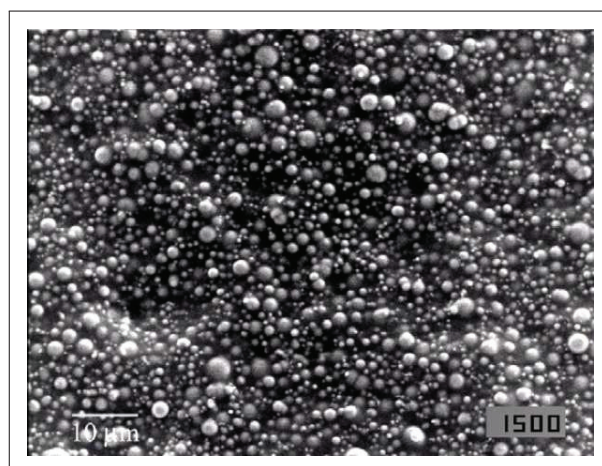
(a)



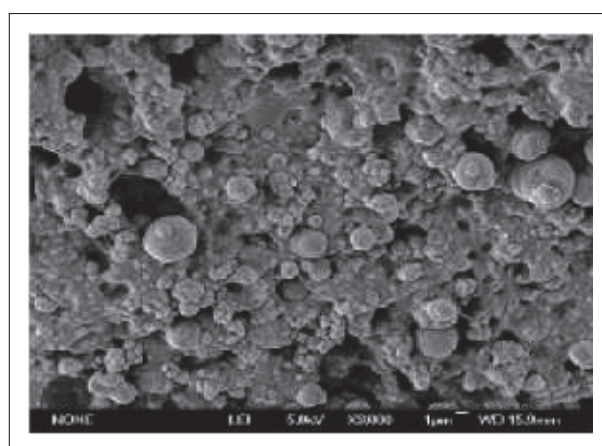
(b)

Rysunek 3.1. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego przedstawiające anizotropowe kompozyty magnetoreologiczne, (a) – [67], (b) – [68].

Anizotropowe elastomery magnetoreologiczne są materiałami niezwykle ciekawymi z punktu widzenia naukowego, jednak technologia ich wytworzenia może okazać się zbyt złożona w przypadku wielkoseryjnej produkcji, biorąc pod uwagę konieczność umieszczania kompozytu w polu magnetycznym podczas utwardzania matrycy. Problem ten może być wyeliminowany poprzez zastosowanie izotropowych elastomerów magnetoreologicznych, w których cząstki rozłożone są jednorodnie w całej objętości materiału (rysunek 3.2). Według naukowców z University of Science and Technology of China, w kompozytach tego typu zmianę modułu Kirchhoffa pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego uzyskuje się dzięki temu, że cząstki żelaza dążą do ułożenia wzdłuż kierunku działania wektora pola magnetycznego, powodując przy tym deformację matrycy. Uważają oni również, iż są trzy sposoby wzmocnienia efektu magnetoreologicznego: oddziaływanie między dipolami będzie większe dla większych cząstek, co ułatwi ich układanie wzdłuż kierunku wektora pola magnetycznego; użycie bardziej miękkiej matrycy spowoduje, że będzie ona stawiać mniejszy opór cząstkom podczas ich układania



(a)



(b)

Rysunek 3.2. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego przedstawiające izotropowe kompozyty magnetoreologiczne, (a) – [70], (b) – [68].

się w jednym kierunku; zlikwidowanie szczelin pomiędzy cząstkami a matrycą ograniczy straty energii magnetycznej [71]. Kallio z VTT w Finlandii opisując w swojej rozprawie doktorskiej zmiany zachodzące w izotropowych elastomerach magnetoreologicznych pod wpływem pola magnetycznego stwierdza, że ułożone w łańcuchy dipole magnetyczne przyciągają dipole z matrycy, przez co pomiędzy łańcuchami zaobserwować można obszary o zmniejszonej gęstości. Dodatkowo pomiędzy cząstkami w łańcuchach uwięzione zostają cząstki elastomeru i nie mogą się odkształcać [72].

Podstawowe dwa składniki stanowiące strukturę elastomerów magnetoreologicznych to elastomer stanowiący matrycę oraz rozmieszczone w nim cząstki aktywne magnetycznie. Cząstki te muszą być miękkimi magnetykami o niskiej wartości namagnesowania szczątkowego. Ponadto materiał, z którego są wykonane, powinna cechować wysoka przenikalność i duża wartość nasycenia magnetycznego, zapewniające maksymalne przyciąganie międzycząsteczkowe, dające duży efekt magnetoreologiczny. Dlatego materiałem najczęściej wybieranym do produkcji elastomerów magnetoreologicznych jest żelazo, dla którego indukcja nasycenia wynosi  $B_s=2,15$  T, natomiast mak-

symalna wartość przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r=9000$  dla żelaza zawierającego 0,2 % zanieczyszczeń, a dochodzi nawet do  $\mu_r=200000$  dla czystego żelaza [73]. Dobierając cząstki należy mieć na uwadze, że powinny one być na tyle duże, aby mogły pomieścić kilka domen magnetycznych, gdyż w innym przypadku efekt magnetoreologiczny mógłby być niezauważalny [74]. Warto również wspomnieć o najnowszej generacji elastomerów magnetoreologicznych, opracowanych w ostatnich latach, w których zamiast cząstek żelaza używa się proszków z materiałów o gigantycznej magnetostrykcji (GMM). Obecnie najczęściej stosuje się produkowany przez firmę EXTREMA Terfenol-D o składzie chemicznym ( $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9}$ ), reprezentujący grupę terfenoli ( $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ ).

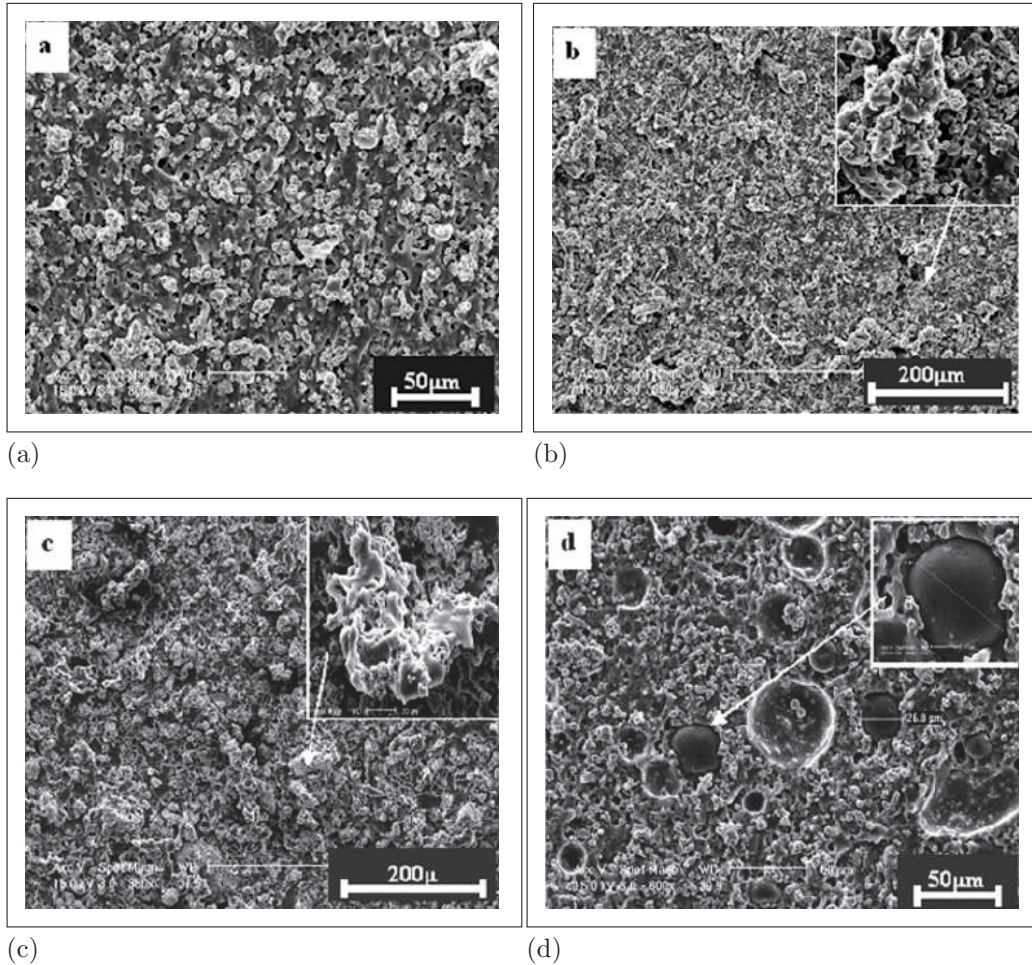
Wśród materiałów wybieranych na matrycę elastomerów magnetoreologicznych dominują kauczuki: naturalne [75–80], silikonowe [66, 75, 81–84] oraz butadienowo-akrylonitrylowe z różną zawartością kwasu akrylowego [74, 78, 79, 85]. Próbowano również modyfikować kauczuki naturalne dodając poli-butadien (Buna CB55) [74, 86], czy tlenek cynkowy, kwas stearynowy oraz siarkę [80], a kauczuki silikonowe poprzez zmieszanie z olejem silikonowym [87, 88], z winylem oraz toluenem [71], a także z poliuretanem i olejem silikonowym [89, 90]. W literaturze zaprezentowano także elastomery magnetoreologiczne z całą paletą innych matryc, wytworzonych między innymi z takich materiałów jak guma syntetyczna [76], poliuretan [80, 91], czy silikon [70, 72, 92] i innych [93].

Prowadzone są badania mające na celu określenie optymalnego składu matrycy hybrydowej, czyli wykonanej z dwóch zmieszanych ze sobą składników. W chińskich ośrodkach naukowych testowano kompozyty magnetoreologiczne z matrycą wykonaną z kauczuku silikonowego zmieszanego z polistyrenem (rysunek 3.3). Otrzymane wyniki wskazują na wyraźne zmiany mierzonego efektu magnetoreologicznego w zależności od proporcji składników. Zaobserwowano zdecydowany spadek tego efektu, jak i własności wytrzymałościowych materiału, przy udziale polistyrenu około 10 %, podczas gdy dla większej oraz mniejszej jego zawartości wyniki są kilkukrotnie lepsze [94].

Podobne badania porównawcze przeprowadzono także na kompozytach z matrycami dwuskładnikowymi wykonanymi z poliuretanu i kauczuku silikonowego (rysunek 3.4). Stwierdzono, że efekt magnetoreologiczny jest większy w kompozytach z matrycą wykonaną z czystego poliuretanu, niż w materiałach z matrycą z samego kauczuku silikonowego. Zmieszanie obu składników zdecydowanie poprawia obserwowany efekt magnetoreologiczny. Największy zmierzono dla materiału z matrycą wykonaną z obu składników zmieszanych w równych proporcjach wagowych [89].

Do wypełnienia matrycy używa się najczęściej żelaza karbonylkowego, którego cząstki mają kształt sferyczny. Uzyskuje się go z rozkładu związku  $Fe(CO)_5$  [95]. Zazwyczaj cząstki te mają niewielką średnicę, poczynając od około  $2 \mu m$  [96, 97], przez przedział od 3 do  $6 \mu m$  [66, 69–71, 74, 84, 98–101] aż do  $10 \mu m$  [72, 77, 78, 99, 102]. Badano także materiały wypełnione zdecydowanie większymi kulkami z czystego żelaza o średnicy  $400 \mu m$  oraz  $800 \mu m$  [103]. W przypadku izotropowych elastomerów magnetoreologicznych używa się najczęściej cząstek żelaza o porowatej powierzchni i znacznie większych rozmiarach, do około  $60 \mu m$  [75, 77–79, 85], czy nawet do  $200 \mu m$  [74, 99].



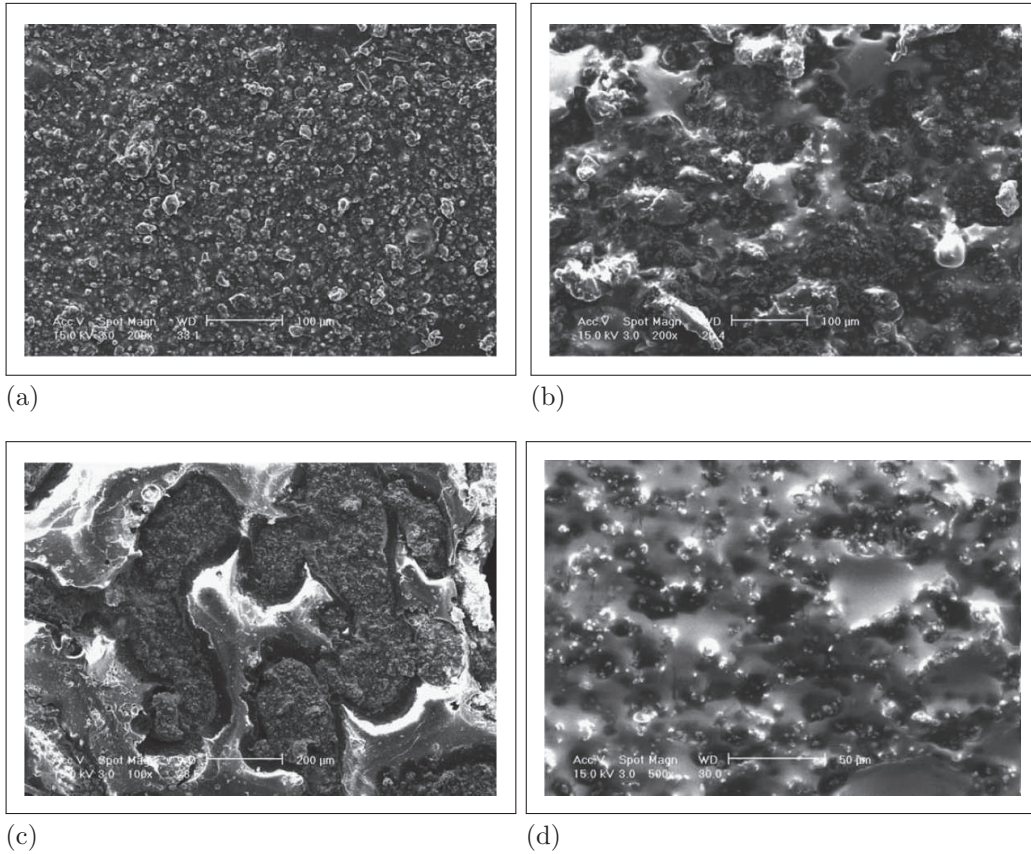


Rysunek 3.3. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego prezentujące struktury izotropowych kompozytów magnetoreologicznych z matrycą wykonaną z kauczuku silikonowego z różnym udziałem polistyrenu: (a) – 0 % polistyrenu, (b) – 5 % polistyrenu, (c) – 10 % polistyrenu, (d) – 20 % polistyrenu [94].

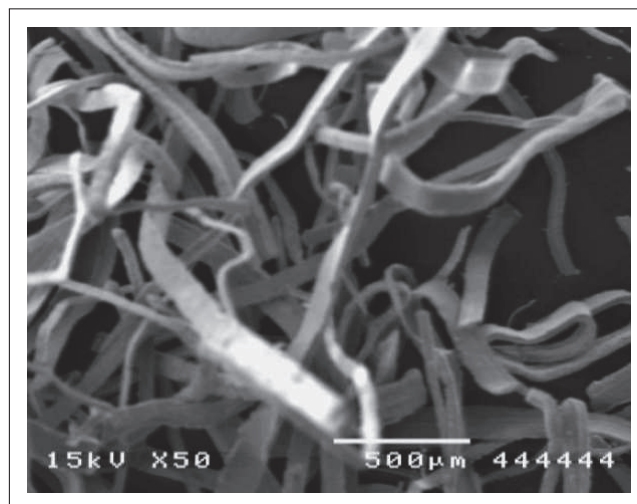
Badano także materiały wypełnione mieszaniną cząstek małych (o średnicach  $3 \mu m - 5 \mu m$ ) i dużych (o średnicach  $70 \mu m - 80 \mu m$ ) w identycznych proporcjach objętościowo, przy czym wszystkie cząstki żelaza miały 36 % udział objętościowo w materiale [104]. W literaturze przedmiotu przedstawiono także kompozyty wypełnione cząstkami żelaza w kształcie igieł [99, 105] (rysunek 3.5) oraz nanodrutami o średnicy około 300 nm i długości  $15 \mu m$  [106] (rysunek 3.6).

Obok wielkości cząstek, drugim ważnym parametrem jest ich ilość. W przypadku izotropowych elastomerów magnetoreologicznych stwierdzono, że maksymalny efekt magnetoreologiczny można uzyskać, jeśli procentowy udział objętościowo cząstek będzie zbliżony do wartości CPVC (ang. Critical Particle Volume Concentration) [74, 79, 99], wyznaczonej z równania:

$$CPVC = \frac{100 \cdot \rho_n}{\rho_{Fe}}, \quad (3.1)$$



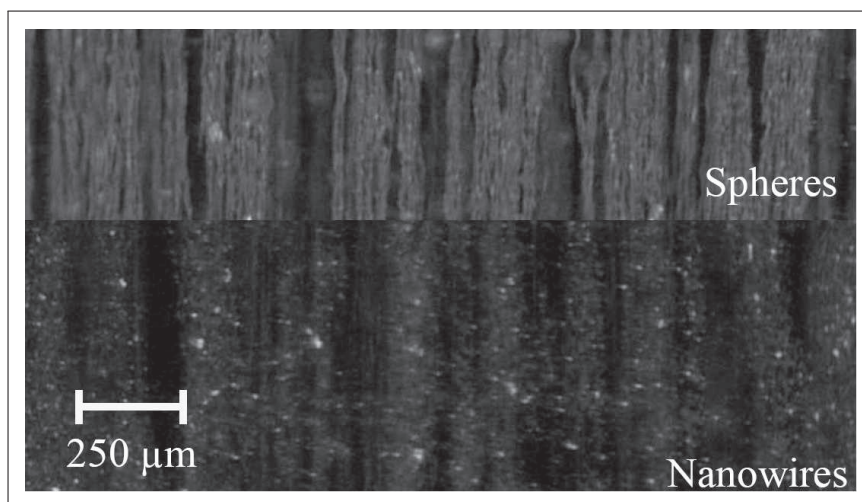
Rysunek 3.4. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego prezentujące struktury izotropowych kompozytów magnetoreologicznych z matrycą wykonaną z poliuretanu i kauczuku silikonowego w różnych proporcjach masowych obu składników: (a) – 0/1, (b) – 1/1, (c) – 2/1, (d) – 1/0 [89].



Rysunek 3.5. Cząstki żelaza w kształcie igieł („needle-shaped particles”) [99].

gdzie  $\rho_n$  – gęstość nasypowa, a  $\rho_{Fe}$  – gęstość litego żelaza. Odpowiada to takiemu upakowaniu cząstek, jaki występuje po nasypaniu ich do zbiornika.





Rysunek 3.6. Zdjęcie z mikroskopu przedstawiające kompozyt magnetoreologiczny wypełniony cząstkami żelaza oraz nanodrutami (dolna część zdjęcia) [106].

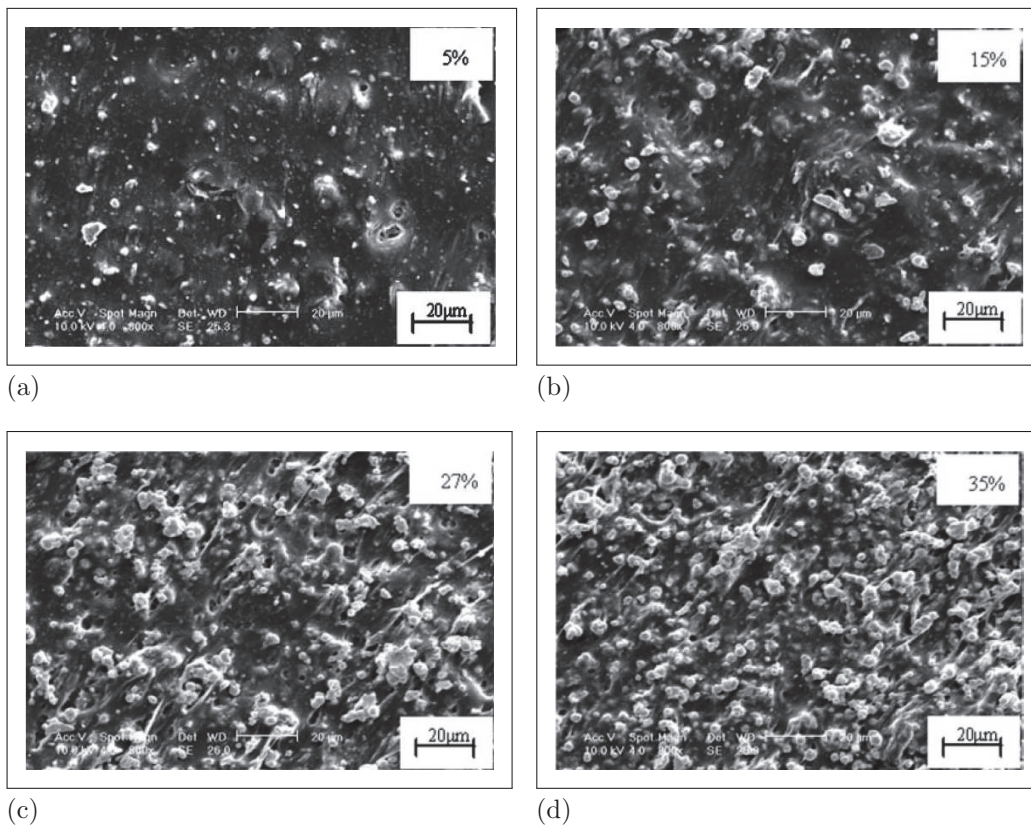
Cząstki stykają się ze sobą, a szczeliny pomiędzy nimi wypełnione są powietrzem. W kompozycie powietrze zastąpione jest elastomerem. Jeśli ilość cząstek jest mniejsza niż wartość CPVC, wtedy odległości między nimi są mniejsze, przez co maleje wzajemne oddziaływanie magnetyczne. Jeśli natomiast cząstki będą miały zbyt duży udział procentowy w stosunku do matrycy, wtedy ilość elastomeru będzie niewystarczająca, żeby wypełnić wszystkie przestrzenie między cząstkami. Pozostawione luki powietrzne zmniejszą wytrzymałość materiału. Dla cząstek żelaza o średnicy około  $60 \mu m$  wartość CPVC osiąga wartość 36,5 %. Część prezentowanych w literaturze izotropowych elastomerów magnetoreologicznych zawiera ilość cząstek zbliżoną do wartości CPVC: 37 % [77], 36,5 % [85], choć badano również próbki o mniejszej zawartości cząstek, między innymi: 28 % [74], 27 % [81], przy czym zawierały one żelazo karbonylkowe o znacznie mniejszej średnicy niż  $60 \mu m$ , dla której wyliczono wartość CPVC.

W przypadku anizotropowych elastomerów magnetoreologicznych w literaturze nie przedstawiono zależności umożliwiającej wyznaczenie optymalnej ilości cząstek ferromagnetycznych. Badano kompozyty anizotropowe o bardzo szerokim zakresie objętościowego udziału cząstek, od 20,1 % [80], przez wartości pośrednie, między innymi 25 % [80], 27 % [66, 76, 81, 84, 86], czy około 30 % [72, 102], aż po 50 % udziału objętościowego [65].

W celu polepszenia własności elastomerów magnetoreologicznych, podobnie jak w przypadku cieczy magnetoreologicznych, stosuje się również różne dodatki:

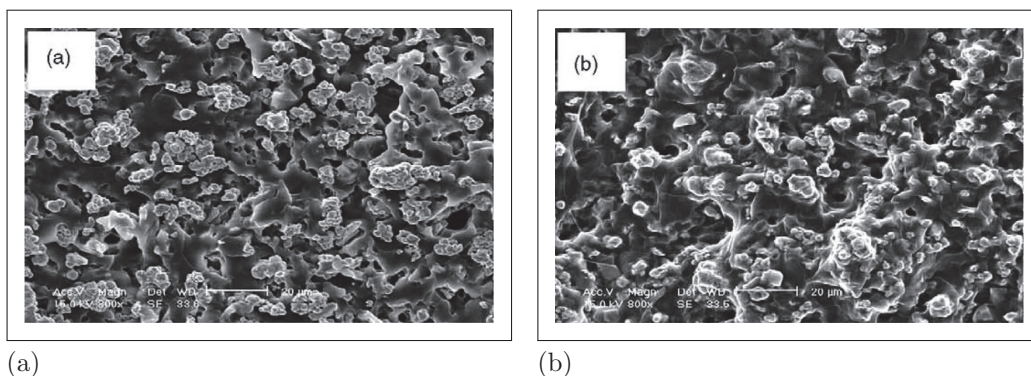
- W celu zwiększenia adhezji pomiędzy cząstkami a matrycą, stosuje się silany polepszające zwilżanie powierzchni cząstek. Zaobserwowano, że w kompozytach z silanem cząstki są rozłożone równomiernie w całej objętości, a elastomer otacza dokładnie każdą z nich. Jego brak powoduje, że cząstki sklejają się i tworzą aglomeracje, przez co powstają wolne przestrzenie pomiędzy cząstkami, a matrycą (rysunek 3.8). Odkryto jednak, że





Rysunek 3.7. Zdjęcia z mikroskopu prezentujące mikrostruktury kompozytów magnetoreologicznych z różną zawartością cząstek żelaza: (a) – 5 %, (b) – 15 %, (c) – 27 %, (d) – 35 % [100].

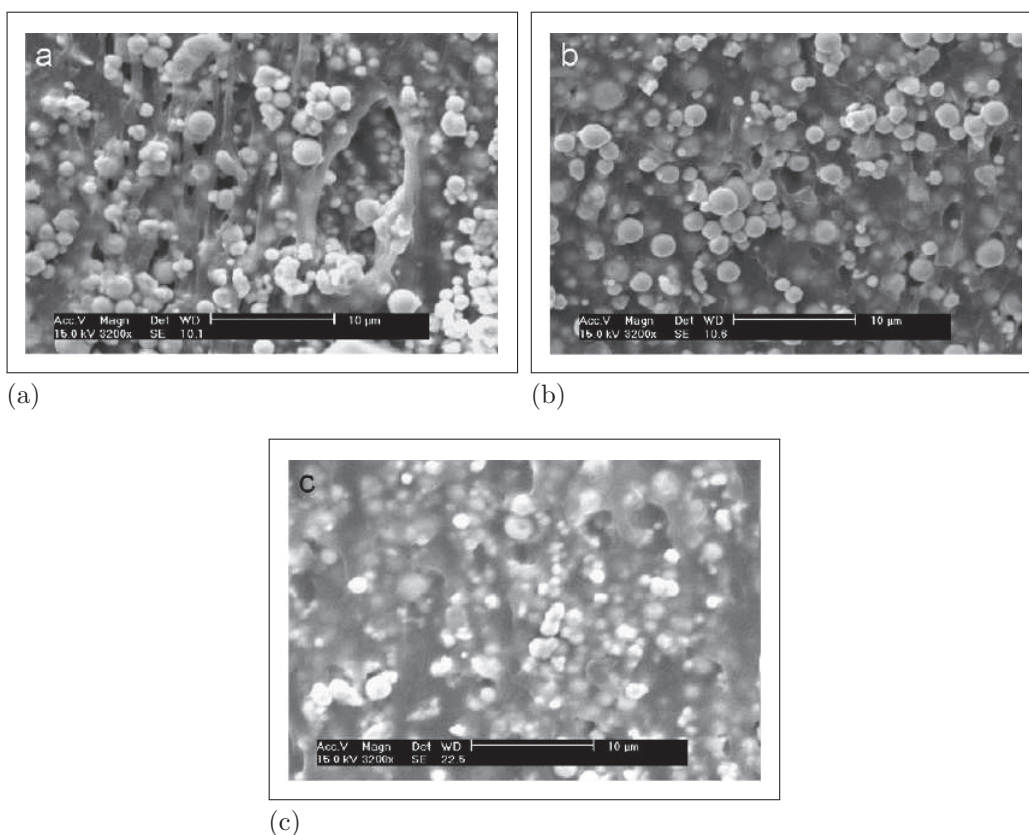
nie wszystkie rodzaje silanów zwiększają efekt magnetoreologiczny, niektóre wręcz go zmniejszają w porównaniu do materiału bazowego, pomimo polepszenia adhezji między cząstkami, a matrycą [71].



Rysunek 3.8. Zdjęcie z mikroskopu skaningowego przedstawiające kompozyt magnetoreologiczny bez silanu – (a) oraz z silanem – (b) [71].

- Dodanie sadzy do matrycy kompozytu wpływa na polepszenie wiązania matrycy z cząstkami żelaza, dzięki czemu wzrasta efekt magnetoreolo-

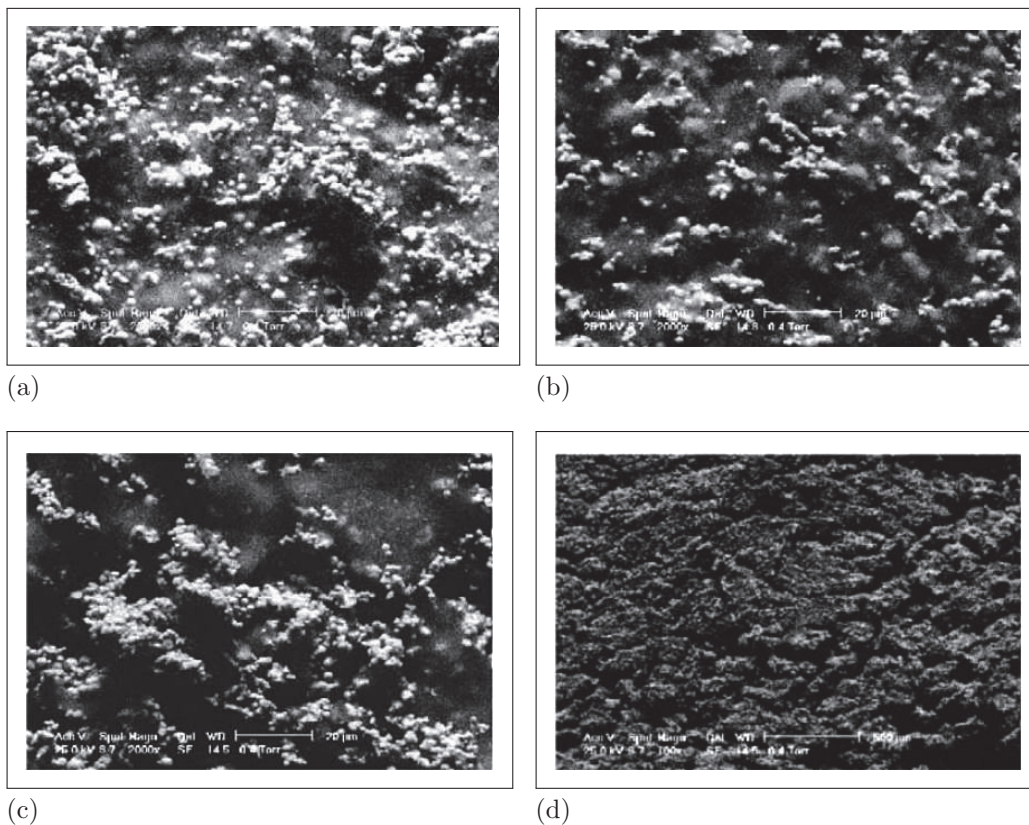
giczny i wytrzymałość na rozciąganie, chociaż maleje tłumienie kompozytu (rysunek 3.9) [97].



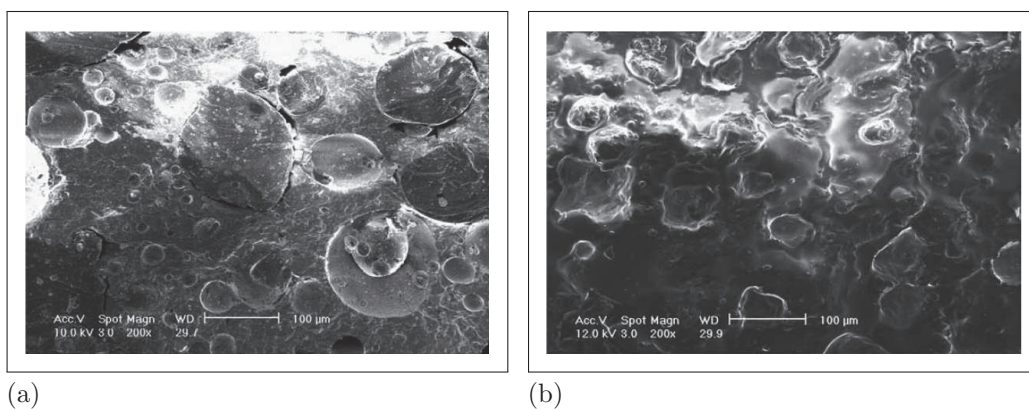
Rysunek 3.9. Zdjęcia mikroskopowe przedstawiające próbki anizotropowych kompozytów magnetoreologicznych zawierających 33 %: (a) – bez dodatku sadzy, (b) – z dodatkiem 4 % objętościowo sadzy, (c) – z dodatkiem 7 % objętościowo sadzy [97].

- Cząstki żelaza pokryte są cienką warstwą tlenków żelaza, przez co duża liczba tlenków wnika do materiału. Dodatkowo jony żelaza powodują przyspieszenie utleniania elastomeru, dlatego stosuje się również dodatki zapobiegające utlenianiu [77].
- Aby obniżyć wartość modułu Kirchhoffa przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, co z kolei umożliwi uzyskanie między innymi większego względnego efektu magnetoreologicznego, stosuje się plastyfikatory [79]. Zauważono, że cząstki magnetyczne w kompozycie z dodatkiem oleju silikonowego (rysunki 3.10 oraz 3.11) mają większą możliwość przemieszczania się, dzięki czemu w polu magnetycznym tworzą bardziej regularne struktury, co powoduje zwiększenie efektu magnetoreologicznego. Badania potwierdziły, że zwiększenie ilości oleju w kompozycie zwiększa względny efekt magnetoreologiczny, jednak tylko do pewnej wartości, po przekroczeniu której dalej maleje wartość modułu Kirchhoffa przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, ale również maleje efekt magnetoreologiczny [87]. Na wykresie 3.12 pokazano, że dodanie 30 % plastyfikatora masowo zwiększyło efekt magnetoreologiczny około dwukrotnie.



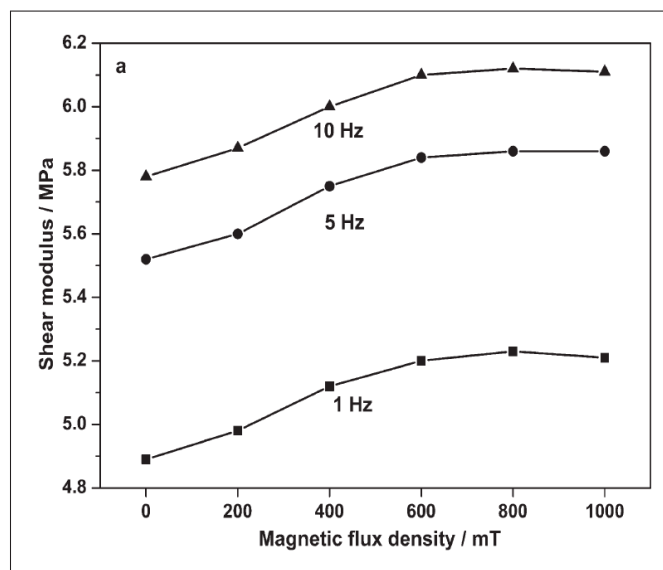


Rysunek 3.10. Mikrostruktury izotropowego kompozytu magnetoreologicznego z matrycą wykonaną z kauczuku silikonowego, zawierającego 60 % udziału masowego cząstek żelaza, z różną ilością dodatku oleju silikonowego: (a) – 0 %, (b) – 10 % masowo, (c) – 20 % masowo, (d) – 30 % masowo [87].

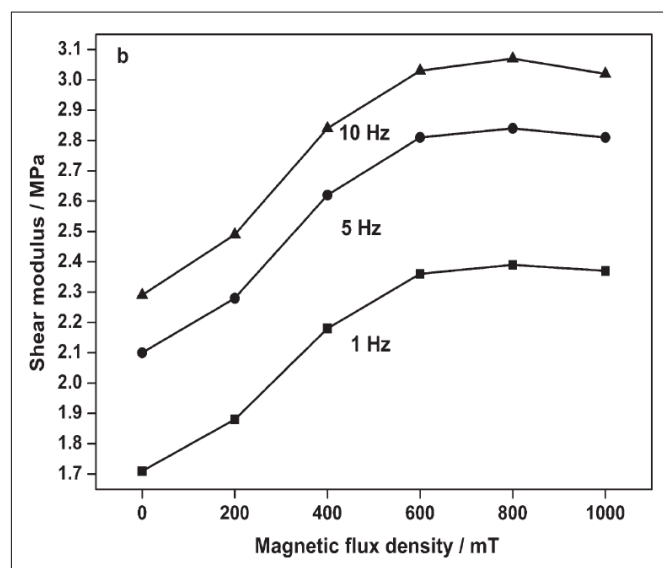


Rysunek 3.11. Zdjęcie spod mikroskopu skaningowego przedstawiające izotropowy kompozyt magnetoreologiczny z matrycą wykonaną z poliuretanu i kauczuku silikonowego bez oleju silikonowego – (a) oraz z olejem silikonowym – (b) [89].

- W celu poprawienia własności anizotropowego kompozytu magnetoreologicznego, zaproponowano dodanie miękkiej magnetycznie powłoki wyko-



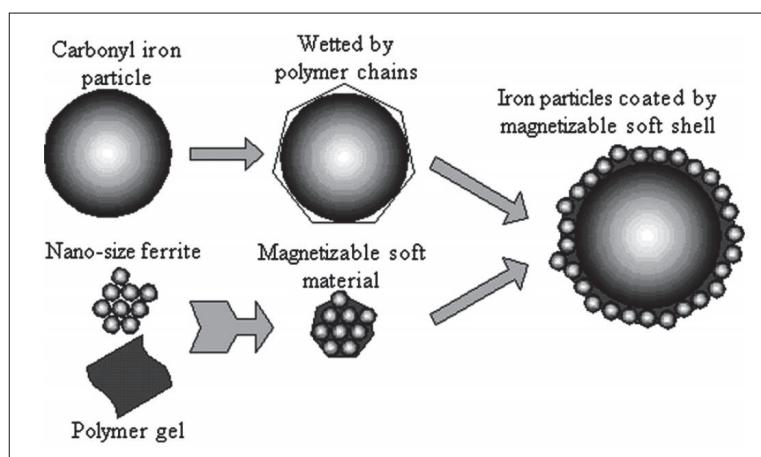
(a)



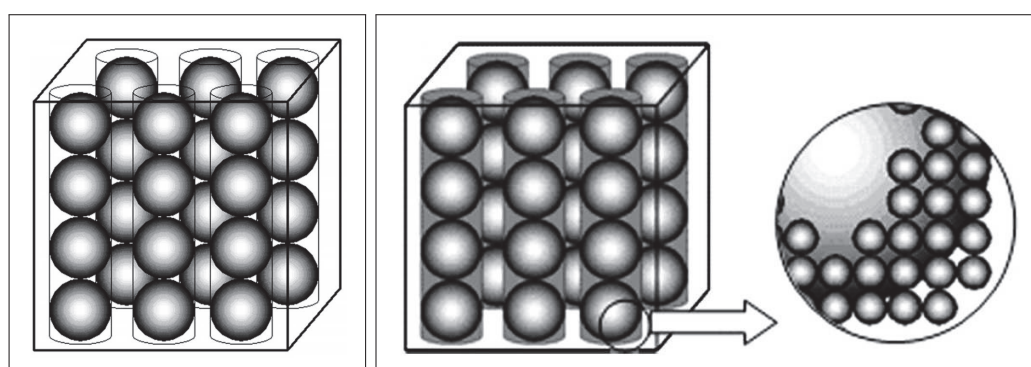
(b)

Rysunek 3.12. Wykresy pokazujące zależność wartości modułu odkształcalności postaciowej od wartości strumienia magnetycznego dla anizotropowego kompozytu magnetoreologicznego bez plastyfikatora – (a) oraz z dodatkiem 30 – % masowo plastyfikatora – (b) [107].

nanej z proszku ferrytowego o wymiarach mierzonych w nanometrach i żelu polimerowego. Technologię wytwarzania kompozytu przedstawiono schematycznie na rysunku 3.13a. Najpierw należy zwilżyć cząstki żelaza łańcuchami polimerowymi, potem wymieszać nanocząstki z polimerem w celu wytworzenia miękkiego magnetycznie materiału, którym następnie powleka się cząstki żelaza. Całość należy dodać do płynnego elastomeru. Podczas formowania struktur łańcuchowych w polu magnetycznym w czasie produkcji kompozytu, dodana miękka magnetycznie powłoka deformuje się, wypełniając wolne przestrzenie pomiędzy cząstkami żelaza [108].



(a)



(b)

(c)

Rysunek 3.13. Nowy typ anizotropowego elastomeru magnetoreologicznego z dodatkowymi nanocząstkami; (a) – technologia wytwarzania kompozytu magnetoreologicznego, (b) – schemat typowego anizotropowego kompozytu magnetoreologicznego, (c) – schemat anizotropowego kompozytu magnetoreologicznego z dodatkowymi nanocząstkami [108].

Oprócz struktury i składu samego kompozytu, na jego własności mechaniczne mają także wpływ czynniki zewnętrzne. Efekt magnetoreologiczny zmniejszany jest przez wysoką temperaturę w jakiej pracuje kompozyt [109]. Dlatego projektując układy zawierające te materiały należy uwzględnić odpowiednie odprowadzanie ciepła, które wytwarzają stosowane najczęściej cewki elektromagnesu.

### 3.2. Technologia wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych

Technologię wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych determinuje przede wszystkim rodzaj materiału, z jakiego wykonana jest matryca. Procesy zdecydowanie różnią się nawet dla materiałów z jednej grupy. Dla przykładu: wulkanizacja kauczuków silikonowych zachodzi w temperaturze do 150 °C pod wpływem nadtlenków organicznych, lub w temperaturze pokojowej z zastosowaniem katalizatorów [110]. Oprócz temperatury ważnym

parametrem jest także czas utwardzania. W przypadku niektórych elastomerów, podczas tego procesu wymagane jest również podwyższone ciśnienie. Ze względu na ogromną ilość gatunków elastomerów dostępnych na rynku, nie sposób wymienić wszystkich wartości parametrów, jakie są konieczne do utrzymania podczas produkcji, gdyż są one różne dla poszczególnych materiałów.

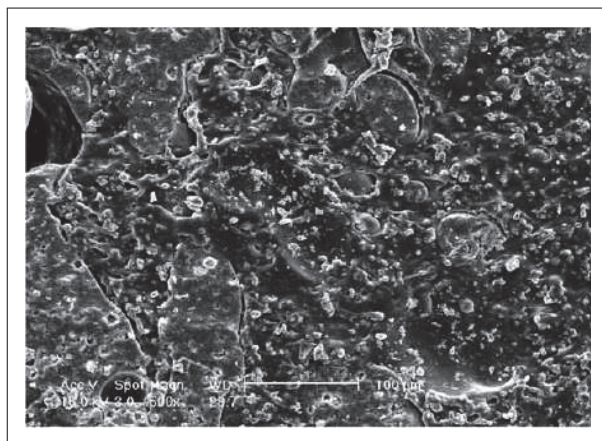
W przypadku stosowania niektórych gatunków elastomerów istnieje ryzyko dostania się do matrycy pęcherzyków powietrza, niekorzystnie wpływających na jej parametry mechaniczne. Dlatego technologie wytwarzania niektórych elastomerów magnetoreologicznych, opisywanych w literaturze przedmiotu, obejmowały również odpowietrzanie poprzez umieszczenie ich w komorze z obniżonym ciśnieniem [70, 81, 87, 88].

W przypadku matryc stanowiących mieszaninę kilku składników, należy uwzględnić kolejność ich dodawania w czasie produkcji. Naukowcy z University of Science and Technology of China badali kompozyt izotropowy, w którym matrycę stanowiła mieszanka poliuretanu i kauczuku silikonowego. Wytwarzając jedną grupę próbek mieszano wszystkie składniki (poliuretan, kauczuk silikonowy oraz żelazo karbonylowe) jednocześnie, podczas gdy w drugiej grupie najpierw mieszano składniki matrycy, a dopiero później dodawano cząstki żelaza. Materiały te miały identyczny skład, jednak różniły się strukturą (rysunek 3.14). W kompozytach, w których wszystkie składniki mieszano jednocześnie, zarejestrowano efekt magnetoreologiczny o ponad rząd większy niż w materiałach wykonanych drugą metodą, ale stwierdzono też pogorszenie własności fizycznych [89, 90].

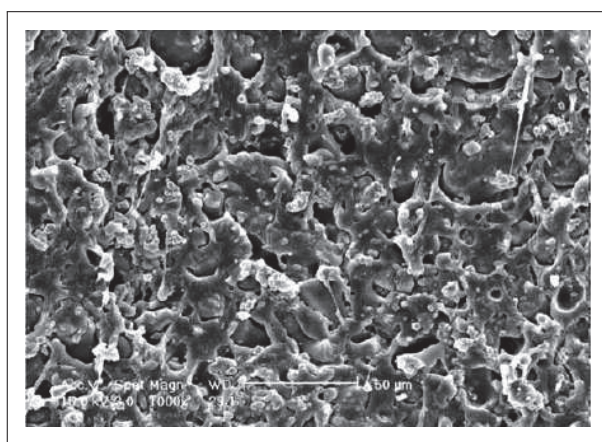
Kolejnym czynnikiem wpływającym na proces wytwarzania jest obecność (kompozyty anizotropowe) lub brak (kompozyty izotropowe) pola magnetycznego w czasie utwardzania matrycy z cząstkami ferromagnetyku. W publikacjach dotyczących materiałów anizotropowych nie ma podanej jednej wartości natężenia pola magnetycznego potrzebnego do ułożenia cząstek ferromagnetycznych w struktury łańcuchowe. Niektóre próbki podczas utwardzania umieszczano w polu magnetycznym o stosunkowo niewielkiej indukcji: 130 mT [81], lub 180 mT [81], inne natomiast w polu o indukcji 0,7 T [80], 0,8 T [86], 1 T [72, 111], lub nawet do 1,3 T [68]. Różny był też czas, na jaki próbki umieszczano w polu magnetycznym: od kilkunastu minut [86], aż do kilkudziesięciu godzin [80].

Należy mieć na uwadze, że lepkość niektórych elastomerów w pierwszej fazie utwardzania może być stosunkowo niewielka, co wpływa na sedymentację cząstek. Jedną z możliwości wyeliminowania tego zjawiska jest obracanie próbki w polu magnetycznym, w czasie jej utwardzania [96]. Starano się także usunąć problem sedymentacji poprzez cykliczne podgrzewanie próbek w czasie procesu wytwarzania z dużą częstotliwością [104]. Innym niebezpieczeństwem jest ryzyko powstania aglomeracji cząstek w kompozytach anizotropowych, w wyniku wzajemnych oddziaływań magnetycznych pomiędzy poszczególnymi cząstkami. Rozwiązaniem tego problemu może być stopniowe narastanie indukcji magnetycznej od 0 mT w czasie utwardzania matrycy [96]. Można również zastosować warstwowe wytwarzanie kompozytu. Cząstki umieszcza się w specjalnej matrycy, a następnie zalewa warstwą płynnego elastomeru o grubości równej zakładanej odległości pomiędzy





(a)



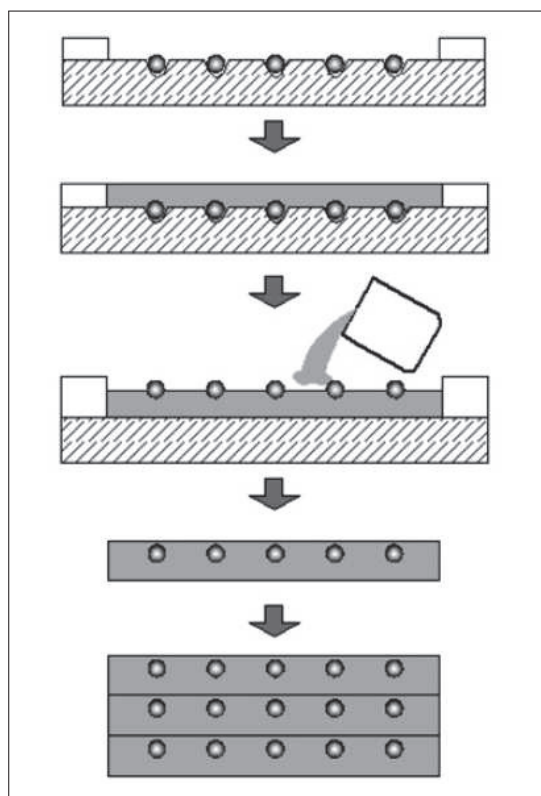
(b)

Rysunek 3.14. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego przedstawiające różnice w strukturze kompozytu magnetoreologicznego wynikające z różnej kolejności mieszania składników: (a) – poliuretan, kauczuk silikonowy oraz żelazo karbonylkowe mieszano jednocześnie, (b) – najpierw mieszano poliuretan z kauczukiem silikonowym, a następnie dodawano cząstki żelaza [89].

cząstkami. Czynność powtarza się do uzyskania materiału o żądanej grubości (rysunek 3.15) [103].

### 3.3. Badania elastomerów magnetoreologicznych

Badania elastomerów magnetoreologicznych, opisane w literaturze przedmiotu, obejmują przede wszystkim ścinanie próbek, a także ich ściskanie oraz rozciąganie w polu magnetycznym o różnym natężeniu, w celu określenia ich własności magneto – mechanicznych. Dodatkowo w niektórych ośrodkach badawczych prowadzono dodatkowe testy mające na celu poznanie innych cech, takich jak choćby parametrów elektrycznych kompozytów magnetoreologicznych.



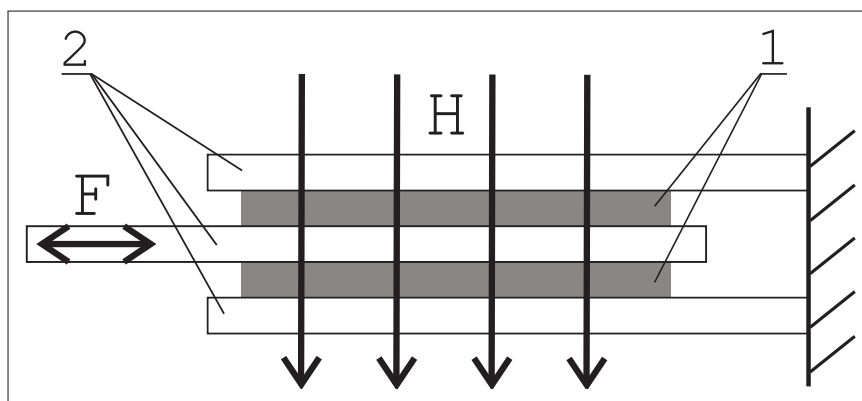
Rysunek 3.15. Schemat warstwowego wytwarzania kompozytów magnetoreologicznych [103].

### 3.3.1. Badania elastomerów magnetoreologicznych w warunkach ścinania

Na rysunku 3.16 przedstawiono schemat ścinania dla tzw. podwójnej próbki. Plastry kompozytu w kształcie prostokątów przyklejano pomiędzy trzy płytki mocujące tak, żeby umożliwić ruch środkowej płytki względem dwóch skrajnych. Prostopadle do powierzchni próbek skierowano wektor natężenia pola magnetycznego. Płytki mocujące wykonywano z aluminium [71, 89, 99, 100], miedzi [87, 88], mosiądzu [71, 74, 75, 89, 99, 100], lub stali [69, 79, 99]. Do sklejania próbek kompozytowych i płytek mocujących najczęściej stosowano kleje cyjanoakrylowe [74, 75, 85, 99]. Do badań opisanych w literaturze stosowano próbki o różnych wymiarach. Od najcieńszych, których długość x szerokość x grubość wynosiła odpowiednio 20 x 7,5 x 1 [69], poprzez próbki o wymiarach 20 x 15 x 2 [75], 20 x 15 x 2 [74, 79, 99], 30 x 10 x 2 [100], 10 x 10 x 3 [97], 30 x 8 x 3 [71], 28 x 7 x 4 [89], aż po najgrubsze o wymiarach 30 x 10 x 6 [87, 88] (wymiary podane w mm).

Względny ruch płytek wymuszano najczęściej sygnałem o przebiegu sinusoidalnym, z kontrolowaną wartością amplitudy przemieszczenia, albo odkształcenia. Stosowano głównie małe amplitudy sygnału wymuszenia. W przypadku sterowania przemieszczeniem były to wartości nawet z zakresu od 0,00017 mm do 0,11 mm, przy czym były to wtedy sygnały o stosunkowo dużej częstotliwości, z zakresu od 100 Hz do 1000 Hz [75]. Amplitudy odkształ-





Rysunek 3.16. Schemat ścinania próbek kompozytu magnetoreologicznego. 1 – próbki elastomeru magnetoreologicznego, 2 – płytki mocujące, H – wektor pola magnetycznego, F – siła ścinająca.

czenia mieściły się głównie w przedziale od 0,6 % do 2,5 % [99]. Zakres stosowanych częstotliwości wymuszenia sięgał od 1 Hz [99] aż po 1250 Hz [85, 99].

Trudno porównać pole magnetyczne działające na próbki kompozytu magnetoreologicznego podczas badań w poszczególnych ośrodkach naukowych, gdyż w niektórych publikacjach podawane są wartości natężenia pola magnetycznego, w innych natomiast autorzy podają wartości indukcji magnetycznej. Analizując tylko podawane wartości indukcji magnetycznej widać, iż ich rozrzut był duży od 0 T, poprzez 0,3 T, 0,55 T, 0,8 T aż do 1 T [69, 75, 85, 87, 99].

Analizując literaturę przedmiotu można zauważyć dużą rozbieżność w otrzymywanych wynikach. Naukowcy z SAC Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials oraz z uniwersytetu z Hefei w Chinach uzyskali ponad dwukrotny wzrost modułu Kirchhoff'a dla kompozytów anizotropowych przy częstotliwości wymuszenia 30 Hz i wzroście indukcji magnetycznej od 0 do 900 mT. Odpowiadało to bezwzględnej zmianie modułu o blisko 0,8 MPa [111]. Również dwukrotny wzrost wartości modułu Kirchhoff'a zmierzono dla próbek zawierających dodatkowo sadzę. W polu magnetycznym o indukcji 800 mT wartość modułu próbki ścinanej cyklicznie z amplitudą odkształcenia 0,3 % i częstotliwością wymuszenia 1 Hz wzrósł od 3,87 MPa do 4,03 MPa. Wynik taki uzyskano dla próbki zawierającej 33 % objętościowo cząstek żelaza i 6 % objętościowo sadzy. Zmniejszenie udziału sadzy powodowało zmniejszenie efektu magnetoreologicznego [97].

Z kolei w ośrodku badawczym firmy Lord, dla podobnych materiałów, zarejestrowano wzrost modułu na poziomie 39 %, co odpowiadało bezwzględnej zmianie modułu o 0,29 MPa. Wynik ten otrzymano dla próbki zawierającej 20 % objętościowo żelaza karbonylkowego, ścinanej cyklicznie z częstotliwością 2 Hz i amplitudą odkształcenia równą 1 %. Indukcję pola magnetycznego zmieniano od 0 T do 0,8 T. W innych badaniach, dla próbki zawierającej 30 % żelaza, otrzymano bezwzględny wzrost modułu wynoszący 0,56 MPa, jednak przez większą wartość modułu zerowego (mierzonego przy braku działania pola magnetycznego) otrzymano 31 % zmiany względnej [69].

Prowadzono także badania wpływu plastyfikatora na efekt magnetoreolo-

giczny [107]. Testowano kompozyty wypełnione cząstkami żelaza karbonylkowego w polu magnetycznym do 1000 mT. Po dodaniu plastyfikatora do kompozytu izotropowego zwiększono wzrost efektu magnetoreologicznego z 3,5 % do 78,6 %, natomiast w przypadku kompozytu anizotropowego plastyfikator spowodował wzrost tego efektu blisko sześćdziesięciokrotnie do wartości 386,7 %.

Kompozyty magnetoreologiczne poddawano ścinaniu zarówno cyklicznemu, jak i jednokierunkowemu ze stałą prędkością. Dla anizotropowych elastomerów magnetoreologicznych ścinanych z prędkością 1 mm/min, zarejestrowano wzrost modułu Kirchhoffa o 8 % dla kompozytu z matrycą z kauczuku naturalnego zawierającego 20,1 % żelaza oraz o 28 % dla kompozytu z matrycą poliuretanową zawierającego 25 % żelaza. Efekt wywołano zmianą pola magnetycznego o 0,395 T [80].

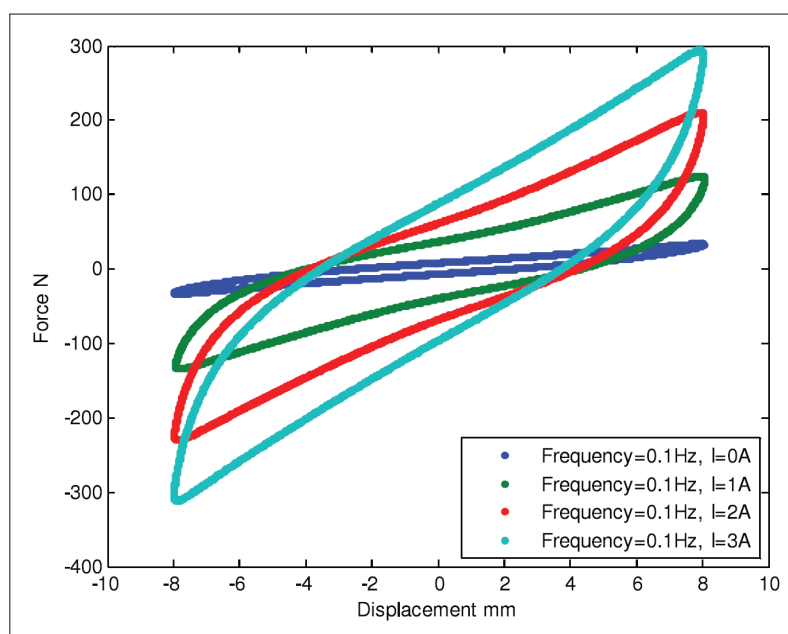
Do badań kompozytów magnetoreologicznych używano także reometru ścinania dynamicznego, umożliwiającego określenie wartości składowych modułu  $G$ . Eksperyment prowadzono przy wymuszeniu cyklicznym ze stałą amplitudą odkształcenia równą 1 % i częstotliwością 10 Hz. Do badań wytworzono kompozyty anizotropowe oraz izotropowe z matrycą silikonową, z których część wypełniono cząstkami żelaza karbonylkowego o średnicy około 5  $\mu m$ , a część cząstkami o średnicy około 40  $\mu m$ . Dla każdej z wymienionych grup przygotowano próbki zawierające od 0 do 35 % żelaza objętościowo. W badaniach kompozytów wypełnionych jedynie cząstkami żelaza karbonylkowego, największy efekt magnetoreologiczny zaobserwowano dla próbek zawierających najwięcej żelaza. Dodatkowo większy wpływ pola magnetycznego stwierdzono w kompozytach anizotropowych, dla których wartość modułu sprężystości  $G'$  wzrosła blisko 9 razy (od 320 kPa do 2800 kPa), podczas gdy w przypadku kompozytów izotropowych mniej niż 5 razy (od 150 kPa do 700 kPa), przy wzroście indukcji magnetycznej od 0 do 700 mT. W przeciwieństwie do próbek zawierających małe cząstki, dla materiału wypełnionego cząstkami o średnicy około 40  $\mu m$ , większy efekt magnetoreologiczny uzyskano w kompozytach izotropowych. Dla materiału anizotropowego wartość modułu sprężystości  $G'$  pod wpływem działania pola magnetycznego wzrosła 60 razy (od 50 kPa do 3000 kPa), podczas gdy w kompozytach izotropowych ponad 80 razy (od 30 kPa do 2500 kPa) przy zawartości cząstek 30 % objętościowo. Zauważono również, że kompozyty wypełnione dużymi cząstkami żelaza do 30 % objętościowo były bardziej elastyczne niż sam silikon stanowiący ich matrycę [92].

W podobnym reometrze badano kompozyty o idealnie jednorodnej strukturze. Identyczne odległości pomiędzy poszczególnymi cząstkami uzyskano poprzez zalewanie płynnym elastomerem kolejnych warstw ułożonych w formie sferycznych cząstek żelaza. Dla materiału zawierającego 11 % objętościowo cząstek żelaza, uzyskano zmianę modułu o około 18 %, przy zwiększeniu natężenia pola magnetycznego podczas badania od 0 do 400 kA/m. Do oszacowania wartości modułu przyjęto quasi-statyczny model materiału [103].

Poprzez ścinanie badano także zmiany częstotliwości rezonansowej układu z kompozytem magnetoreologicznym. Drgania układu wymuszano za pomocą wzbudnika, rejestrując jednocześnie jego odpowiedź. Dla kompozytu z matrycą wykonaną z silikonu, wypełnioną cząstkami żelaza o średnicy rzędu

5  $\mu\text{m}$ , z dodatkiem oleju silikonowego (proporcje wagowe poszczególnych składników 1:3:1) uzyskano ponad dwukrotny wzrost częstotliwości drgań własnych (od 25 Hz do 53 Hz), przy zmianie indukcji magnetycznej od 0 do 108 mT [112].

Analizując literaturę przedmiotu można zauważyć, że dopiero w najnowszych publikacjach autorzy zaczęli przedstawiać otrzymane podczas eksperymentów pętle histerezy. Na wykresie 3.17 zaprezentowano pętle histerezy uzyskane podczas ścinania izotropowego kompozytu magnetoreologicznego jako zależność siły od przemieszczenia przy stałych wartościach amplitudy przemieszczenia i częstotliwości wymuszania. Wyraźnie widać, że wraz ze wzrostem natężenia prądu zasilającego cewki elektromagnesu rośnie maksymalna wartość zarejestrowanej siły oraz pole powierzchni pętli. Zaprezentowane na wykresie wyniki uzyskano dla próbek wykonanych z gumy krzemowej z dodatkiem oleju, wypełnionych żelazem karbonylkowym stanowiącym 22,9 % ich objętości [113]. Wykres 3.18 prezentuje natomiast pętle histerezy uży-

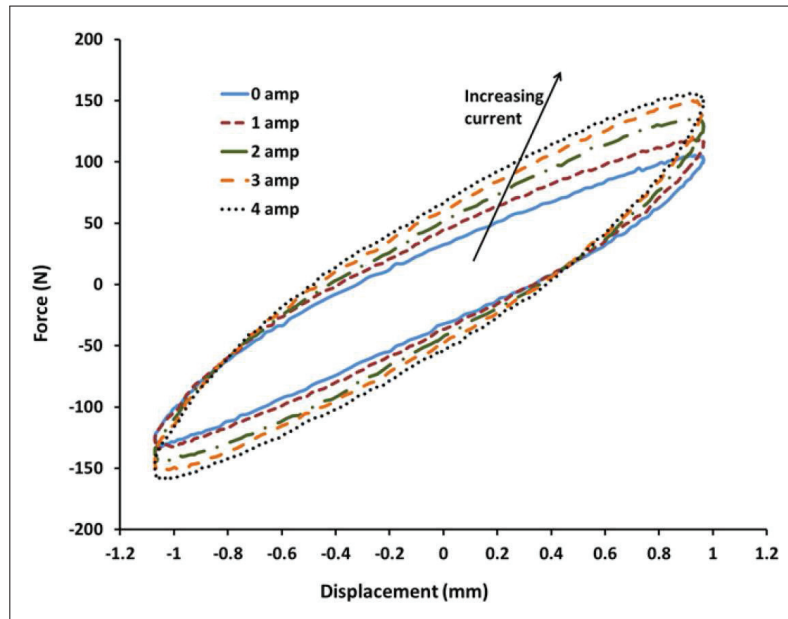


Rysunek 3.17. Pętle histerezy pokazujące zależność siły od przemieszczenia przy różnych wartościach prądu zasilającego cewki elektromagnesu przy stałej wartości amplitudy przemieszczenia i częstotliwości wymuszania dla kompozytu izotropowego [113].

skane dla kompozytu anizotropowego poddawanego ścinaniu z częstotliwością 0,1 Hz. Badane próbki kompozytu wypełnione były żelazem karbonylkowym stanowiącym 80 % ich masy [114].

### 3.3.2. Badania elastomerów magnetoreologicznych w warunkach ściskania

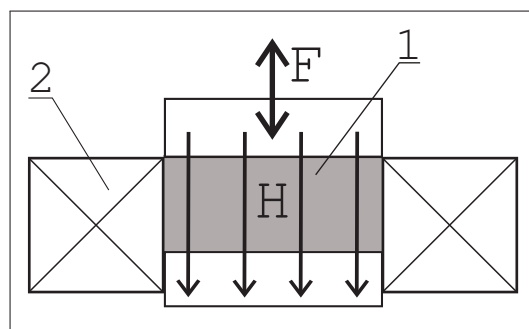
Kolejny rodzaj testów, jakim poddaje się elastomery magnetoreologiczne, to ściskanie. Do indukowania pola magnetycznego w próbce stosowano cewkę (rysunek 3.19a), lub magnes stały (rysunek 3.19b). Badania próbek zgodne



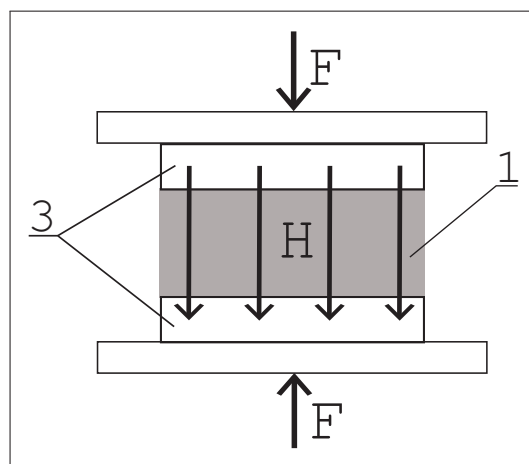
Rysunek 3.18. Pętle histerezy pokazujące zależność siły od przemieszczenia, przy różnych wartościach prądu zasilającego cewki elektromagnesu, przy stałej wartości amplitudy przemieszczenia i częstotliwości wymuszenia dla kompozytu anizotropowego [114].

ze schematem zaprezentowanym na rysunku 3.19a wymagają wstępnego ściśnięcia. Prowadzono takie badania między innymi w VTT Technical Research Centre of Finland, ściskając cyklicznie anizotropowe oraz izotropowe próbki cylindryczne o średnicy 50 mm i wysokości 20 mm, zawierające 30 % objętościowo cząstek żelaza karbonylowego [70]. Podczas badań zauważono, że przy zwiększaniu amplitudy obciążania próbek anizotropowych bez pola magnetycznego, malała ich sztywność. To zjawisko powodowane rozrywaniem i przeorganizowaniem łańcuchów cząstek żelaza nazywane jest efektem Payna. Badania kompozytów prowadzono w zakresie częstotliwości wymuszenia od 0,5 Hz do 15 Hz i amplitudzie wymuszenia od 1 % do 10 %. W trakcie badań dynamicznych indukcja pola magnetycznego dochodziła do 0,35 T. Dla układów drgających zbudowanych z testowanych materiałów wyznaczono wartości współczynnika sztywności. Maksymalny wzrost jego wartości wywołany działaniem pola magnetycznego wynoszący 12,2 %, zarejestrowano dla kompozytu anizotropowego przy maksymalnej częstotliwości wymuszenia. Dla materiału izotropowego uzyskano zbliżone wartości. Zauważono wyraźny wpływ częstotliwości wymuszenia na współczynnik stratności. Dla kompozytów anizotropowych wzrost tego współczynnika przekraczał 30 %, przy częstotliwości wymuszenia 0,5 Hz i spadał do 13,3 %, przy 15 Hz. Dla takich samych parametrów wzrost tego współczynnika był wyższy o kilka procent dla kompozytu izotropowego.

W takiej samej konfiguracji (rysunek 3.19a) przeprowadzono badania porównawcze anizotropowych elastomerów magnetoreologicznych wypełnionych sferycznymi cząstkami żelaza o średnicy 6 – 10  $\mu\text{m}$  z anizotropowymi elastomerami magnetoreologicznymi wypełnionymi nanodrutami o długości



(a)



(b)

Rysunek 3.19. Schematy ściskania próbek kompozytu magnetoreologicznego. Układ pomiarowy z elektromagnesem – (a), układ pomiarowy z magnesem stałym – (b). Oznaczono: 1 – próbka elastomeru magnetoreologicznego, 2 – cewka, 3 – magnes stały, H – wektor natężenia pola magnetycznego, F – siła ściskająca.

15  $\mu\text{m}$  i średnicy około 300 nm. Próbki obu typów kompozytów były wałkami o średnicy 9,5 mm i wysokości 25,4 mm. Kompozyty ściskano cyklicznie, wymuszając odkształcenie o przebiegu sinusoidalnym z amplitudą odkształcenia 1 % i częstotliwością z zakresu 1 – 20 Hz. Podczas testów zmieniano wartość indukcji magnetycznej od 0 do 0,2 T. Porównywano pola pętli histerezy we współrzędnych naprężenie – przemieszczenie. Przedstawiono wyniki dla materiałów zawierających 10 % wypełniacza wagowo. Przy częstotliwości wymuszania równej 1 Hz, dla kompozytów wypełnionych żelazem proszkowym, pole pętli histerezy wzrosło ponad 4 razy, podczas gdy dla materiałów z nanodrutami niewiele ponad 3 razy. Kompozyty drugiego typu miały jednak zdecydowanie większe pętle histerezy bez pola magnetycznego, przez co zarejestrowano mniejszą zmianę względną, przy większej zmianie wartości bezwzględnej. Dodatkowo stwierdzono, że zwiększenie częstotliwości wymuszania powodowało zdecydowane zmniejszenie wpływu pola magnetycznego na własności tłumiące obu typów kompozytów. Zaprezentowano także wartości sztywności dynamicznej dla kompozytów zawierających 30 % wypełniacza wagowo. Maksymalny wzrost wywołany działaniem pola magnetycznego



zarejestrowany dla kompozytu wypełnionego żelazem proszkowym wynosił około 40 %, natomiast dla kompozytu z nanodrutami około 15 %. Co prawda dla obu typu materiałów zarejestrowano niemal identyczny wzrost wartości bezwzględnej sztywności dynamicznej, ale dla kompozytu z nanodrutami jej wartość przy braku pola magnetycznego była blisko 3,5 raza wyższa [106].

Oprócz badań cyklicznych, stanowiska zgodne ze schematem 3.19a wykorzystywano także do ściskania próbek ze stałą prędkością. Na Politechnice Warszawskiej ściskano z prędkością 5 mm/min próbki walcowe o średnicy 20 mm i wysokości 25 mm, wypełnione proszkiem żelaza karbonylowego o średnicach z przedziału 6 – 9  $\mu\text{m}$ . Przy indukcji magnetycznej podczas testów równej 0,3 T, uzyskano wyniki pokazujące wyraźny wzrost rejestrowanego naprężenia wraz ze wzrostem udziału cząstek żelaza w materiale. Dodatkowo wynik ten był wyższy dla próbek anizotropowych. Przy odkształceniu równym 0,3 dla próbki izotropowej zawierającej 1,5 % żelaza objętościowo zarejestrowano naprężenie niewiele przekraczające 0,05 MPa, podczas gdy dla próbki anizotropowej zawierającej 33 % żelaza objętościowo uzyskano wynik 0,5 MPa [115].

W szwajcarskim laboratorium Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research badano kompozyty magnetoreologicznie zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.19b. Ściskano próbki cylindryczne o średnicy 14 mm i wysokości 14 mm zawierające 27 % cząstek żelaza objętościowo z prędkością 1 mm/min przy braku pola magnetycznego oraz w polu magnetycznym. Takim samym testom poddano również próbki czystego elastomeru. Największą sztywność zarejestrowano dla próbki zawierającej cząstki żelaza ułożone w struktury kolumnowe wzdłuż kierunku ściskania testowanej w obecności pola magnetycznego [81].

Prowadzono także badanie z użyciem magnesów stałych, ale na stanowisku umożliwiającym regulację ich położenia, dzięki czemu możliwe było uzyskanie wartości pośrednich natężenia pola magnetycznego działającego na badane próbki [116]. Próbki walcowe o wymiarach zgodnych ze standardem ASTM (wysokość 9,5 mm i średnica 19 mm), zawierające 30 % objętościowo cząstek żelaza o średnicy 10  $\mu\text{m}$ , poddawano wstępnemu odkształceniu równemu 5 %, a następnie cyklicznie odkształcano z amplitudą 10 % i częstotliwością wymuszenia pomiędzy 0,1 Hz, a 1 Hz. Indukcję magnetyczną zmieniano od 0 do 0,6 T co 0,1 T. Zarejestrowano maksymalny efekt magnetoreologiczny bliski 40 % przy maksymalnym natężeniu pola magnetycznego dla minimalnej częstotliwości wymuszania. Wzrost częstotliwości powodował nieznaczny spadek zmierzonego efektu magnetoreologicznego.

Stanowisko do ściskania próbek z magnesem stałym wykorzystano także do porównania anizotropowych i izotropowych elastomerów magnetoreologicznych różniących się oprócz uporządkowania cząstek także twardościami matrycy. Badano próbki walcowe o średnicy 25 mm i wysokościach 4, 6 oraz 25 mm, a także sześciiany o długości boku 18 mm wypełnione cząstkami żelaza  $Fe_2O_4$  o średnicy około 8,4  $\mu\text{m}$ . Poprzez dodawanie do poszczególnych próbek różnych ilości utwardzacza (od 3 do 4,5 % wagowo) uzyskano 4 różne twardości matryc. Badania prowadzono bez pola magnetycznego oraz z magnesem stałym zamocowanym pod próbką, dla którego zmierzono indukcje magnetyczną równą 0,44 T. Przeprowadzono testy ze stałą częstotliwością

1 Hz i amplitudami przemieszczenia od 0,02 mm do 0,8 mm, a następnie ścisano próbki ze stałą amplitudą przemieszczenia 0,2 mm i częstotliwością zmienianą od 0,1 do 100 Hz. Zauważono wyraźnie większą pętlę histerezy dla kompozytów anizotropowych niż dla izotropowych. Zbadano wpływ pola magnetycznego na zmianę wartości modułu  $E$  dla poszczególnych próbek. Dla kompozytów anizotropowych zanotowano maksymalny wzrost modułu o ponad 30 % dla próbek, których matryce zawierały najmniejszą ilość utwardzacza, podobnie jak dla kompozytów izotropowych, jednak dla nich wzrost modułu dochodził do 70 % [117].

Poprzez cykliczne ściskanie, badano także zmiany częstotliwości rezonansowej układu z kompozytem magnetoreologicznym. Wymuszano wzbudzeniem drgania układu, rejestrując jednocześnie jego odpowiedź. Dla kompozytu z matrycą wykonaną z silikonu, wypełnioną cząstkami żelaza o średnicy rzędu  $5 \mu\text{m}$ , z dodatkiem oleju silikonowego (proporcje wagowe poszczególnych składników 1:3:1) uzyskano wzrost częstotliwości drgań własnych o blisko 80 % (od 48 Hz do 85 Hz), przy zmianie indukcji magnetycznej od 0 do 155 mT [112].

### 3.3.3. Badania elastomerów magnetoreologicznych w warunkach rozciągania

Kolejny rodzaj testów jakim poddawano próbki to rozciąganie. Dla próbek walcowych o średnicy 7 mm i długości 50 mm badano zależność naprężenia od odkształcenia ( $dL/L$ ), które narastało liniowo, dla dwóch skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego: 0 i 123 kA/m. Dla próbek izotropowych nie zarejestrowano zauważalnej zmiany, która z kolei była widoczna dla próbek anizotropowych. Dla tego rodzaju próbek maksymalna zmiana naprężenia przekraczała 10 kPa przy odkształceniu 0,05 dla próbek zawierających 5 % żelaza objętościowo, natomiast dla próbek o pięciokrotnie większej zawartości żelaza zanotowano już naprężenie 30 kPa przy odkształceniu 0,04 [96].

Przeprowadzono również badania, w których zarejestrowano zamiany wywołane działaniem pola magnetycznego także dla materiału izotropowego. Rozciągano próbki walcowe o średnicy 4 mm i wysokości 10 mm zawierające 36 % mieszaniny małych i dużych cząstek żelaza objętościowo. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej podczas badań wynosiła 210 mT. Na podstawie zarejestrowanych pętli histerezy (w układzie naprężenie – odkształcenie), uwzględniając odcinki prostoliniowe wykresów, wyznaczano wartość modułu elastyczności. Przeprowadzono także analizę wpływu amplitudy odkształcenia na efekt magnetoreologiczny, z której wynika że największe zmiany odpowiadają odkształceniu równemu 1 %. Przy tym odkształceniu wartość amplitudy odkształcenia wzrosła blisko 100 razy, wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego [104].

Rozciągano także próbki prostopadłościennne o wymiarach 10 x 10 x 3 mm. Próbki anizotropowych oraz izotropowych elastomerów magnetoreologicznych rozciągano z częstotliwością od 0,1 Hz do 40 Hz, z amplitudą odkształcenia od 0,1 % do 40 %, w polu magnetycznym od 0 do 800 mT. Maksymalny zmierzony efekt magnetoreologiczny wynosił około 80 %. War-

tość ta uzyskana została dla próbek anizotropowych zawierających 70 % masowo proszku żelaza karbonylkowego dla indukcji pola magnetycznego około 600 mT. W przypadku materiału izotropowego maksymalna zmierzona wartość efektu magnetoreologicznego dochodziła do 60 % dla próbek zawierających 80 % masowo proszku żelaza karbonylkowego. Z kolei współczynnik stratności  $\tan(\delta)$  osiągnął maksymalną wartość dla obu typów próbek zawierających 60 % masowo proszku żelaza karbonylkowego, przy czym była ona większa dla materiału izotropowego. Maksima osiągnięto podczas badań w niskich temperaturach, dla około  $-90$  °C. Wartość współczynnika stratności rosła wraz ze wzrostem odkształcenia, ale malała przy zwiększaniu natężenia pola magnetycznego [68].

Poprzez rozciąganie badano również wpływ dodatku sadzy na własności mechaniczne kompozytów magnetoreologicznych. Dla próbek, które oprócz 33 % objętościowo cząstek żelaza zawierały dodatkowo 7 % sadzy, zanotowano wytrzymałość na rozciąganie większą o blisko 50 % od próbek bez tego składnika [97].

Rozciągano także próbki bez pola magnetycznego, w celu porównania parametrów wytrzymałościowych materiałów zawierających chaotycznie rozmieszczone cząstki żelaza oraz ułożone w struktury wzdłużne oraz poprzeczne. Dla próbek prostopadłościennych o wymiarach 60 x 10 x 4 mm zawierających 27% cząstek żelaza objętościowo, rozciąganych z prędkością 50 mm/min najszybszy przyrost naprężenia zarejestrowano dla próbki, dla której kierunek rozciągania był prostopadły do łańcuchów cząstek [81].

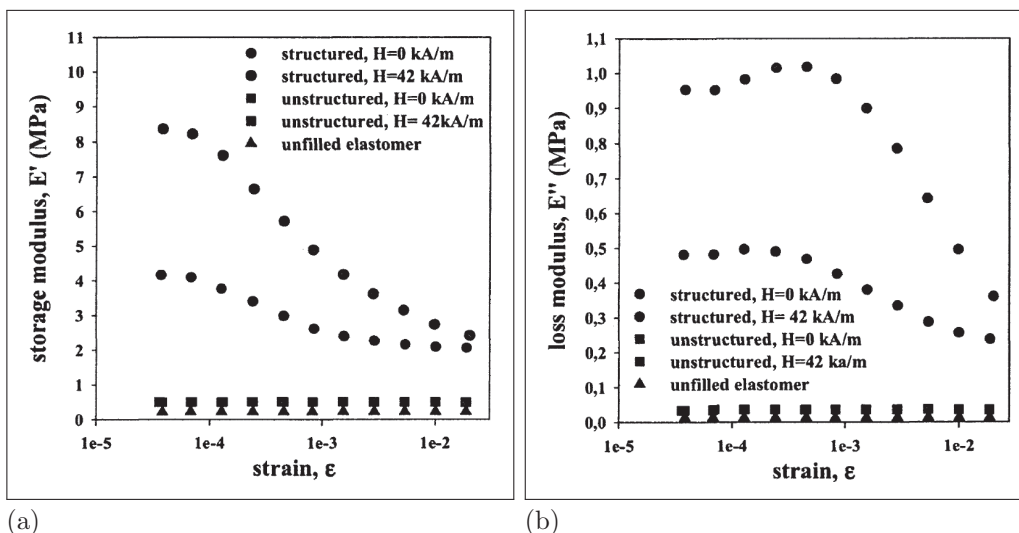
#### **3.3.4. Badanie dynamicznych efektów czasowych w elastomerach magnetoreologicznych**

Na uniwersytecie w Nicei przebadano zależność modułu sprężystości od odkształcenia (wykres 3.20a) oraz modułu stratności (wykres 3.20b) dla skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego [96]. Do wytworzenia badanych kompozytów użyto cząstek żelaza karbonylkowego, które stanowiły od 5 do 30 % objętości próbek. Na prezentowanych wykresach przedstawiono zależności uzyskane dla materiałów o największym udziale cząstek. Zauważyć można, iż pod wpływem działania pola magnetycznego wartości obu modułów wzrosły maksymalnie blisko dwukrotnie.

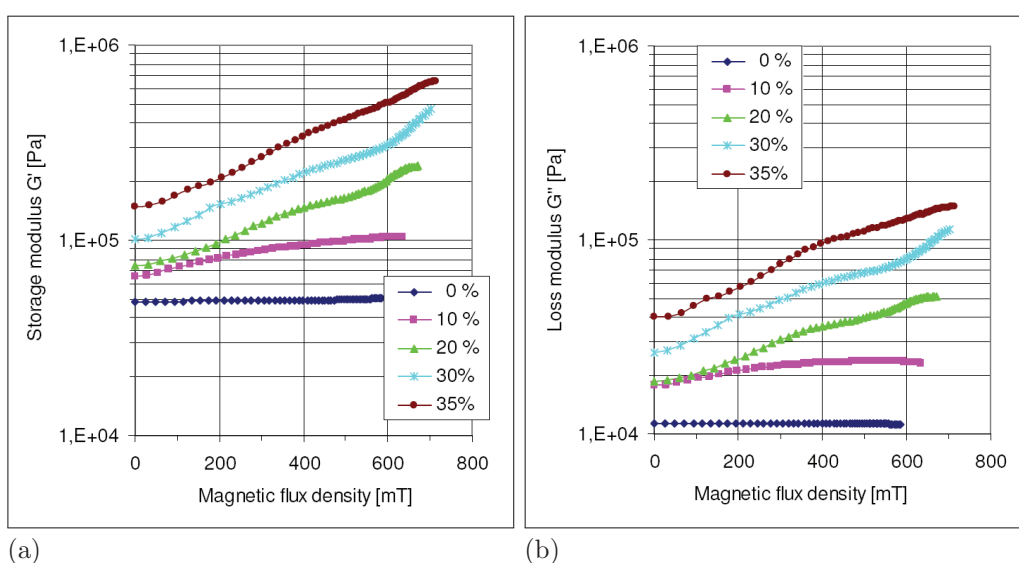
W niemieckim instytucie Fraunhofera, wyznaczono wartości modułu zachowawczego oraz modułu stratności dla kompozytów izotropowych wypełnionych cząstkami o średnicy około  $5 \mu\text{m}$  z firmy BASF (wykres 3.21) oraz dla kompozytów izotropowych wypełnionych cząstkami o średnicy około  $40 \mu\text{m}$  z firmy *Höganäs* (wykres 3.22) [92]. Dla obu typu kompozytów widać, że zależność wartości modułów rośnie wraz ze wzrostem udziału cząstek magnetycznych.

#### **3.3.5. Inne badania elastomerów magnetoreologicznych**

Poza ścinaniem, ściskaniem oraz rozciąganiem, elastomery magnetoreologiczne poddawano także innym testom. Mierzono między innymi magnetystrycję w kompozytach magnetoreologicznych anizotropowych oraz izotropowych. Do badań używano próbek walcowych, o powierzchni podstawy rów-

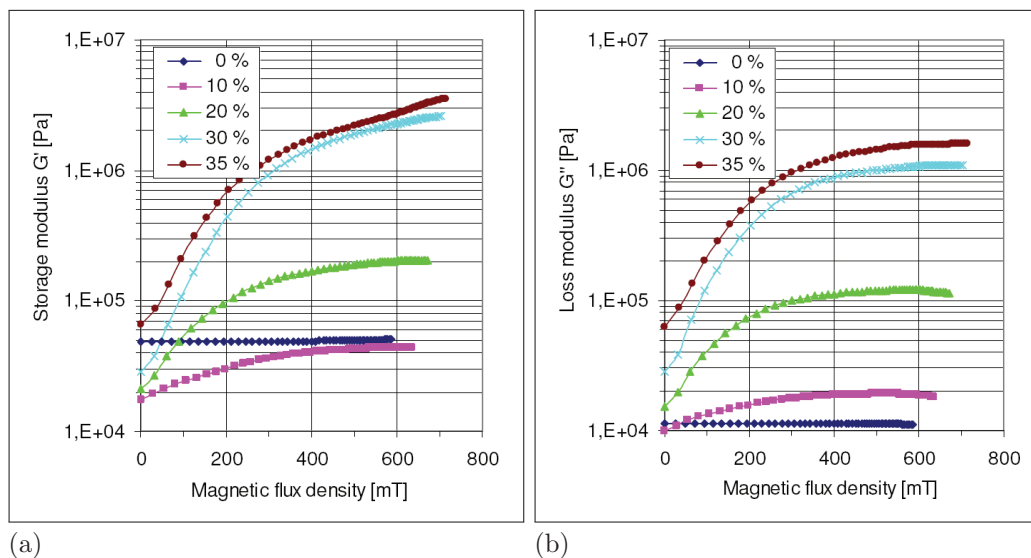


Rysunek 3.20. Wykres zależności modułu zachowawczego – (a) oraz modułu stratności – (b) od odkształcenia dla skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego przy częstotliwości wymuszania 5 Hz, dla próbek zawierających 30 % żelaza karbonylkowego objętościowo [96].



Rysunek 3.21. Wykres zależności modułu zachowawczego – (a) oraz modułu stratności – (b) dla materiałów izotropowych wypełnionych cząstkami o średnicy około 5  $\mu\text{m}$  [92].

nej 12  $\text{mm}^2$  i wysokości 30 mm, zawierających od 0 do 27 % cząstek żelaza karbonylkowego objętościowo. Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego podczas eksperymentów wynosiła 636 kA/m. Zauważono wyraźną zależność magnetostrykcji od ilości cząstek żelaza. Dla próbek izotropowych uzyskano 24 ppm dla materiału zawierającego 15 % cząstek żelaza objętościowo i 134 ppm dla materiału o największej zawartości żelaza. Wyraźny wpływ na magnetostrykcję miało także ułożenie cząstek. Dla próbek zawie-



Rysunek 3.22. Wykres zależności modułu zachowaawczegoi – (a) oraz modułu stratności – (b) dla materiałów izotropowych wypełnionych cząstkami o średnicy około  $40 \mu m$  [92].

rających 27 % objętościowo cząstek żelaza ułożonych wzdłużnie magnetostrykcja wynosiła 56 ppm, podczas gdy dla takiej samej zawartości żelaza ale ułożenia poprzecznego zarejestrowano 183 ppm. Autorzy badań zauważyli, że magnetostrykcja czystego żelaza karbonylkowego wynosząca około 10 ppm jest znacznie mniejsza niż uzyskana podczas badań, co sugeruje że magnetostrykcja elastomerów magnetoreologicznych wynika z oddziaływań pomiędzy cząstkami żelaza oraz matrycą [118].

Magnetostrykcję występującą w elastomerach magnetoreologicznych mierzono również w laboratoriach Forda [86]. Do badań użyto cylindrycznych próbek o średnicy 9,5 mm i długości 11 mm. Wartość wstępnego naprężenia wynosiła 100 kPa. Wektor natężenia pola magnetycznego skierowany był wzdłuż osi symetrii próbki. Zmierzona magnetostrykcja dochodziła do 3000 ppm.

Kompozyty magnetoreologiczne stanowiły przedmiot badań także w polskich ośrodkach badawczych. Na Politechnice Warszawskiej próbki walcowe o średnicy 8 mm i wysokości 18 mm, wypełnione proszkiem żelaza karbonylkowego o średnicach z przedziału  $6 - 9 \mu m$ , umieszczano pionowo na specjalnym stanowisku pomiarowym, a następnie podobnie jak w 3-punktowym zginaniu odchyłano ich oś od pionu, w kształt litery „C”. Po włączeniu pola magnetycznego, którego wektor natężenia działał pionowo, odkształcone próbki wykazywały tendencje powrotu do pierwotnej, pionowej osi. Skalę tego zjawiska określano poprzez pomiar przemieszczenia poziomego środka próbki. Największe przemieszczenie zarejestrowano dla próbki anizotropowej zawierającej 11,5 % cząstek żelaza objętościowo. Mniejsze wartości uzyskano dla próbek zawierających zarówno mniej jak i więcej żelaza [115].

W Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research w Szwajcarii próbki prostopadłościennie o wymiarach  $60 \times 10 \times 4$  mm, zawierające



27 % żelaza objętościowo, z jednej strony mocowano, a do drugiego, swobodnego końca przybliżano magnes stały. Dla różnych odległości pomiędzy magnesem, a swobodnym końcem próbki mierzono natężenie pola magnetycznego wyindukowanego w próbce oraz jej odkształcenie. Porównywano otrzymane wyniki dla próbek zawierających chaotycznie rozmieszczone cząstki żelaza z wynikami dla próbek, w których cząstki ułożone były wzdłużnie oraz poprzecznie. Stwierdzono największą sztywność na zginanie w przypadku próbki z nieuporządkowanymi cząstkami żelaza [81].

Kompozyty magnetoreologiczne badano także w układach drgających. Do badania kompozytu anizotropowego zbudowano układ składający się z masy dynamicznej, masy statycznej, elektromagnesu oraz badanego kompozytu. Podczas pracy układu, kompozyt był ścinany. Całość zamocowano do stalowej belki utwierdzonej na obu końcach. Podczas eksperymentu za pomocą wzbudnika wymuszano drgania belki. Zaobserwowano wzrost częstotliwości rezonansowej wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego indukowanego w elastomerze magnetoreologicznym od 27,5 Hz do 40 Hz [111].

Z kolei w laboratoriach Forda badano materiał anizotropowy, umieszczając go pomiędzy dwiema masami. Badany kompozyt miał kształt cylindra o średnicy 60 mm oraz wysokości 2 mm i zawierał 27 % objętościowo żelaza karbonylowego o średnicy około 3  $\mu m$ . Wymuszano sygnałem sinusoidalnym drgania masy bazowej i rejestrowano odpowiedź drugiej masy. Elementem układu była także cewka wytwarzająca pole magnetyczne. Średnie natężenie indukcji magnetycznej zmieniało się od 0 do 0,56 T. Zarejestrowano 20 % przesunięcia częstotliwości rezonansowej przy 0,56 T. Wyznaczono także zmianę modułu Kirchhoff'a, wywołaną wzrostem natężenia pola magnetycznego, sięgającą maksymalnie do około 40 % (od 5 MPa do 7 MPa) [86].

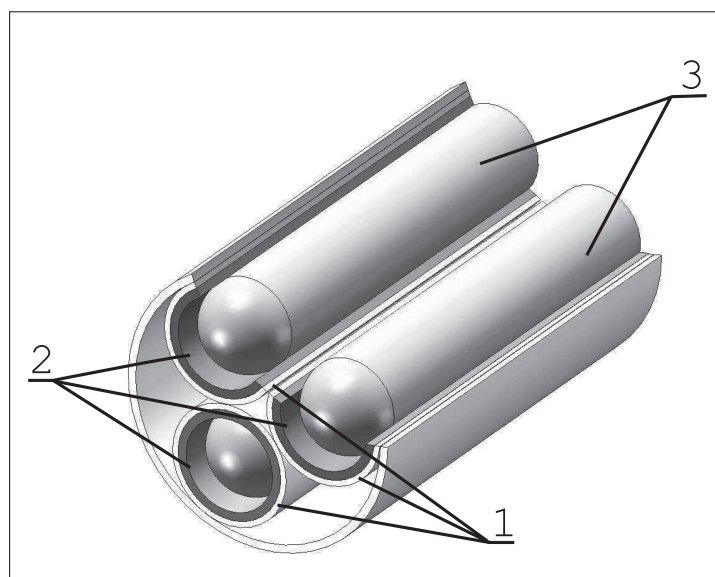
Oprócz własności mechanicznych elastomerów magnetoreologicznych, charakteryzowano także ich własności elektryczne. Eksperymentalnie wykazano, że można zewnętrznym polem magnetycznym zmieniać wartość rezystancji elektrycznej kompozytów magnetoreologicznych [119, 120].

### 3.4. Zastosowania elastomerów magnetoreologicznych

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-tych XX wieku, jednak ich ilość zaczęła rosnąć dopiero po roku 2000. Opatentowano zarówno sam materiał [63], jak i aplikacje które wykorzystują unikatowe własności tych kompozytów. Można zauważyć, iż do tej pory patentowano głównie rozwiązania z anizotropowymi elastomerami magnetoreologicznymi.

O tym że kompozyty magnetoreologiczne mają duży potencjał do szerokiego zaistnienia 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. Prowadzone są tam badania mające umożliwić wdrożenie tych materiałów do przemysłu. W broszurach reklamowych firmy znaleźć można na przykład informacje o badaniach prowadzonych dla US Navy, 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 (rysunek 3.23). W do-

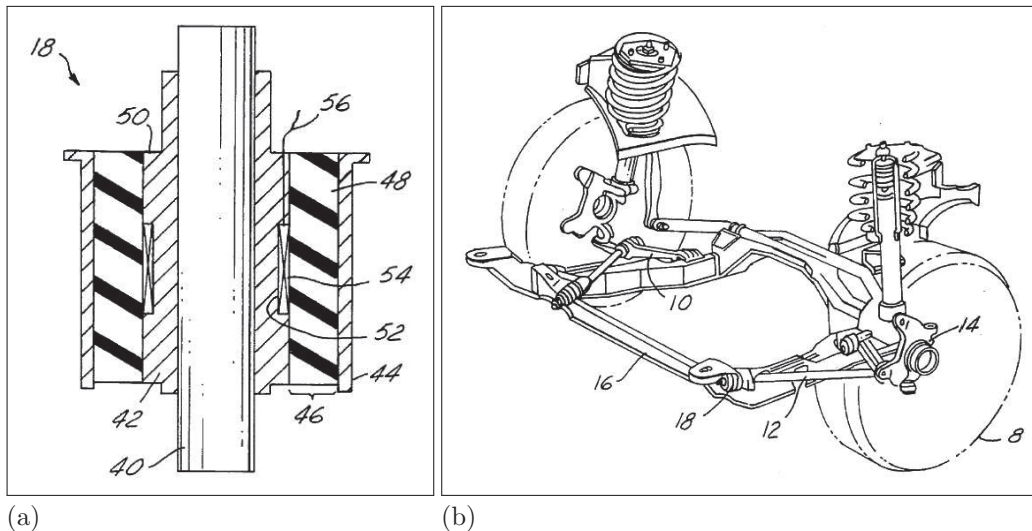


Rysunek 3.23. Schemat układu z wkładkami tłumiącymi o zmiennej sztywności do systemu wystrzeliwania pocisków w okrętach podwodnych: 1 – osłona zewnętrzna, 2 – wkładka z elastomeru magnetoreologicznego, 3 – pociski.

tychczasowych 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 ilość patentów wykorzystujących kompozyty magnetoreologiczne.

Jeden z pierwszych patentów wykorzystujących elastomery magnetoreologiczne, opracowany właśnie w Ford Motor Company [121], dotyczy regulacji sztywności elementu zawieszenia pojazdu poprzez zastosowanie tulei o regulowanej sztywności. W rozwiązaniu tym elastomer magnetoreologiczny umieszczony jest pomiędzy dwiema tulejami (rysunek 3.24a), z których wewnętrzna połączona jest z ruchomym elementem zawieszenia, natomiast zewnętrzna z nadwoziem (rysunek 3.24b). Dodatkowym elementem układu jest cewka umieszczona pomiędzy kompozytem, a wewnętrznym cylindrem, w której indukowane jest pole magnetyczne regulujące sztywność kompozytu magnetoreologicznego. Według autorów patentu rozwiązanie to może zmniejszyć nadsterowność i podsterowność samochodu, a także ograniczyć hałas wywołany drganiami nadwozia.

Podobne rozwiązanie wykorzystano do eliminacji drgań tarcz hamulcowych [122]. Wykorzystano w nim opisany już element składający się z dwóch cylindrów rozdzielonych warstwą elastomeru magnetoreologicznego. Sztywność kompozytu zmienia się poprzez regulowanie natężenia prądu płynącego



Rysunek 3.24. Schemat systemu regulacji sztywności elementu zawieszenia pojazdu: (a) – przekrój tulei z elastomerem magnetoreologicznym, gdzie: (42) – cylinder wewnętrzny, (44) – cylinder zewnętrzny, (48) – elastomer magnetoreologiczny, (54) – cewka, (b) – widok przedniego zawieszenia z widoczną tuleją o regulowanej sztywności (18) [121].

w cewce nawiniętej na warstwę elastomeru. Wartość natężenia prądu zadawana jest przez system sterujący, na podstawie danych przesyłanych z czujnika w układzie hamulcowym.

Bazując między innymi na opisanych wcześniej patentach, opracowano metodę szybkiej regulacji parametrów fizycznych elastomerowych elementów w samochodach [123]. W tradycyjnych rozwiązaniach elementy elastomerowe, czyli między innymi tuleje w zawieszeniu, elementy mocowania silnika, układu przeniesienia napędu, czy układu wydechowego, mają niezmiennie własności fizyczne. Zastępując je elastomerami magnetoreologicznymi i dodając układ sterujący, można regulować ich sztywność, a przez to między innymi poziom hałasu, drgań, wpływać na tzw. nurkowanie pojazdu podczas hamowania, nadsterowność, podsterowność, czy prowadzenie samochodu. W opisie patentu zaznaczono, że zmiana sztywności któregośkolwiek z elementów elastomerowych zmienia funkcję obciążenia innych elementów, a co za tym idzie wpływa na parametry całego układu. Dlatego w patentowanej metodzie uwzględniono w procesie sterowania wszystkie elementy.

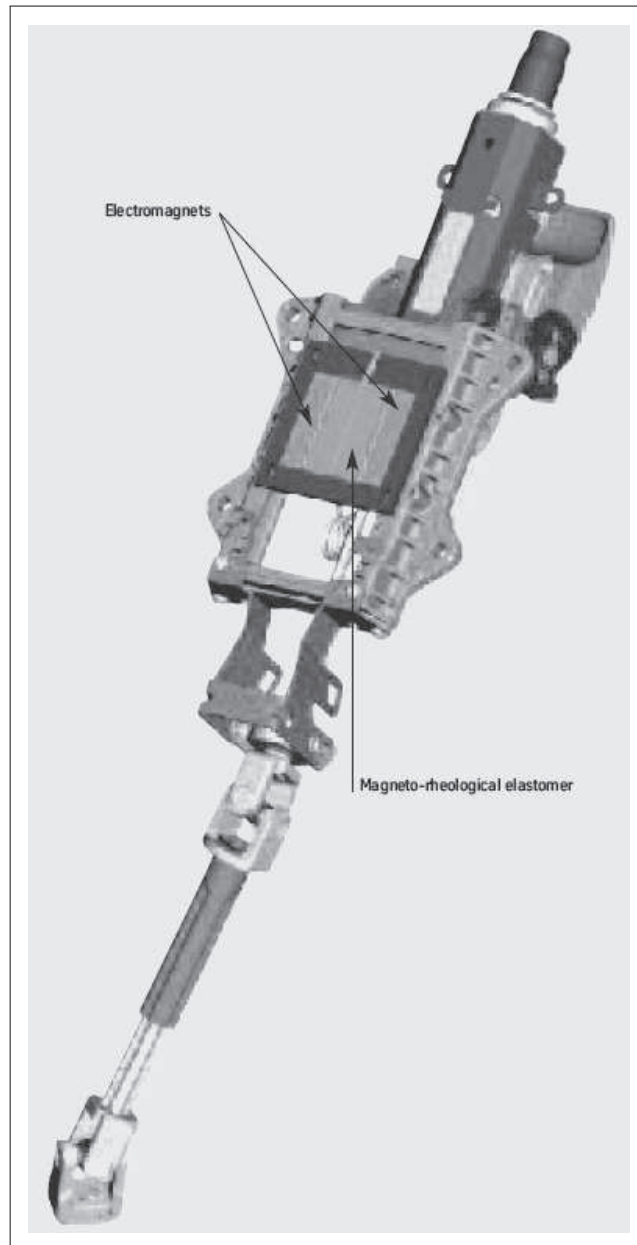
W laboratoriach Forda (Ford Global Technologies) opracowano również urządzenie do pomiaru w czasie jazdy przemieszczenia i siły w zawieszeniu samochodowym [124]. W urządzeniu tym elastomer magnetoreologiczny umieszczony jest, podobnie jak w opisanych wcześniej patentach [121], pomiędzy dwoma cylindrami, z których wewnętrzny cylinder łączy się z ruchomym elementem zawieszenia pojazdu, natomiast zewnętrzny cylinder z nadwoziem. Pomędzy 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 kolumnę kierownicy z adaptacyjnym systemem pochłaniającym energię w czasie wypadku [125]. 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 sedimentacja, chemiczna niestabilność, a także trudna dostępność na rynku z powodu jednego tylko 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 (rysunek 3.25).

Z kolei w General Motors Corporation opracowano układ absorbujący energię uderzenia podczas wypadku [126]. Może być 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 (rysunek 3.26). 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 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 zaprojektowania przedniego zderzaka o optymalnym kształcie, wykorzystującego unikatowe własności kompozytów magnetoreologicznych do poprawy bezpieczeństwa. Gdyby wykorzystać efekt magnetostrykcji oraz użyć materiałów z pamięcią kształtu, można byłoby skonstruować zderzak, który po kolizji wracałby do pierwotnego kształtu [127].

Firmy samochodowe patentują nie tylko rozwiązania mające typowo motoryzacyjne zastosowania. W General Motors Corporation opracowano sys-

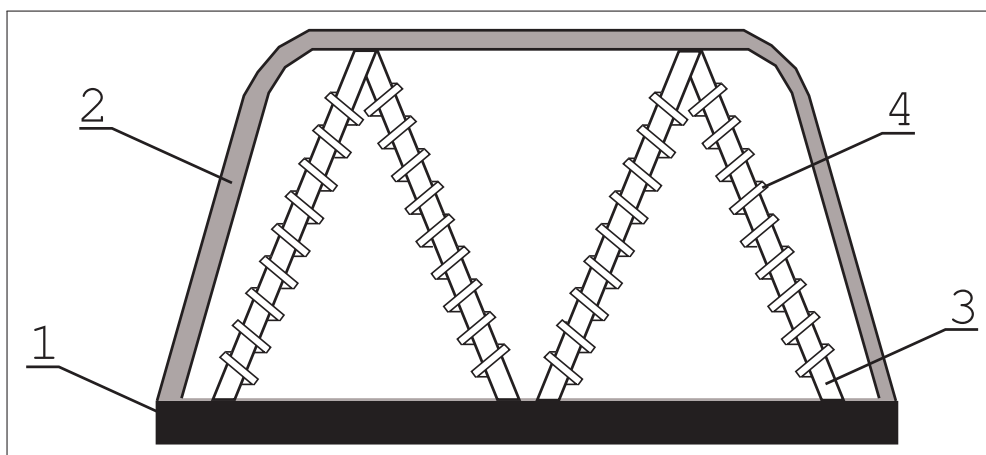


Rysunek 3.25. Kolumna kierownicy z adaptacyjnym systemem pochłaniającym energię uderzenia w czasie wypadku opracowana w firmie ThyssenKrupp AG [125].

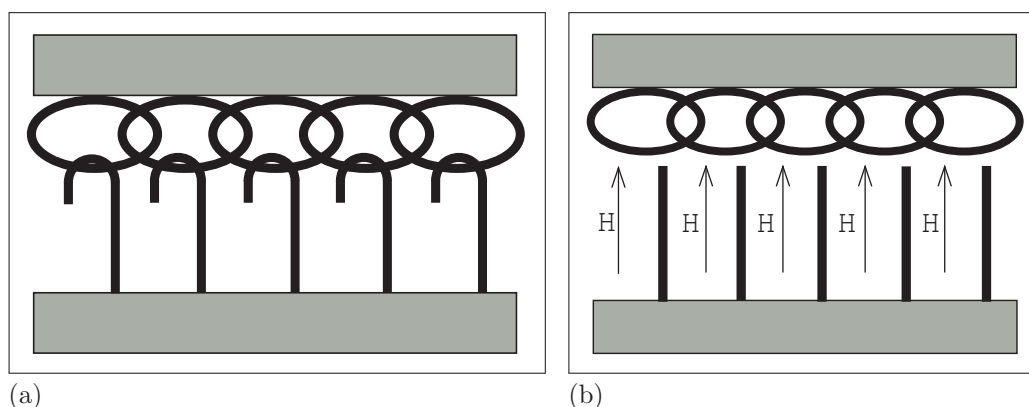
tem zaczepów rozłączanych polem magnetycznym [128, 129]. Opatentowany system przedstawiono schematycznie na rysunku 3.27. Składa się on z elementów w kształcie pętli i zaczepionych o nie haczyków z elastomeru magneto-reologicznego (rysunek 3.27a). Pod wpływem działania pola magnetycznego haczyki prostują się, układając wzdłuż kierunku wektora natężenia pola magnetycznego, przez co następuje rozłączenie obu elementów (rysunek 3.27b). Podczas gdy oba elementy są ze sobą połączone, cały układ pełni również funkcję tłumika drgań. Dodatkowy system sterujący reguluje sztywność elementów magneto-reologicznych tak, aby wyeliminować wibracje.

Zaczepy otwierane i zamykane przy użyciu pola magnetycznego wyko-





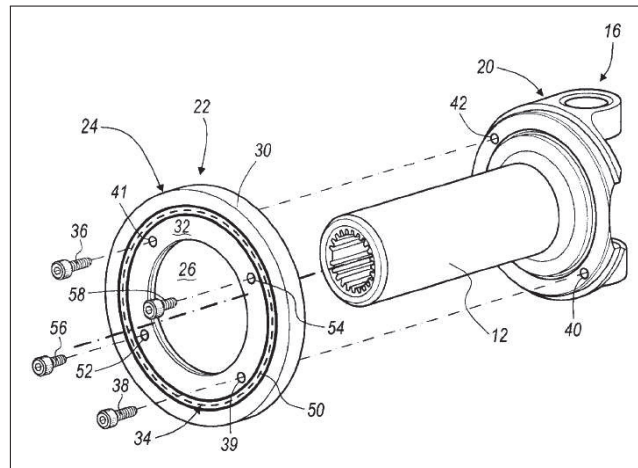
Rysunek 3.26. Schemat układu absorbującego energię uderzenia podczas wypadku: 1 – sztywna podstawa, 2 – elastyczna pokrywa, 3 – elastomer magnetoreologiczny, 4 – cewka [126].



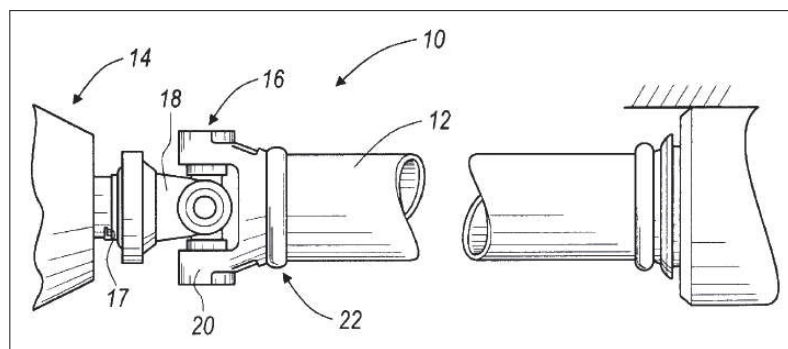
Rysunek 3.27. Zaczepy magnetoreologiczne (a) – połączone, (b) – rozłączone, po włączeniu pola magnetycznego [128, 129].

rzystano w General Motors Corporation do opracowania całego systemu rozłącznego mocowania różnych podzespołów samochodu [130]. 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.

Kolejnym przykładem zastosowania elastomerów magnetoreologicznych w przemyśle samochodowym jest system redukcji drgań samochodowego wału napędowego [131]. W tym rozwiązaniu tłumik drgań, ograniczający przeniesienie drgań z wału napędowego na nadwozie, jest mocowany do przegubu (rysunek 3.28). Zbudowany jest z dwóch pierścieni: zewnętrznego (pozycja 30 na rysunku 3.28a) oraz wewnętrznego (pozycja 32), pomiędzy którymi



(a)



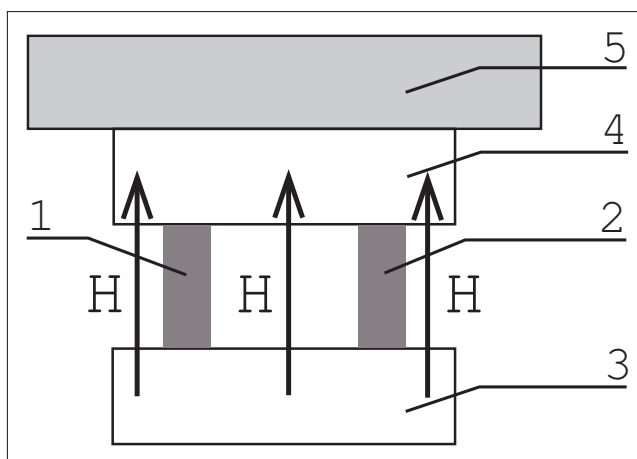
(b)

Rysunek 3.28. System redukcji drgań wału napędowego; (a) – Widok przegubu (16) wraz z tłumikiem drgań (22): 30 – pierścień zewnętrzny, 32 – pierścień wewnętrzny, 50 – elastomer magnetoreologiczny, (b) – widok ogólny wału napędowego (12) z przegubem (16) [131].

umieszczony jest pierścień wykonany z elastomeru magnetoreologicznego (pozycja 50). Pole magnetyczne, zmieniające jego sztywność, uzyskuje się dzięki zastosowaniu śrub (pozycje 56 oraz 58) wykonanych z materiału paramagnetycznego. Zmianę natężenia pola magnetycznego indukowanego w elastomerze magnetoreologicznym wywołuje się poprzez dokręcenie lub odkręcenie śrub tak, aby dostroić tłumienie do częstotliwości drgań wału napędowego.

Własności mechaniczne elastomerów magnetoreologicznych predysponują je do tłumienia drgań, dlatego głównie wykorzystuje się je właśnie w urządzeniach tłumiących. Kolejnym przykładem takiego zastosowania jest adaptacyjny tłumik drgań zgłoszony do opatentowania przez Georgia Tech Research Corporation z USA [132]. Proponowane urządzenie może być rozwiązaniem pośrednim pomiędzy 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, przez co 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, przez co znaleźć może szersze możliwości zastosowania niż urządzenie o stałej charakterystyce, przy jednocześnie niskiej cenie. W proponowanym rozwiązaniu elementy wykonane z elastomeru magnetoreologicznego umieszczone są pomiędzy dwiema, płasko leżącymi masami (rysunek 3.29). Masy te mogą być

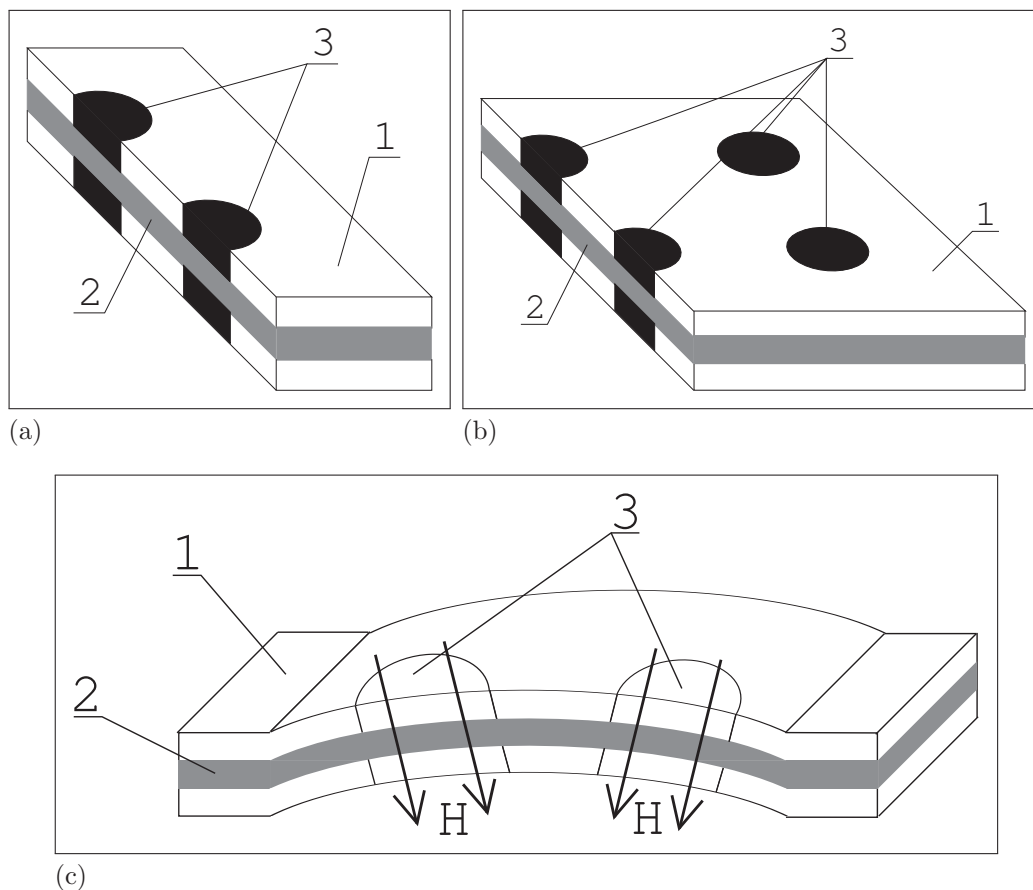


Rysunek 3.29. Schemat adaptacyjnego tłumika drgań wykorzystującego elastomery magnetoreologiczne: 1 oraz 2 – elastomery magnetoreologiczne, 3 oraz 4 – masy, 5 – element drgający, H – wektor natężenia pola magnetycznego [132].

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.

Prezentowane do tej pory patenty dotyczyły tłumików magnetoreologicznych tłumiących drgania tylko w jednym, określonym kierunku. W 2006 roku opatentowane zostało rozwiązanie umożliwiające tłumienie drgań w kilku kierunkach jednocześnie [133]. W tym rozwiązaniu warstwa elastomeru magnetoreologicznego znajduje się pomiędzy warstwami aktywującymi, w których umieszczone są magnesy stałe lub elektromagnesy, bądź jednocześnie magnesy stałe i elektromagnesy (rysunek 3.30). Tłumienie w różnych kierunkach możliwe jest dzięki odpowiedniemu rozkładowi magnesów w warstwach aktywujących, a także poprzez uformowanie kształtu całego zestawu, jak pokazano dla przykładu na rysunku 3.30c. W prezentowanym na schemacie układzie możliwe jest jednocześnie tłumienie wymuszenia ścinającego oraz ściskającego. Autorzy patentu wskazują różne konfiguracje układu tłumiącego (warstwy elastomeru magnetoreologicznego oraz warstw aktywujących): konfiguracji belkowej (rysunek 3.30a), w postaci płyty (rysunek 3.30b) oraz dowolnej powierzchni, umożliwiającej tłumienie w wielu kierunkach jednocześnie. Można je także łączyć w układy wielowarstwowe.

W Swiss Laboratories for Materials Testing and Research opracowano system redukcji drgań okien [82]. Zasada działania układu polega na wyge-

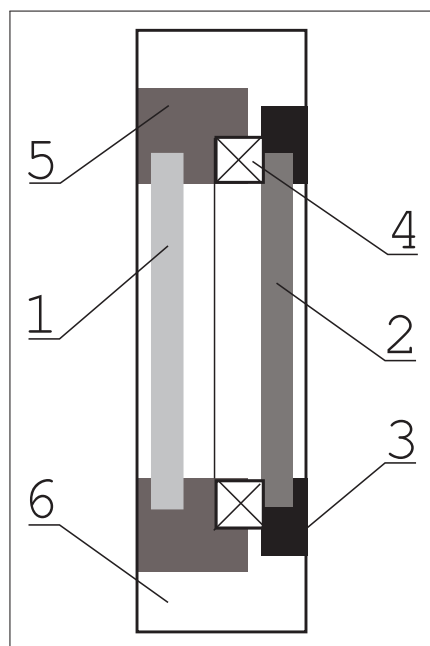


Rysunek 3.30. Przekrój przez tłumik magnetoreologiczny: (a) – konfiguracja belkowa, (b) – konfiguracja płytowa, (c) – przykład układu do jednoczesnego tłumienia drgań w dwóch kierunkach; 1 – warstwa aktywująca, 2 – elastomer magnetoreologiczny, 3 – magnesy stałe lub elektromagnesy, H – wektor natężenia pola magnetycznego [133].

nerowaniu drgań przeciwdziałających fali akustycznej. Aktywne okno (rysunek 3.31) 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 przy użyciu zwykłej uszczelki, zabezpieczającej przed wilgocią oraz strumieniem powietrza. Warstwa aktywna opiera się na elastomerze magnetoreologicznym, aktywowanym 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 [134]. Zbudowano je na bazie elastomeru magnetoreologicznego, dzięki czemu można regulować natężenie fali akustycznej poprzez zmianę natężenia pola magnetycznego. Zakres częstotliwości emitowanych fal mieści się od 50 Hz do 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



Rysunek 3.31. Schemat aktywnego okna: 1 – warstwa bierna, 2 – warstwa aktywna, 3 – elastomer magnetoreologiczny, 4 – elektromagnes, 5 – uszczelka, 6 – framuga [82].

w General Motors Corporation oraz University of Michigan [135]. 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 ciecze magneto- i elektoreologiczne.

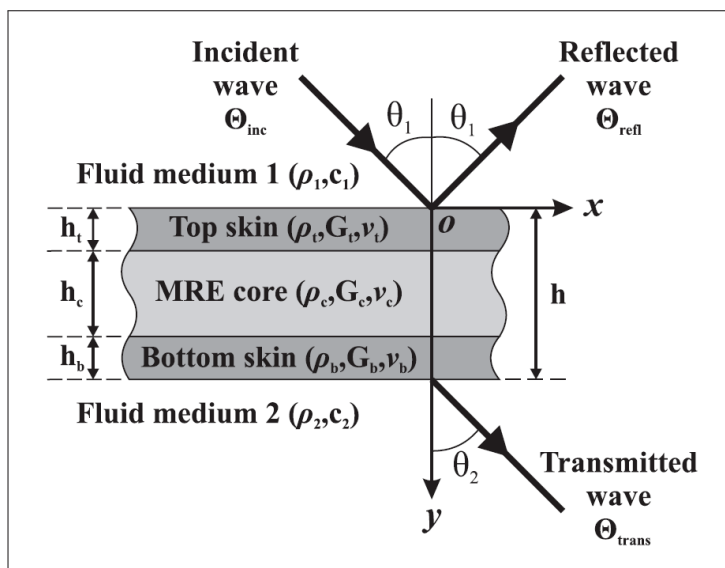
Kolejny patent opracowany w tych ośrodkach dotyczy zamka pokrywy silnika, lub bagażnika w samochodzie [136, 137]. Autorzy patentu przedstawili propozycję konstrukcji wykorzystujących materiały „smart”, w tym również elastomery magnetoreologiczne. Proponowane rozwiązanie ułatwia zamykanie oraz otwieranie 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 rozważania 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 rozpatrywanego piętra budynku i przebiegu wymuszenia związanego z konkretnym trzęsieniem ziemi) [138].

Przeanalizowano także możliwość zastosowania kompozytu magnetoreologicznego do aktywnego tłumienia fal akustycznych [139]. Rozważania prze-



proszono dla układu zbudowanego z cienkich warstw, pomiędzy którymi umieszczono kompozyt (rysunek 3.32). Stwierdzono, że regulując natężenie pola magnetycznego, działającego na elastomer magnetoreologiczny, można wpływać na poziom wytłumienia dźwięku.



Rysunek 3.32. Schemat panelu z kompozytem magnetoreologicznym do aktywnego tłumienia dźwięku [139].

Materiały magnetoreologiczne znalazły zastosowanie także w tłumieniu drgań dużych konstrukcji takich jak budynki, zagrożone podczas trzęsień ziemi. Wdrożone są już rozwiązania z tłumikami drgań wypełnionymi cieczami magnetoreologicznymi. Ze względu na problem sedymentacji ciecze magnetoreologiczne zastosowane w tych aplikacjach muszą zawierać specjalne dodatki, co nie jest konieczne w przypadku elastomerów magnetoreologicznych. Dlatego prowadzone są badania mające na celu użycie tych kompozytów w budownictwie [140, 141].

### 3.5. Modele matematyczne elastomerów magnetoreologicznych

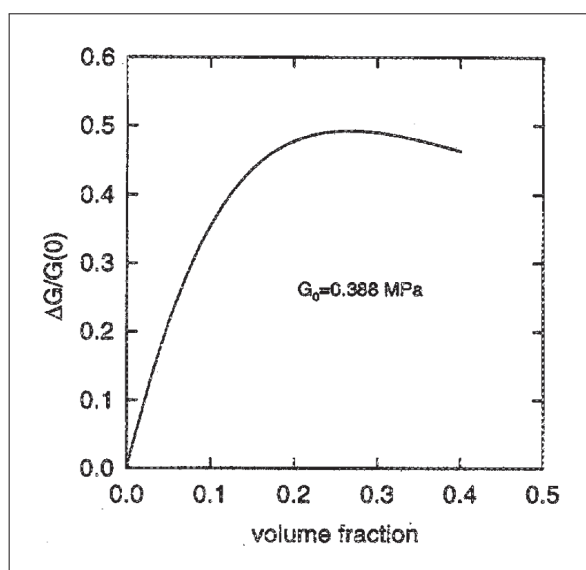
Przedstawione w literaturze przedmiotu modele kompozytów magnetoreologicznych można podzielić na dwie podstawowe grupy ze względu na strukturę opisywanego materiału: modele kompozytów anizotropowych oraz modele kompozytów izotropowych. Do tej pory głównym obiektem badań były materiały o strukturze uporządkowanej, dlatego zaprezentowano więcej prób opisu własności właśnie tej grupy. Można również zauważyć dodatkowy podział modeli na dwie grupy wynikający ze skali opisu materiału. Część naukowców przedstawia modele wychodzące z relacji na poziomie mikro, opisujących wzajemne oddziaływania pomiędzy poszczególnymi cząstkami ferromagnetycznymi oraz matrycy w której je umieszczono. Druga grupa prezentuje modele opisujące materiał w skali makro, na podstawie odpowiedzi kompozytu na zadane wymuszenie.

Pierwsze modele bazowały na doświadczeniach z opisu cieczy magnetoreologicznych. W Lord Corporation, firmie produkującej na świecie w produkcji tych cieczy, opracowano model w którym założono iż cząstki aktywne magnetycznie są jednorodnymi sferami ułożonymi w równe łańcuchy [69, 142]. Wartość modułu  $G$ , dla odkształceń  $\gamma < 0,1$ , opisano równaniem 3.2. Jest to model jednowymiarowy, quasi – statyczny.

$$G \simeq \frac{\phi \cdot B_s^2}{2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot (r_0/d)^3}, \quad (3.2)$$

gdzie:  $B_s$  – indukcja nasycenia;  $\mu_r$  – przenikalność względna;  $r_0$  – odległość pomiędzy środkami sąsiednich cząstek w łańcuchu;  $d$  – średnica pojedynczej cząstki.

Również w laboratoriach Forda przyjęto założenie, iż cząstki ferromagnetyka są nieodkształcalnymi sferami, tworzącymi idealny łańcuch. Z takimi założeniami przeprowadzono symulację metodą elementów skończonych, skupiając się na wyizolowanym łańcuchu [76]. Wyznaczając skrajne wartości natężenia pola magnetycznego, określono maksymalny wzrost modułu Kirchhoffa wywołany działaniem pola magnetycznego dla różnego udziału objętościowego cząstek wypełniających matrycę. Z przeprowadzonych obliczeń uzyskano optymalną wartość udziału cząstek w kompozycie wynoszącą 27 % objętościowo (rysunek 3.33). Od publikacji tego wyniku w 1999 roku, przed-



Rysunek 3.33. Wynik symulacji komputerowej przedstawiający zależność maksymalnej zmiany modułu Kirchhoffa w zależności od udziału objętościowego cząstek aktywnych magnetycznie, dla materiału matrycy o module Kirchhoffa równym 0,388 MPa [76].

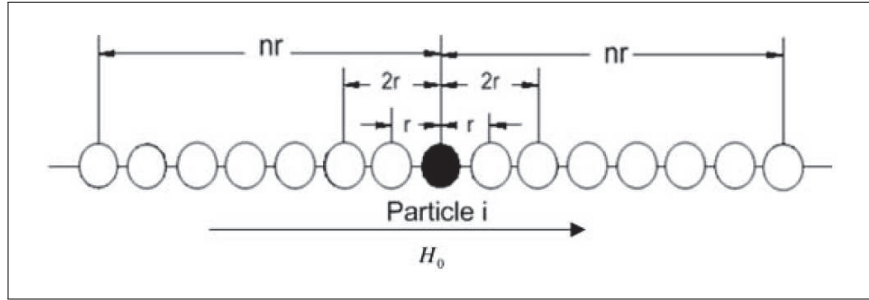
stawiono wiele rezultatów badań laboratoryjnych, w których maksymalny efekt magnetoreologiczny uzyskano właśnie dla kompozytów zawierających około 27 % objętościowo materiału aktywnego magnetycznie. W publikacji zacytowano także zależność 3.3, określającą wartość modułu Kirchhoffa kom-

pozytu magnetoreologicznego bez pola magnetycznego, którą wykorzystywali kolejni autorzy zajmujących się modelowaniem tej grupy materiałów.

$$G_0 = G_M \cdot (1 + 1,25 \cdot \phi + 14,1 \cdot \phi^2), \quad (3.3)$$

gdzie:  $G_M$  – wartość modułu Kirchhoffa czystej matrycy kompozytu

Pierwsze modele nazywane są modelami dipolowymi, gdyż w modelowaniu skupiono się na oddziaływaniu pomiędzy sąsiadującymi cząstkami. W kolejnych modelach opisujących zmiany modułu Kirchhoffa w anizotropowych kompozytach magnetoreologicznych, rozszerzono rozważania do relacji pomiędzy cząstkami w całym łańcuchu (rysunek 3.34) [80]. Przy takim



Rysunek 3.34. Łańcuch cząstek w kompozycie magnetoreologicznym [80].

założeniu określono zmianę modułu Kirchhoffa równaniem 3.4, a następnie wyznaczono wartość naprężenia 3.5.

$$\Delta G = \frac{9 \cdot \phi \cdot C \cdot m^2 \cdot (4 - \gamma^2)}{8 \cdot \pi^2 \cdot r_0^2 \cdot a^3 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot (1 + \gamma^2)^{\frac{7}{2}}}, \quad (3.4)$$

gdzie:  $C = \sum_{j=1}^n (1/j^3)$ ;  $m$  – moment dipolowy cząstki;  $r_0$  – odległość pomiędzy środkami cząstek przed deformacją;  $a$  – promień cząstki;  $\mu_r$  – przenikalność względna

$$\tau = \tau_0 + \Delta G \cdot \gamma. \quad (3.5)$$

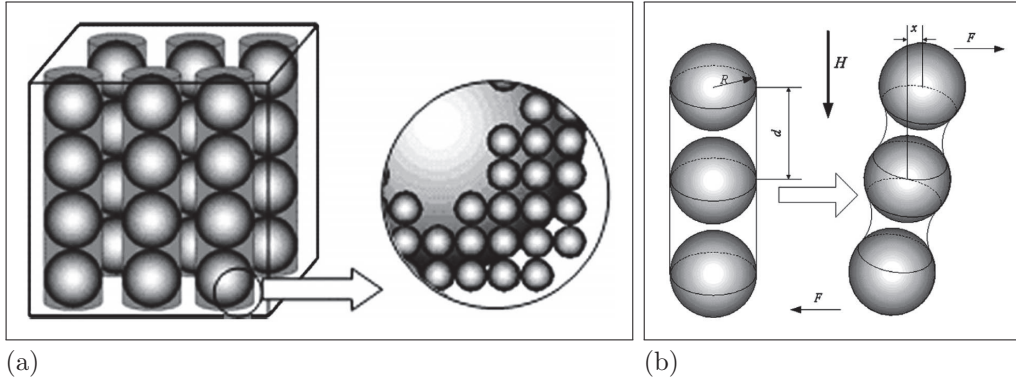
Przy podobnych założeniach uzyskano zależność 3.6 [143]. Dodatkowo autorzy porównali wyniki uzyskane z obliczeń uwzględniających oddziaływanie pomiędzy wieloma cząstkami w łańcuchu do wyników otrzymanych z modeli dipolowych. Dla dużych odległości pomiędzy cząstkami oba modele dają podobne rezultaty, jednak przy niewielkich odległościach różnice pomiędzy modelami są wyraźnie widoczne.

$$\Delta G = 3 \cdot \phi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \beta^2 \cdot H^2 \cdot \left( \frac{R}{d} \right) \cdot C \cdot \left( \left( \frac{10}{A^2} + \frac{2}{B^2} \right) + \frac{48 \cdot \beta \cdot C}{A^3} \cdot \left( \frac{R}{D} \right)^3 \right), \quad (3.6)$$

gdzie:  $A = 1 - 4 \cdot \beta \cdot \cos^3(\gamma) \cdot \left( \frac{R}{d} \right)^3$ ,  $B = 1 + 2 \cdot \beta \cdot \cos^3(\gamma) \cdot \left( \frac{R}{d} \right)^3$ ,  $C$  – współczynnik,  $R$  – promień cząstek aktywnych magnetycznie w kompozycie,  $d$  – odległość pomiędzy cząsteczkami.

Podjęmowano także próby modelowania kompozytów anizotropowych zawierających dodatkowo nanocząstki (rysunek 3.35) [108]. Do modelowania

przyjęto podobnie jak w opisanych wcześniej przypadkach, że cząstki aktywne magnetycznie są idealnymi sferami tworzącymi idealne struktury łańcuchowe, z równymi odstępami pomiędzy kolejnymi cząstkami (rysunek 3.35b). Wartość



Rysunek 3.35. (a) – Schemat kompozytu magnetoreologicznego z dodatkami nano – cząstek [108]. (b) – Schemat ścinania łańcucha cząstek w kompozycie [108].

modułu  $G$  dla kompozytu z nano – cząstkami opisano równaniem 3.7.

$$G = \frac{3d}{4R} \cdot \frac{\phi \cdot \mu_0 \cdot \mu_m \cdot H^2 \cdot (\mu_{cz} - \mu_m)^2}{\sqrt{1 + \gamma^2} \{ 3\sqrt{1 + \gamma^2} \cdot (\mu_{cz} + \mu_m) + [\frac{4R}{d}(\phi_n - 1) - 3\phi_n](\mu_{cz} - \mu_m) \}^2}, \quad (3.7)$$

gdzie:  $\phi_n$  – objętościowy udział nanocząstek,  $\mu_{cz}$  – przenikalność magnetyczna cząstek,  $\mu_m$  – przenikalność magnetyczna matrycy,  $R$  – promień cząstek aktywnych magnetycznie,  $d$  – odległość pomiędzy sąsiadującymi cząstkami

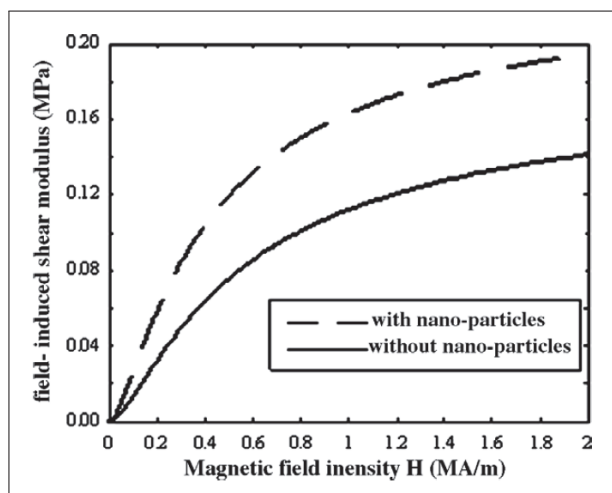
Po wstawieniu do równania 3.7 wartości  $\phi_n = 0$  uzyskuje się zależność charakteryzującą kompozyt magnetoreologiczny o klasycznym składzie, bez dodatku w postaci nanocząstek. Różnice w uzyskanych wartościach przedstawiono na wykresie 3.36.

Modelowano także kompozyty anizotropowe zawierające cząstki aktywne magnetycznie o różnych średnicach (rysunek 3.37). Podobnie jak w opisanych powyżej modelach, założono że cząstki są idealnymi sferami i tworzą idealne łańcuchy. Wzrost wartości modułu Kirchhoffa wywołany działaniem zewnętrznego pola magnetycznego określono równaniem 3.8 dla materiałów, w których objętościowy udział mniejszych cząstek względem objętości wszystkich cząstek  $\phi_m$  nie przekracza 23,2% oraz równaniem 3.9 dla materiałów z większym udziałem mniejszych cząstek [144].

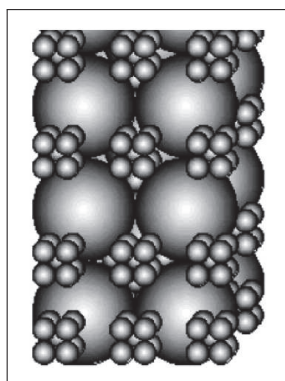
$$\Delta G \approx \frac{56,52 \cdot \phi \cdot \mu_0 \cdot H^2}{\left(9 \cdot \mu_0 \cdot H + 9 - \frac{6,28}{1 - \phi_m}\right)^2}, \quad (3.8)$$

$$\Delta G \approx \frac{(73,64 \cdot \phi_m - 17,12) \cdot \phi \cdot \mu_0 \cdot H^2}{(9 \cdot \mu_0 \cdot H + 2,72)^2} + \frac{0,908 \cdot (1 - \phi_m) \cdot \phi \cdot \mu_0 \cdot H^2}{(\mu_0 \cdot H + 0,091)^2}. \quad (3.9)$$

Zaprezentowane modele zakładają daleko idące uproszczenia, takie jak idealnie sferyczny kształt cząstek, równe odległości pomiędzy nimi, a przede



Rysunek 3.36. Wartość wyliczonego z modelu modułu Kirchhoffa dla kompozytów magnetoreologicznych z dodatkiem nano – cząstek oraz bez dodatku [108].



Rysunek 3.37. Schemat struktury kompozytu anizotropowego zawierającego cząstki aktywne magnetycznie o różnych średnicach [144].

wszystkim ich ułożenie w idealne łańcuchy. Z tego względu są to modele służące jedynie do opisu własności anizotropowych kompozytów magnetoreologicznych, nie nadają się do opisu materiałów izotropowych.

Jeden z pierwszych przedstawionych modeli matematycznych opisujący magneto-elastyczne zależności w izotropowym kompozycie magnetoreologicznym opiera się na zasadzie minimum energetycznego [145]. To podejście do modelowania kompozytów izotropowych nie zostało jednak podjęte i rozwijane przez innych naukowców na taką skalę, jak model dipolowy dla kompozytów anizotropowych.

W modelowaniu materiałów izotropowych najbardziej zasadne wydaje się być podejście makroskopowe, w którym określa się model na podstawie odpowiedzi materiału na zadane wymuszenia. Kompozyty magnetoreologiczne łączą w sobie cechy zarówno ciała stałego, jak również cieczy. Do budowy modelu używa się kombinacji trzech modeli ciał doskonałych, odzwierciedlających podstawowe rodzaje odkształceń: sprężyste, plastyczne oraz lepkie [146]. Są to:



- ciało doskonale sprężyste Hooke'a:

$$\tau = G \cdot \gamma , \quad (3.10)$$

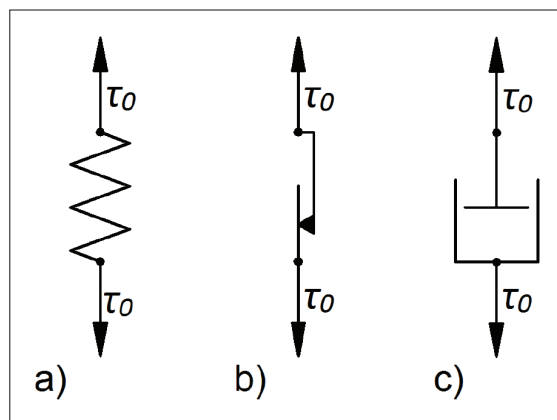
- ciało doskonale plastyczne St. Venanta:

$$\tau = \tau_0 , \quad (3.11)$$

- płyn doskonale lepki Newtona:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} . \quad (3.12)$$

Modele mechaniczne wymienionych ciał doskonałych przedstawiono na rysunku 3.38.



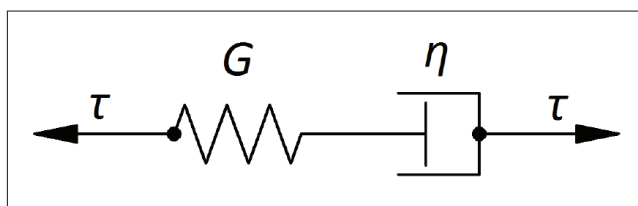
Rysunek 3.38. Modele mechaniczne ciał doskonałych: (a) – ciało doskonale sprężyste, (b) – ciało doskonale plastyczne, (c) – płyn doskonale lepki [147].

Przedstawione modele można łączyć szeregowo, lub równolegle. Przy połączeniu szeregowym odkształcenia elementów dodaje się, natomiast naprężenia pozostają niezmienione. Z kolei w połączeniu równoległym naprężenia się sumuje, podczas gdy odkształcenia pozostają stałe. W kompozytach magneto-reologicznych występują zarówno właściwości lepkie, jak i sprężyste. Lepkość, która jest związana z odkształceniami nieodwracalnymi stanowi miarę oporów stawianych przez materiał podczas przepływu. Sprężystość określa zdolność materiału do powrotu do stanu pierwotnego, kiedy zaniknie obciążenie.

Model Maxwella (przedstawiony na rysunku 3.39) opisuje ciało lepko-sprężyste jako szeregowe połączenie sprężyny o stałym module sprężystości postaciowej  $G$  z tłumikiem o stałej lepkości  $\eta$ . W połączeniu szeregowym tłumika i sprężyny odkształcenie całkowite  $\gamma$  równe jest sumie odkształcenia sprężyny  $\gamma_1$  i tłumika  $\gamma_2$  (równanie 3.13), natomiast naprężenie w sprężynie  $\tau_1$  jest równe naprężeniu w tłumiku  $\tau_2$ , a więc także równe naprężeniu całkowitemu  $\tau$  (równanie 3.14).

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 , \quad (3.13)$$

$$\tau = \tau_1 = \tau_2 . \quad (3.14)$$



Rysunek 3.39. Mechaniczny model reologiczny Maxwella [147].

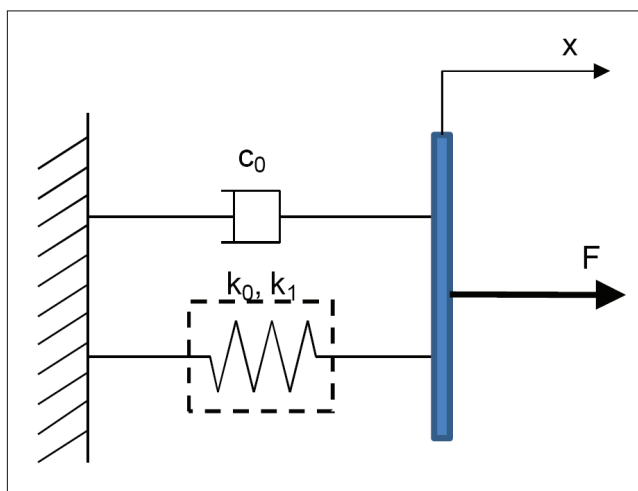
Równanie Maxwella opisuje zależność 3.15:

$$\tau + \frac{\eta}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} . \quad (3.15)$$

Iloraz  $\eta/G$  ma wymiar czasu i określa się go jako **czas charakterystyczny**  $\lambda$ . W tym modelu naprężenie zależy od szybkości odkształcania. Przy stałej wartości naprężenia równanie przyjmuje postać jak dla płynu Newtona (równanie 3.12).

Ciało lepkosprężyste opisuje również model Kelvina – Voigta, w którym sprężyna o stałym module sprężystości postaciowej  $G$  połączona jest równoległe z tłumikiem o stałej lepkości  $\eta$ . Model ten ze względu na powszechne wykorzystanie w większości prac związanych z elastomerami magnetoreologicznymi zostanie omówiony w jednym z następnych rozdziałów.

Przykładem zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta, wykorzystanego do opisu izotropowych kompozytów magnetoreologicznych, jest model, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.40 i opisano równaniem 3.16 [116]. Prezentowany model został stworzony do opisu zachowania kompozytu magnetoreologicznego poddanego cyklicznemu ścisnaniu. W przeciwieństwie do opisanego wcześniej modelu Kelvina – Voigta, zastosowano tu element sprężysty o nieliniowej charakterystyce.

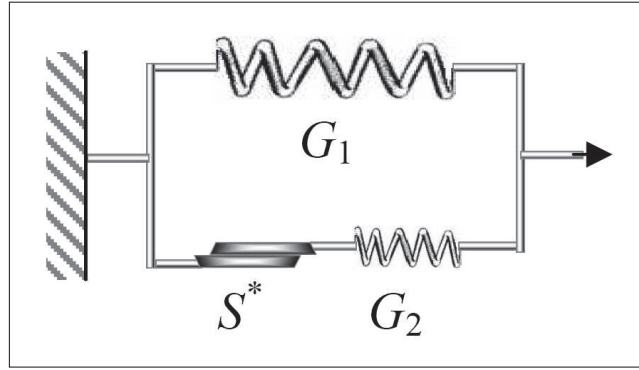


Rysunek 3.40. Model kompozytu magnetoreologicznego wykorzystujący nieliniowe charakterystyki elementu sprężystego [116].

$$F = c_0 \cdot \dot{x} + f_k(x) , \quad (3.16)$$

gdzie:  $c_0 = c_{0a} + c_{0b} \cdot H$ ,  $f_k(x) = k_0 \cdot x^2 + k_1 \cdot x$ ,  $k_0 = k_{0a} + k_{0b} \cdot H$ ,  $k_1 = k_{1a} + k_{1b} \cdot H$ ; wartości parametrów  $c_{0a}$ ,  $c_{0b}$ ,  $k_{0a}$ ,  $k_{0b}$ ,  $k_{1a}$  oraz  $k_{1b}$  wyznaczano eksperymentalnie.

Do zamodelowania własności kompozytu magnetoreologicznego zaproponowano także model (rysunek 3.41) zawierający sprężyny o modułach sprężystości postaciowej  $G_1$  i  $G_2$  oraz suwak z granicą plastyczności  $\tau_0$  (na rysunku 3.41 opisany jako  $S^*$ ) [148].



Rysunek 3.41. Model kompozytu magnetoreologicznego zawierającego elementy sprężyste i element plastyczny [148].

Dla małych obciążeń, nie przekraczających wartości  $\tau_0$ , pracują jedynie sprężyny i całkowity moduł sprężystości postaciowej  $G = G_1 + G_2$ . Po przekroczeniu wartości naprężenia  $\tau_0$  (odpowiada to wartości odkształcenia  $\gamma_0 = \tau_0/G_2$ ) pracuje jedynie sprężyna  $G_1$ . Przy dojściu odkształcenia do wartości  $\gamma_m$ , naprężenie równowagi wynosi  $\tau_m = G_1 \cdot \gamma_m + \tau_0$ . W tym punkcie zatrzymuje się suwak, ale naprężenie  $\tau_0$  utrzymuje sprężyna rozciągnięta do wartości odkształcenia  $\gamma_0 < \gamma_m$ ,  $\tau_m = G_1 \cdot \gamma_m + G_2 \cdot \gamma_0$ . Dalej następuje zmniejszenie obciążenia. Kiedy odkształcenie dochodzi do wartości  $\gamma_m - \gamma_0$  (następuje przesuwanie suwaka), sprężyna  $G_2$  powraca do pierwotnej długości, podczas gdy sprężyna  $G_1$  pozostaje jeszcze wydłużona. W kolejnym etapie następuje dalej powrót sprężyny  $G_1$  do pierwotnej długości oraz ściskanie sprężyny  $G_2$ , przez co naprężenie ma znak przeciwny. Kiedy naprężenie w gałęzi 2 dojdzie do  $-\tau_0$ , przestaje działać suwak. Gdy naprężenie dochodzi do 0, pozostaje naprężenie szczytkowe  $\gamma_r$ . Wartość  $\gamma_r$  zależy od tego, czy podczas odciążania działał suwak. To zależy od uzyskanej w cyklu wartości  $\gamma_m$ . Jeśli  $\gamma_m$  przekracza wartość krytyczną  $\gamma_{max}$  (równanie 3.17), wtedy wartość  $\gamma_r$  opisuje równanie 3.18. W przeciwnym wypadku wartość  $\gamma_r$  opisuje równanie 3.19.

$$\gamma_{max} = \gamma_0 \left( 2 + \frac{G_2}{G_1} \right), \quad (3.17)$$

$$\gamma_r = \frac{G_2}{G_1} \cdot \gamma_0, \quad (3.18)$$

$$\gamma_r = G_2 \cdot \frac{(\gamma_m - \gamma_0)}{(G_1 + G_2)}. \quad (3.19)$$

**Część II**

**Wytworzenie i badania elastomerów  
magnetoreologicznych**

## 4. Elastomery magnetoreologiczne - badania wstępne

Pracę badawczą w obszarze materiałów magnetoreologicznych autor rozpoczął od badania cieczy magnetoreologicznych. Otrzymane wyniki zaprezentowane zostały w pracach magisterskich poświęconych modelowaniu tłumika drgań z cieczą magnetoreologiczną [149] oraz symulacji zastosowania takiego urządzenia w zawieszeniu pojazdu szynowego [150]. Ponieważ cieczami magnetoreologicznymi zajmuje się od kilkudziesięciu lat wiele ośrodków naukowych i firm komercyjnych, zostały one już dokładnie przebadane i opisane. Z tego względu badania rozszerzono o materiały kompozytowe – struktury porowate nasączone cieczą magnetoreologiczną. Kolejnym krokiem było rozpoczęcie badań własnych nad elastomerami magnetoreologicznymi. Zainteresowanie autora wynikało z fascynacji nowego typu materiałem niespotykanym dotychczas w jego pracy naukowej. Dodatkowo ze względu na duże możliwości zastosowania w przemyśle samochodowym materiał ten wydawał się wymarzoną obiektem badań i analizy.

Ze względu na bardzo szerokie spektrum możliwych składników i sposobów wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych spotykanych w literaturze, autor postanowił w pracy dokonać selekcji. W pierwszym etapie należało bowiem wybrać rozwiązanie, które będzie spełniało złożone kryteria. W następnym kroku zaś interesujące było dokładniejsze poznanie wyselekcjonowanego materiału. Za kryteria wyboru uznano:

- procedury technologiczne powinny być proste i umożliwiające wytworzenie typoszeregu elastomerów magnetoreologicznych o powtarzalnych właściwościach,
- wytworzony elastomer powinien charakteryzować się największym możliwym do osiągnięcia efektem magnetoreologicznym przy polach magnetycznych łatwych technicznie do uzyskania (rzędu 100kA/m ze względu na ewentualne planowane zastosowania),
- wytworzone elastomery powinny posiadać tzw. dobre właściwości mechaniczne kompozytu umożliwiające jego obróbkę, montaż oraz badanie bez obawy o zniszczenie,
- powinny posiadać możliwość dalszego przetwarzania, cechy ekologiczne - możliwy recykling.

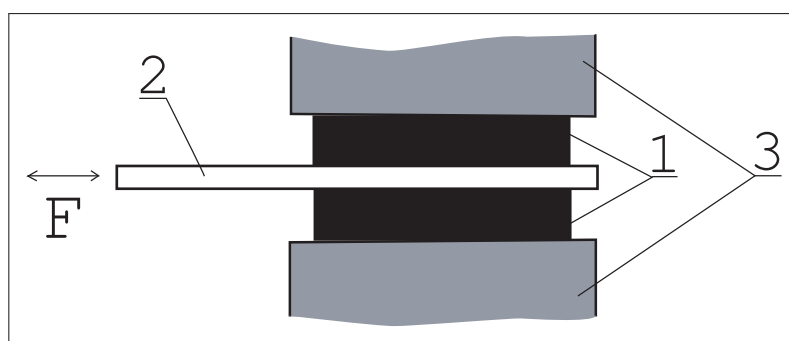
### 4.1. Elastomery magnetoreologiczne z matrycą silikonową

Pierwsze badania przeprowadzono na próbkach z matrycą silikonową [151, 152]. Do wytworzenia kompozytów użyto kauczuku silikonowego Polastosil



M-2000 utwardzanego w temperaturze pokojowej pod wpływem katalizatora, do którego dodano cząstki żelaza karbonylowego z firmy BASF o średnicy około  $10 \mu\text{m}$ . Do badań przygotowano próbki o zawartości żelaza 40%, 50% oraz 60% masowo. Do części próbek dodawano również plastyfikator Polastosil M-200.

W pierwszym etapie produkcji próbek dokładnie mieszano kauczuk Polastosil M-2000 z cząstkami żelaza, po czym całość umieszczano w próżni, w celu odpowietrzenia. W przypadku próbek z plastyfikatorem w tej fazie dodawano również Polastosil M-200. W następnym kroku dodawano utwardzacz OL-1 nieustannie mieszając. Ponownie całość odpowietrzano w próżni, po czym mieszaninę wlewano do prostokątnej formy. Aby ułożyć cząstki w struktury łańcuchowe, prostopadłe do powierzchni próbek, formę umieszczano pomiędzy dwoma neodymowymi magnesami stałymi, aż do pełnego utwardzenia materiału. Po rozłożeniu formy wycinano prostokątne próbki o wymiarach  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ . Tak przygotowane próbki przyklejano klejem silikonowym po dwóch stronach płytki nośnej, następnie całość wklejano w szczelinę rdzenia magnetycznego, jak schematycznie pokazano na rysunku 4.1. Podczas badań płytka przemieszczała się w kierunku zaznaczonym na schemacie. Symetryczne rozłożenie próbek po obu stronach ruchomej płytki umożliwiło uzyskanie stanu zbliżonego do czystego ścinania.

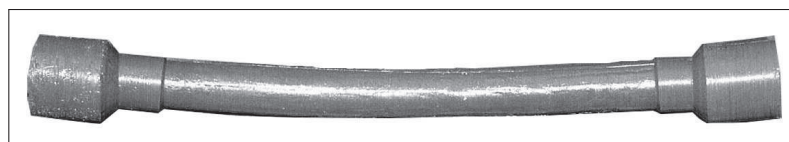


Rysunek 4.1. Schemat mocowania próbek kompozytu magnetoreologicznego z matrycą silikonową: 1 – próbki kompozytu magnetoreologicznego, 2 – płytka nośna, 3 – rdzeń magnetyczny, F – kierunek działania siły wymuszającej ruch płytki nośnej.

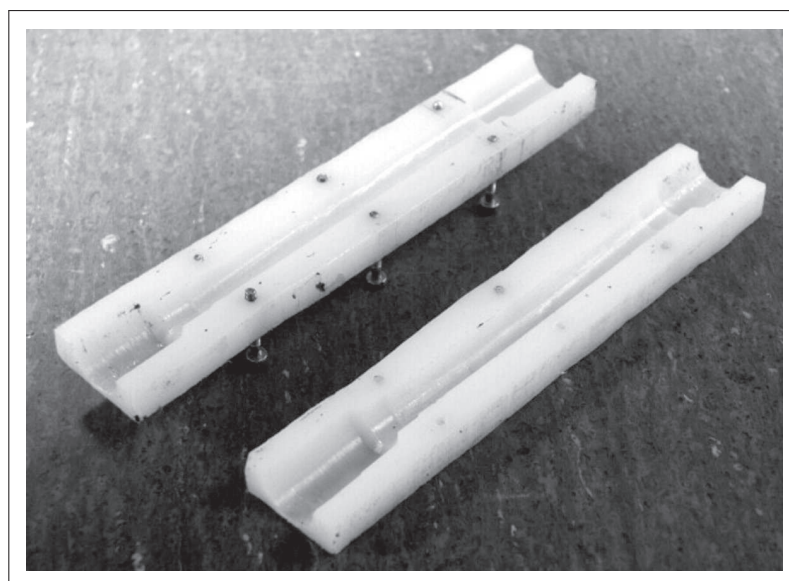
Specjalnie skonstruowane stanowisko pomiarowe umożliwiło ścinanie próbek przy różnych wartościach natężenia pola magnetycznego, o wektorze natężenia skierowanym prostopadłe do powierzchni próbek, równoległe do łańcuchów cząstek. Podczas pomiaru wielkością sterowaną była wartość siły zmieniająca się w czasie sinusoidalnie. Stosowano częstotliwości wymuszenia od 1 Hz do 15 Hz. Amplitudę siły dobierano tak, aby utrzymywać ustaloną amplitudę przemieszczenia. Natężenie pola magnetycznego zmieniano w zakresie od 0 kA/m do 160 kA/m. W czasie jednego pomiaru ustalano jedną wartość natężenia pola magnetycznego oraz częstotliwość działającej siły. Otrzymane wyniki zaprezentowano jako pętle histerezy w układzie naprężenie – odkształcenie. Wyznaczając wartość pól tych pętli określano wartość energii dyssypacji. Zarejestrowano wzrost tej energii pod wpływem zmiany natężenia działającego pola magnetycznego sięgający nawet 40 %. Jednak

rejestrowane wartości pól pętli histerezy oraz wartości naprężenia były znikome – około 0,005 Pa przy odkształceniu 0,01.

Oprócz ścinania, podjęto także próby rozciągania próbek walcowych. Do badań wytworzono dwa rodzaje próbek – o stałej średnicy oraz rozszerzane na obu końcach (rysunek 4.2a). Próbki ze stopniowaną średnicą odlewano w specjalnie wykonanej, dwuczęściowej formie z teflonu (rysunek 4.2b). Płynny



(a)

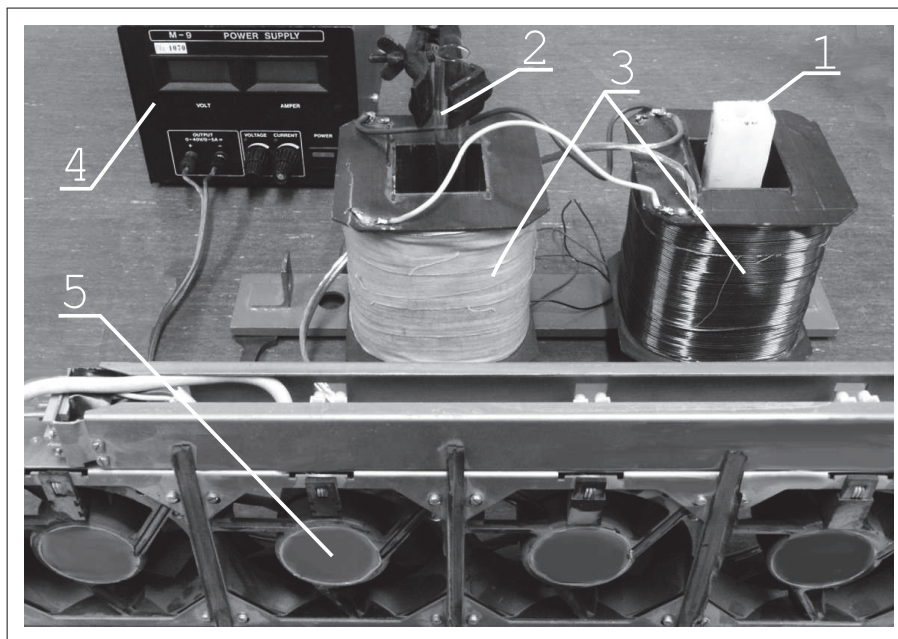


(b)

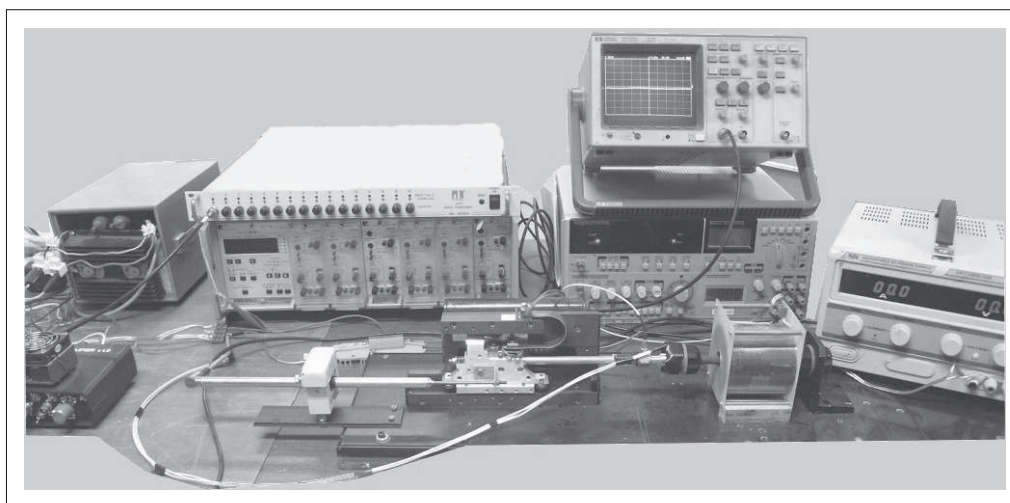
Rysunek 4.2. Próбка elastomeru magnetoreologicznego z matrycą silikonową przygotowana do próby rozciągania: (a) – próbka walcowa ze stopniowaną średnicą, (b) – dzielona forma teflonowa do odlewania próbek ze stopniowaną średnicą.

silikon z wymieszanymi cząstkami żelaza umieszczono na czas utwardzania w cewkach (rysunek 4.3), aby uporządkować cząstki żelaza w struktury łańcuchowe równoległe do osi próbek. Do badań skonstruowano specjalne stanowisko (rysunek 4.4) umożliwiające zadawanie określonej wartości przemieszczenia i jednocześnie rejestrację siły. Dodatkowo zainstalowany elektromagnes umożliwiał wytworzenie natężenia pola w badanych próbkach o wektorze równoległym do ich osi, czyli zgodnie z kierunkiem uporządkowania cząstek żelaza.

Silikon jest materiałem bardzo trudnym do klejenia, dlatego zdecydowano się na mocowanie próbek do badań poprzez zacisk w uchwytach. Próby zaciskania próbek walcowych ze stałą średnicą kończyły się jednak niepowodzeniem, gdyż przy zbyt małej sile zacisku próbki wysuwały się z uchwytów, natomiast zwiększenie tej siły skutkowało pękaniem próbek. Dlatego zmie-



Rysunek 4.3. Stanowisko do odlewania walcowych próbek z elastomerów magnetoreologicznych z matrycą silikonową: 1 – teflonowa forma do próbek ze stopniowaną średnicą, 2 – szklana forma do próbek ze stałą średnicą, 3 – cewki, 4 – zasilacz, 5 – wentylator chłodzący cewki.



Rysunek 4.4. Stanowisko do rozciągania próbek walcowych.

niono kształt próbek na walcowe, ze stopniowaną średnicą na obu końcach. Umożliwiło to ich pewne zamocowanie.

Badania przeprowadzono dla dwóch skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego. Nie stwierdzono jednak wpływu pola magnetycznego na właściwości mechaniczne badanych próbek, gdyż zarejestrowane wartości sił przy jednakowym wydłużeniu, ale różnych wartościach natężenia pola magnetycznego nie różniły się.

Ze względu na znikome zmiany parametrów badanego materiału wywołane działaniem zewnętrznego pola magnetycznego, zarówno dla ścinania, jak

i rozciągania, zaniechano dalszych badań elastomerów magnetoreologicznych z matrycą wykonaną z kauczuku silikonowego Polastosil M-2000.

Dodatkowym argumentem za zaprzestaniem dalszych badań było drastyczne obniżenie się wytrzymałości kompozytu. Zaobserwować można było np. pękanie próbek przy nieostrożnym wyciąganiu z formy. Spadek wytrzymałości w stosunku do czystego materiału matrycy był zdecydowany.

## **4.2. Elastomery magnetoreologiczne z matrycą termoplastyczną**

Analizując dostępną literaturę z zakresu wytwarzania i badań elastomerów magnetoreologicznych, pod kątem wybrania odpowiedniego materiału na matrycę kompozytu stwierdzono, iż dotychczas stosowano głównie matryce polimerowe usieciowane, takie jak kauczuki, czy silikon. W materiałach tych zachodzą bezpowrotne zmiany, stąd nie ma możliwości ich ponownego użycia. Ze względu na możliwość późniejszego zastosowania opracowanych kompozytów magnetoreologicznych w aplikacjach przemysłowych, gdzie kładzie się coraz większy nacisk na ekologiczne aspekty, na matrycę wybrano elastomer termoplastyczny. Cechą charakterystyczną termoplastów jest możliwość ich ponownego przetwarzania. Po podgrzaniu do odpowiednio wysokiej temperatury miękną aż do stanu plastycznego płynięcia, natomiast po ochłodzeniu ponownie twardnieją. Jest to proces, który można wielokrotnie powtarzać [153]. Kompozyty z matrycą wykonaną z polimeru termoplastycznego opisano dotychczas w niewielu publikacjach. Jedną z nich dotyczy badań naukowców z VTT w Finlandii, jednak użyty przez nich gatunek polimeru cechowały słabe parametry mechaniczne, co zdyskwalifikowało go już na etapie wstępnych testów [72].

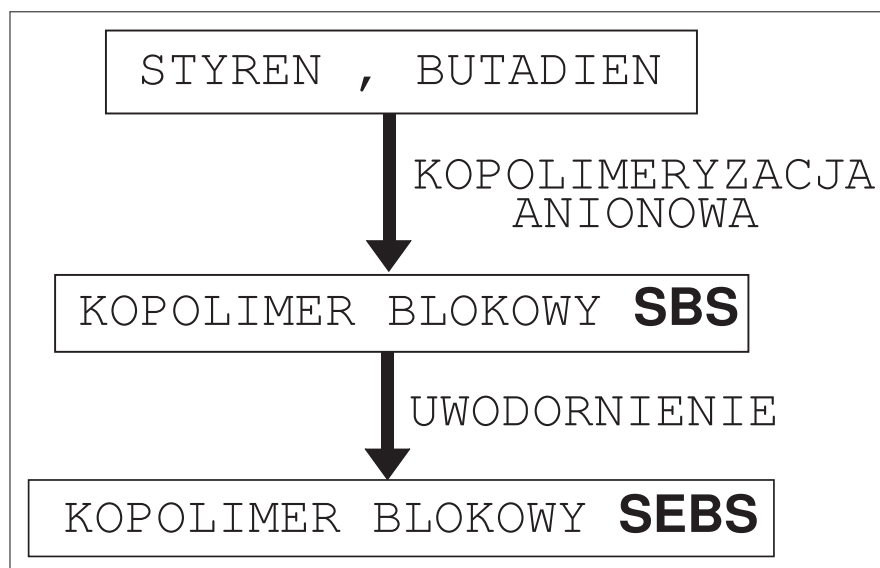
Po analizie danych literaturowych, dotyczących zarówno izotropowych, jak i anizotropowych elastomerów magnetoreologicznych stwierdzono, iż technologia wytwarzania drugiej z wymienionych grup materiałów, ze względu na konieczność stosowania pola magnetycznego, może być utrudniona, a przez to bardziej kosztowna w zastosowaniach przemysłowych. Mając na uwadze możliwość zastosowania opracowanych materiałów do komercyjnych aplikacji, w pracy główny nacisk położono na wytworzenie, przebadanie izotropowych elastomerów magnetoreologicznych.

### **4.2.1. Wytworzenie próbek elastomeru magnetoreologicznego**

#### **4.2.1.1. Dobór materiału matrycy**

Do wytworzenia badanego materiału zdecydowano się użyć polimeru termoplastycznego o nazwie handlowej *Téfabloc*<sup>®</sup> TO..222 30A, wyprodukowanego przez firmę CTS Cousin-Tessier. Ponieważ stwierdzono na podstawie wskazówek z literatury, że większy względny efekt magnetoreologiczny uzyskuje się dla elastomerów magnetoreologicznych z bardziej miękką matrycą [71], spośród oferowanych produktów o twardościach od 30 Shore'a A do 80 Shore'a A wybrano materiał o najmniejszej twardości.

Jak podaje producent, wybrany materiał jest mieszaniną kopolimeru blokowego SEBS z dodatkiem polipropylenu i oleju parafinowego. SEBS jest trójblokowym kopolimerem styren/etylen-butylen/styren z elastycznym kopolimerem etylen-butylen pomiędzy blokami polistyrenu. Proces jego wytwarzania przedstawiono schematycznie na rysunku 4.5. Dodanie polipropylenu



Rysunek 4.5. Schemat wytwarzania kopolimeru blokowego SEBS, stanowiącego główny składnik matrycy.

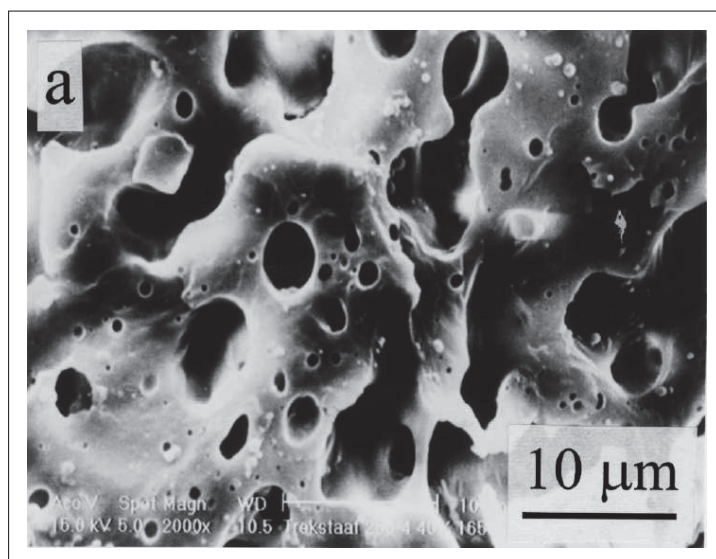
zwiększa możliwość przetwarzania, odporność na rozpuszczanie i na działanie wysokich temperatur, a także poszerza zakres temperatur pracy materiału. Dodatkowo obniża jego koszt [154].

Według danych dostarczonych przez producenta, wybrany materiał cechuje bardzo dobra odporność na starzenie aż do temperatury  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zakres temperatur pracy sięga od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Część spośród pozostałych parametrów wybranego elastomeru przedstawiono w tabeli 4.1.

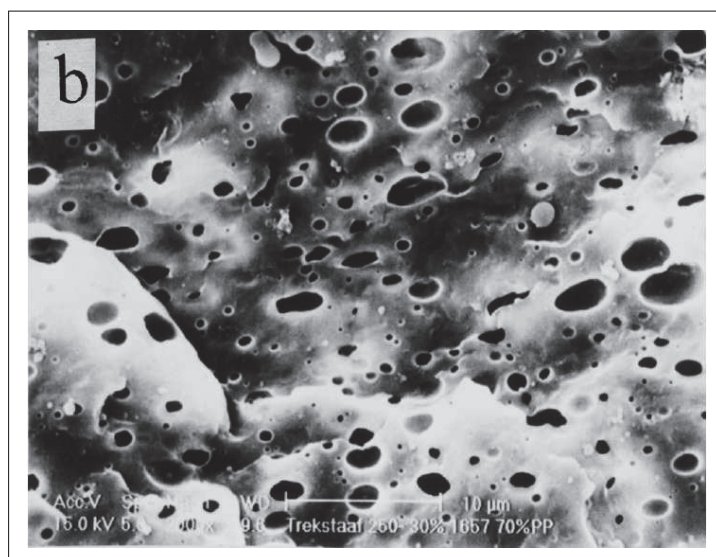
Tablica 4.1. Wybrane parametry *Téfabloc*<sup>®</sup> TO..22 30A.

| Parametr                       | Norma    | Jednostka         | Wartość |
|--------------------------------|----------|-------------------|---------|
| Twardość                       | ISO 868  | Shore'a A         | 30      |
| Gęstość                        | ISO 1183 | g/cm <sup>3</sup> | 0,89    |
| Napężenie przy wydłużeniu 20%  | ISO 37   | MPa               | 0,5     |
| Napężenie przy wydłużeniu 100% | ISO 37   | MPa               | 0,9     |
| Wytrzymałość na rozciąganie    | ISO 37   | MPa               | 4,5     |
| Wydłużenie przy zerwaniu       | ISO 37   | %                 | 800     |





(a)



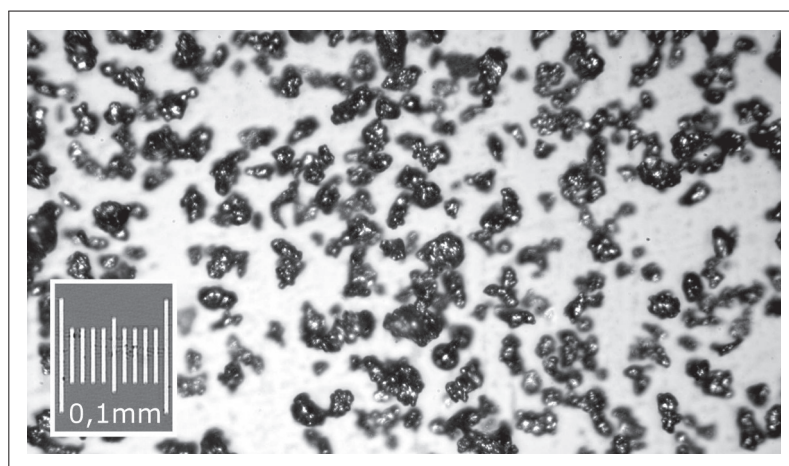
(b)

Rysunek 4.6. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego przedstawiające SEBS z różną ilością dodanego polipropylenu [155].

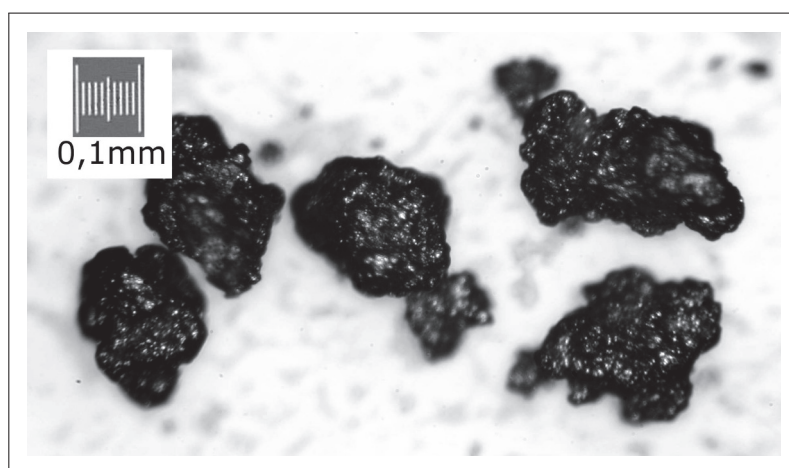
#### 4.2.1.2. Wypełnienie ferromagnetyczne - cząstki żelaza z firmy Höganäs AB

Do wytworzenia kompozytów magnetoreologicznych użyto kilku rodzajów cząstek żelaza. Pierwszą grupę stanowiły cząstki dostarczone przez firmę *Höganäs* AB o nazwach handlowych ASC 300 (zdjęcie 4.7a), AT 40.29 (zdjęcie 4.7b) oraz ABC 100.30. W przeciwieństwie do cząstek żelaza karbonylowego, których również użyto do produkcji próbek, mają one dość nieregularny kształt i porowatą powierzchnię. Według danych producenta większość proszku ASC 300 stanowią cząstki o wielkościach do  $60 \mu\text{m}$ , ABC 100.30 blisko dwa razy większe, natomiast AT 40.29 cząstki o wymiarach powy-





(a)

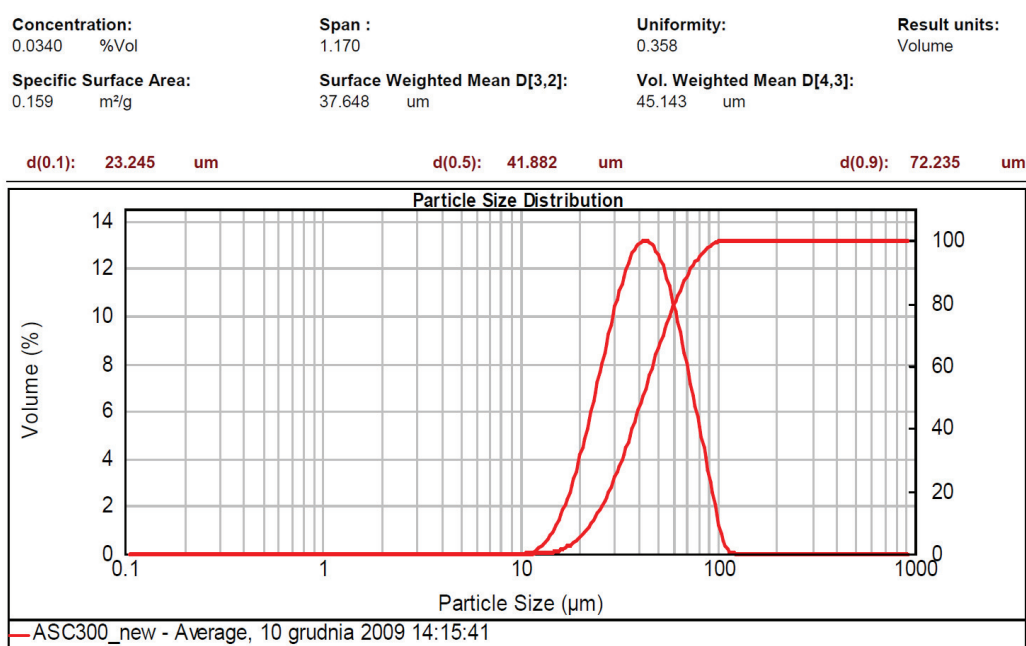


(b)

Rysunek 4.7. Zdjęcia cząstek żelaza użytego do produkcji elastomerów magnetoreologicznych, dostarczonych przez firmę *Höganäs* AB z mikroskopu świetlnego; (a) – typ ASC 300, (b) – typ AT 40.29.

żej  $150 \mu\text{m}$ . Z powodu dużo większych cząstek, próbki zawierające żelazo AT 40.29 były bardziej kruche niż pozostałe kompozyty, dlatego już w fazie wstępnej zrezygnowano z dalszego badania próbek z tym typem wypełnienia. Wstępne pomiary wykazały również, że w elastomerach zawierających cząstki ABC 100.30 efekt magnetoreologiczny jest słabszy niż w przypadku zastosowania żelaza ACS 300 [156], dlatego do ostatecznych badań spośród trzech wymienionych typów użyto jedynie cząstek typu ASC 300.

W celu weryfikacji wielkości cząsteczek wykonano badanie wybranego proszku typu ASC 300. Do badań użyto urządzenia pomiarowego Mastersizer 2000 firmy Malvern. Wyniki w postaci krzywej rozkładu (rys. 4.8) pokazały, że w analizowanym proszku najwięcej objętościowo (około 13%) było cząstek o wielkości  $42 \mu\text{m}$ , a ilościowo 90% cząstek było mniejszych niż  $72 \mu\text{m}$ . Jak widać, charakterystyki dostarczone przez producenta nie w pełni odzwierciedlały rzeczywiste rozmiary cząstek.



Rysunek 4.8. Rozkład wielkości cząstek żelaza ASC 300 wykonany przy użyciu urządzenia Mastersizer 2000 (pomiar wykonano na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej).

#### 4.2.1.3. Wypełnienie ferromagnetyczne - żelazo karbonylkowe z firmy BASF AG

Drugą grupę stanowił proszek żelaza karbonylkowego z firmy BASF AG typu CD, którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 4.2. Zgodnie z informacjami podanymi przez producenta, proszek typu CD stanowią cząstki o średnicach od 3  $\mu m$  do 11  $\mu m$ , a jego gęstość nasypowa  $\rho_n = 3,6 \text{ g/cm}^3$ .

Tablica 4.2. Skład chemiczny proszku żelaza karbonylkowego typu CD, wykorzystanego do wytworzenia elastomerów magnetoreologicznych [95].

| Fe [%] | C [%] | N [%] | O [%] |
|--------|-------|-------|-------|
| >99,5  | <0,05 | <0,01 | 0,2   |

#### 4.2.1.4. Skład materiału na próbki

Wytworzono trzy grupy kompozytów magnetoreologicznych. Pierwszą grupę stanowiły elastomery wypełnione jedynie cząstkami żelaza ASC300. Udział cząstek żelaza w kompozycie ustalono na podstawie wartości CPVC, która dla żelaza ASC300 wynosi około 36,5 % objętościowo (równanie 4.1)

$$CPVC_{ASC300} = \frac{100 \cdot \rho_n}{\rho_{Fe}} = \frac{100 \cdot 2,88}{7,9} \approx 36,5 \% . \quad (4.1)$$

Maksymalny efekt magnetoreologiczny powinien zostać uzyskany dla próbek zawierających ilość żelaza zbliżoną do wyliczonej wartości CPVC [74].

Badania pokazały jednak, że maksymalne zmiany własności mechanicznych, wywołane działaniem pola magnetycznego, uzyskano dla materiału zawierającego 30 % cząstek żelaza objętościowo [99]. Z tego względu zdecydowano się przygotować do badań próbki zawierające 30 % oraz 35 % cząstek ASC300 objętościowo.

Drugą grupę stanowiły elastomery magnetoreologiczne wypełnione proszkiem żelaza karbonylkowego BASF CD. Dobrano takie same proporcje żelaza w stosunku do matrycy, jak w przypadku pierwszej grupy. Ostatnia grupa wytworzonych kompozytów magnetoreologicznych zawierała zarówno cząstki żelaza ASC300, jak i żelazo karbonylkowe typu CD. Maksymalne wypełnienie przestrzeni cząstkami sferycznymi o różnych średnicach uzyskuje się dla proporcji cząstek mniejszych do większych równej około 1:3 [157], co było wskaźnikiem przy wytwarzaniu kompozytów do badań.

W celu znalezienia materiału wykazującego maksymalny efekt magnetoreologiczny, do badań przygotowano także próbki z dodatkiem oleju parafinowego oraz silanu o nazwie handlowej Unisilan 50. Olej parafinowy miał na celu zmniejszenie sztywności matrycy, co według danych literaturowych zmniejsza moduł Kirchhoffa przy braku pola magnetycznego i wpływa na zwiększenie względnego efektu magnetoreologicznego [79, 87, 107]. Silan polepsza zwilżanie powierzchni cząstek żelaza, polepszając adhezję pomiędzy nim i żelazem, a elastomerem, zapobiega także sklejanemu się cząstek w większe skupiska [71].

W tabeli 4.3 przedstawiono udział poszczególnych składników w wytworzonych i przebadanych próbkach. Ze względu na parametry mieszalnika, którego użyto w procesie wytwarzania próbek, całkowita masa wszystkich składników pojedynczego wkładu wynosiła 151 g. W pierwszej kolumnie podano masę elastomeru *Téfabloc*<sup>®</sup> TO..222 30A stanowiącego matrycę. Dalej wyszczególniono masę cząstek żelaza ASC300 oraz BASF CD. Kolejne kolumny zawierają dane o ilości dodanego oleju parafinowego oraz silanu Unisil 50. W ostatnich dwóch kolumnach przedstawiono procentowo objętościowy oraz wagowy udział cząstek żelaza w poszczególnych próbkach.

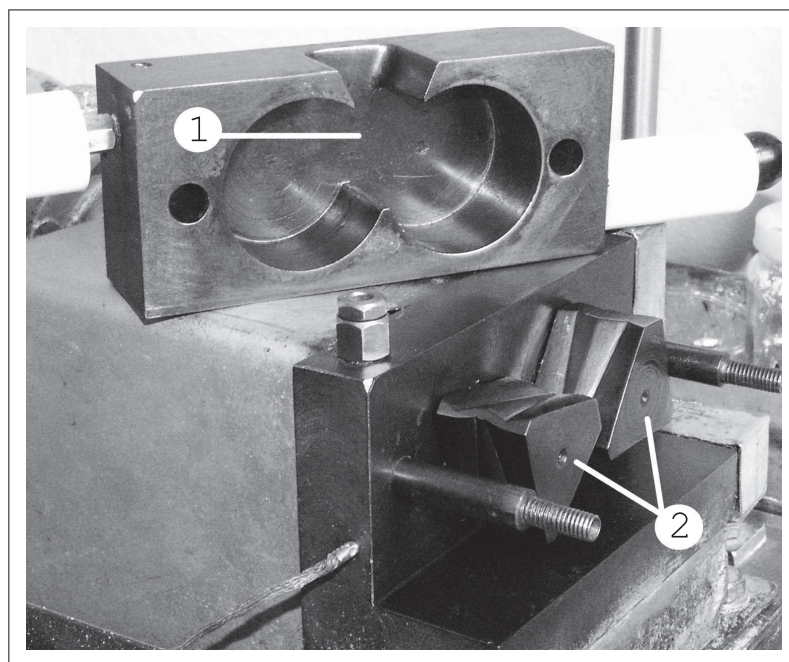
#### 4.2.1.5. Technologia wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych

Proces wytworzenia próbek elastomeru magnetoreologicznego składał się z dwóch etapów: wymieszania na gorąco cząstek żelaza z elastomerem oraz ukształtowania próbek w prasie. Do wymieszania obu składników wykorzystano mieszalnik typu Brabender o objętości komory mieszalnika około 40 cm<sup>3</sup>. Stalową komorę mieszalnika (rysunek 4.9 – 1) podgrzewano do temperatury 190 °C. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury uruchamiano kręcące się przeciwbieżne rotory (rysunek 4.9 – 2) i wsypywano przez górny otwór polimer termoplastyczny w postaci granulatu. Równocześnie z granulem dosypywano cząstki żelaza, a w przypadku niektórych z wytwarzanych kompozytów także dodatki takie jak olej, czy silan. Całość mieszano przez 5 minut.

W kolejnym etapie produkcji dokładnie wymieszaną, plastyczną masę umieszczano w formie złożonej z kilku elementów, schematycznie przedstawionych na rysunku 4.10. Dolną warstwę stanowiła cienka, metalowa płytka, dzięki której wyprodukowane próbki miały gładką powierzchnię. Na niej umieszczano folię zapobiegającą przyleganiu próbki do płytki. Ze względu

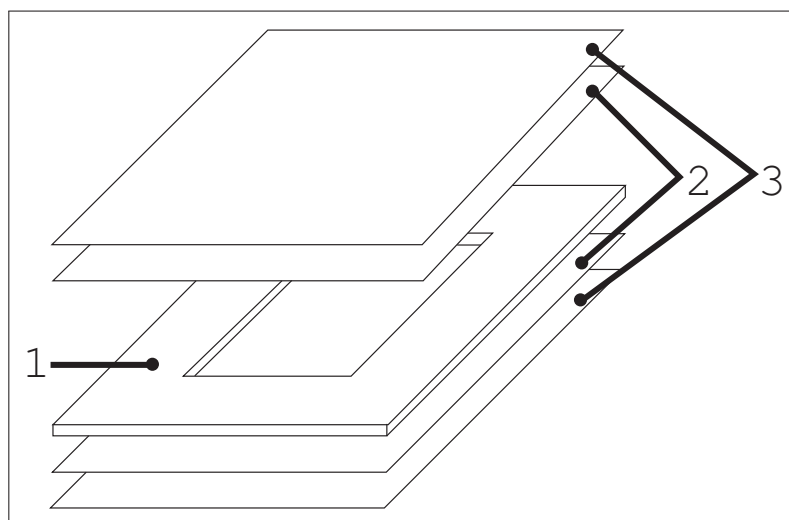
Tablica 4.3. Składy poszczególnych próbek.

| Oznaczenie próbki | <i>Téfabloc</i> <sup>®</sup> | ASC300 | CD  | Olej parafinowy | Silan | Udział Fe objętościowo | Udział Fe wagowo |
|-------------------|------------------------------|--------|-----|-----------------|-------|------------------------|------------------|
|                   | [g]                          | [g]    | [g] | [ml]            | [ml]  | [%]                    | [%]              |
| 00                | 40                           | 0      | —   | —               | —     | 0                      | 0                |
| A                 | 28                           | 107    | —   | —               | —     | 30                     | 79               |
| B                 | 26                           | 125    | —   | —               | —     | 35                     | 82               |
| CD                | 26                           | 94     | 31  | —               | 1,25  | 35                     | 82               |
| D                 | 26                           | 126    | —   | —               | 1,25  | 35                     | 82               |
| E                 | 23,4                         | 125    | —   | 2,6             | —     | 35                     | 82               |
| F                 | 28                           | 107    | —   | —               | 1,1   | 30                     | 79               |
| G                 | 25                           | 107    | —   | 3,7             | —     | 30                     | 79               |



Rysunek 4.9. Mieszalnik typu Brabender - widok otwartej komory mieszalnika. 1 – wnętrze komory, 2 – rotory.

na późniejszą konieczność przyklejenia próbek do specjalnych uchwytych, nie można było stosować oleju, jako czynnika rozdzielającego. Kształt próbce nadawała stalowa płytko o grubości 4 mm z prostokątnym wycięciem. W procesie wytwarzania próbek wykorzystywano płytki z wycięciem o wymiarach



Rysunek 4.10. Schemat formy. 1 – płyta z prostokątnym otworem, 2 – folia, 3 – cienka metalowa płytką.

50 mm x 83 mm oraz 50 mm x 100 mm. Kolejne warstwy stanowiła folia oraz cienka metalowa płytką.

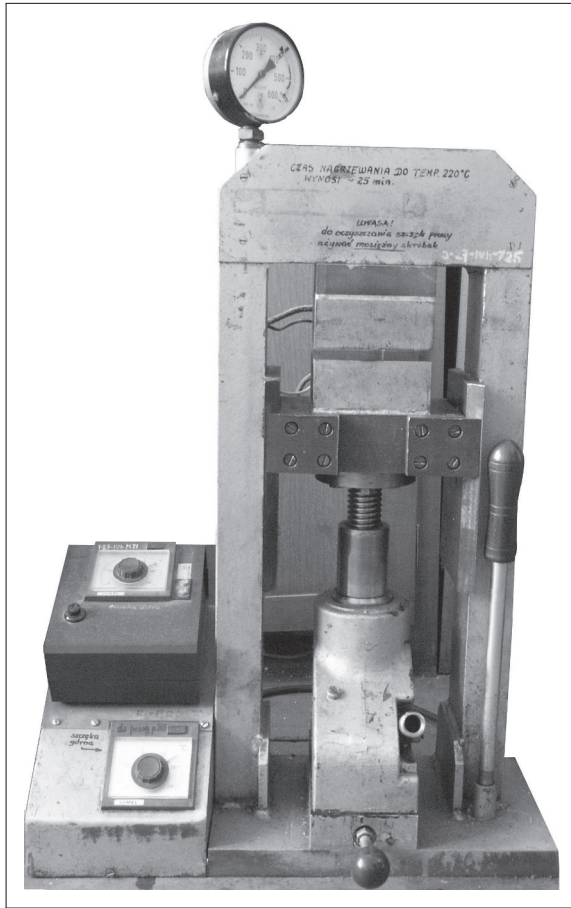
Tak złożona forma umieszczana była w nagrzanym prasie (rysunek 4.11 a) na 5 minut. Przez pierwsze 2 minuty próbka w formie była jedynie podgrzewana, bez ściskania, tak aby materiał po przełożeniu z mieszalnika do formy ponownie osiągnął temperaturę umożliwiającą jego formowanie. Na kolejne 2 minuty ciśnienie ustalano na 50 kg/cm<sup>2</sup>, a na następną minutę na 200 kg/cm<sup>2</sup>. Następnie formę umieszczano w drugiej prasie (rysunek 4.11 b), w temperaturze pokojowej, aby wychłodzić próbkę wraz z formą. Gdyby próbka chłodzona była poza formą, konieczne byłoby jej późniejsze odprężanie. Według danych producenta, *Téfabloc*<sup>®</sup> nie wymaga dodatkowej obróbki cieplnej w celu odprężenia materiału, chyba że próbka chłodzona byłaby szybko, poza formą. W celu weryfikacji otrzymanej informacji, wybraną serię wyprodukowanych elastomerów magnetoreologicznych wygrzewano w piecu przez kilka godzin. Testy potwierdziły, że obróbka cieplna nie zmienia własności materiału.

#### 4.2.1.6. Przygotowanie próbek do badań cyklicznych

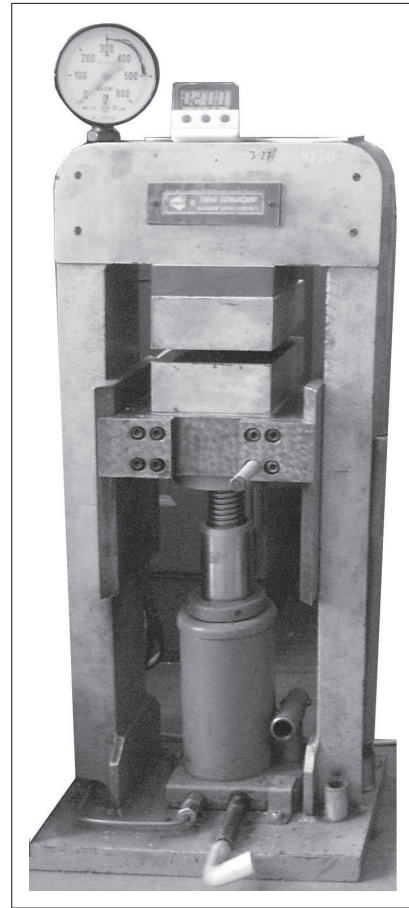
Po wyjęciu z formy, z każdej z otrzymanych płytek kompozytu wycinano po dwa prostopadłościany o wymiarach 40 mm x 40 mm x 4 mm. Następnie próbki wklejano pomiędzy trzy płytki z laminatu z włókna szklanego, co schematycznie przedstawiono na rysunku 4.12. Podczas testów zewnętrzne płytki pozostawały nieruchome, natomiast przemieszczała się płytka środkowa, jak schematycznie pokazano w rozdziale prezentującym badania elastomerów magnetoreologicznych opisane w literaturze (rysunek 3.16).

Początkowe eksperymenty przeprowadzano wklejając kompozyt pomiędzy stalowe płytki (rysunek 4.13a), podobnie jak w opisanych badaniach tego typu w literaturze [69, 79, 99]. Stwierdzono jednak wyraźny wpływ pola magnetycznego na stalowe płytki. Był on na tyle duży, że uniemożliwił stwierdzenie, czy zarejestrowane w czasie eksperymentu zmiany, spowodowane były



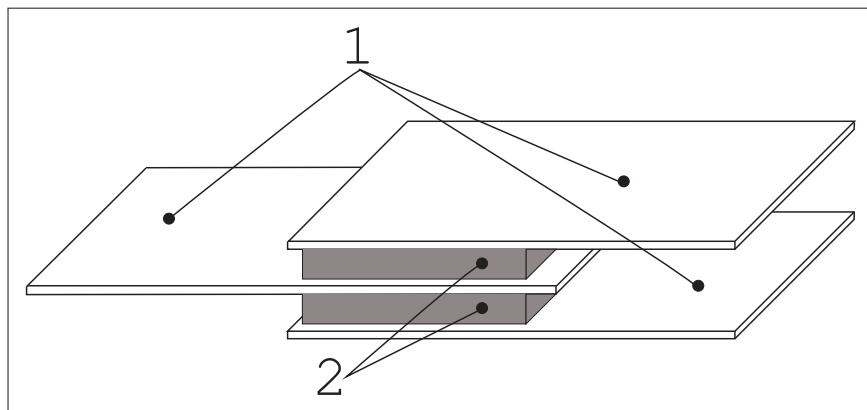


(a)



(b)

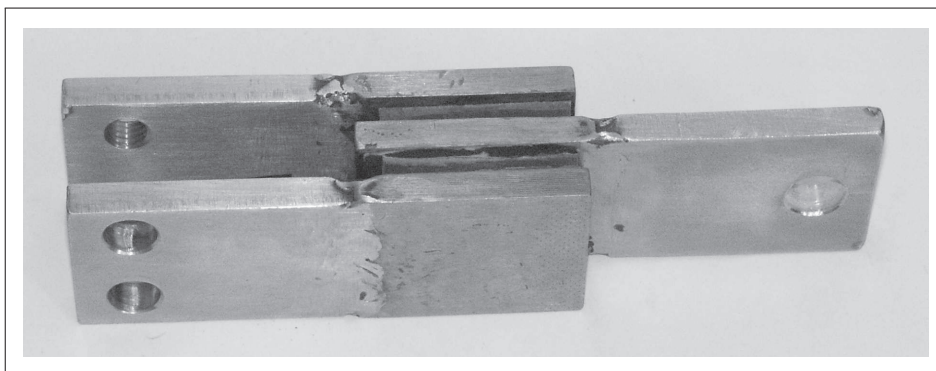
Rysunek 4.11. Praszy używane do wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych; (a) – do prasowania na gorąco, (b) – do prasowania w temperaturze pokojowej.



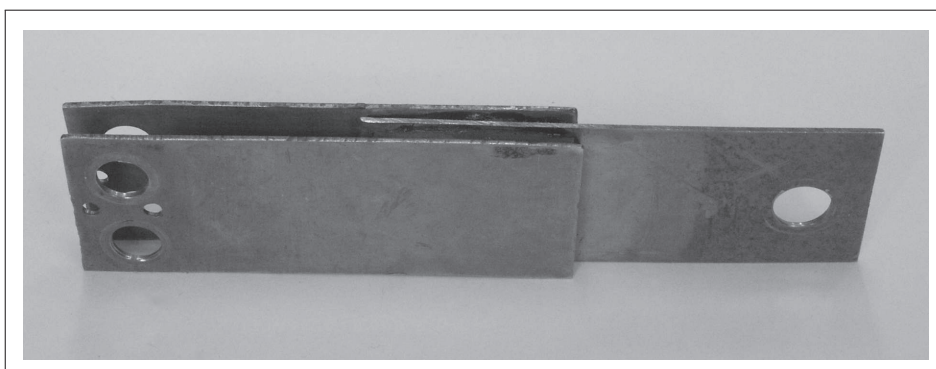
Rysunek 4.12. Schemat próbki przygotowanej do badań. 1 – płytki z laminatu, 2 – kompozyt magnetoreologiczny.

oddziaływaniem pola magnetycznego na badaną próbkę, czy elementy mocujące. W kolejnej fazie badań zastosowano płytki mosiężne (rysunek 4.13b), również sugerując się podobnymi eksperymentami opisanymi w literaturze

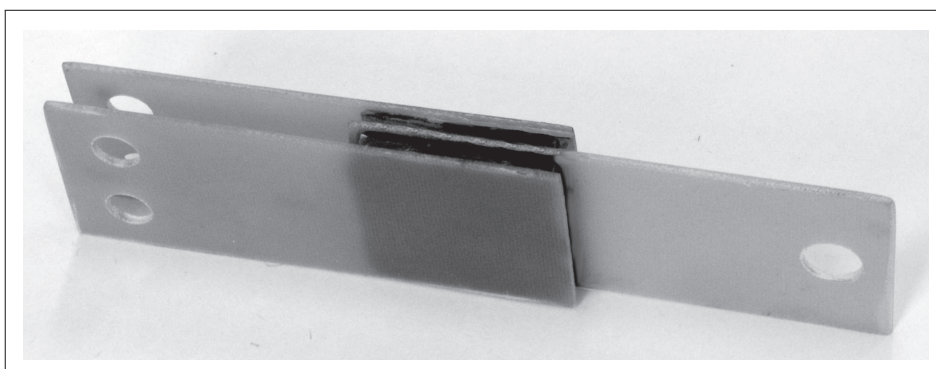




(a)



(b)



(c)

Rysunek 4.13. Kolejne rodzaje uchwytów stosowanych podczas badania elastomerów magnetoreologicznych: (a) – stalowe, (b) – mosiężne, (c) – z laminatu z włókna szklanego.

[71, 74, 75, 89, 99, 100]. Weryfikacja eksperymentalna takiego rozwiązania pokazała jednak, iż podczas cyklicznego przemieszczanie się środkowej płytki w czasie eksperymentu indukuje się w niej pole magnetyczne, co również miało trudny do oszacowania wpływ na otrzymywane wyniki. Dlatego ostatecznie użyto płytek z materiału dielektrycznego, w którym nie indukują się prądy wirowe i który nie jest przyciągany przez magnes (rysunek 4.13c) [158].

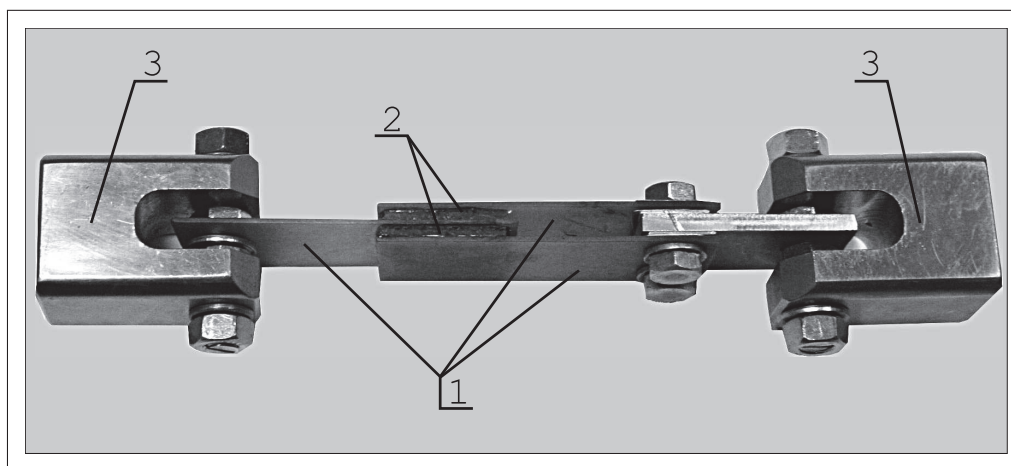
Próbki z elastomeru magnetoreologicznego przyklejano do płytek z laminatu klejem cyjanoakrylowym. Kleje tego typu są bezrozpuszczalnikowe, utwardzają się bez skurczu w krótkim czasie, pod wpływem wilgoci powie-

trza. Cechuje je duża chemoodporność i trwałość do 80 °C, a krótkotrwale do 200 °C [110]. W badaniach użyto kleju z firmy Luna o nazwie handlowej Black Magic. Jak podaje producent, klej przeznaczony jest do łączenia materiałów różniących się elastycznością, np. gumy z metalem. Maksymalna wytrzymałość kleju na ciśnienie wynosi 25 MPa.

Przed przyklejeniem, powierzchnie próbek oraz płytek dokładnie odtłuszczano. Aby zapobiec zanieczyszczeniu powierzchni bocznych próbek, tak aby nie pozostała na nich po zaschnięciu kleju twarda, trudno odkształcalna warstwa, przed klejeniem próbki oklejano dookoła taśmą samoprzylepną o szerokości równej grubości próbek, czyli 4 mm. Po sklejeniu taśma była usuwana. Po nałożeniu warstwy kleju i złożeniu poszczególnych elementów całość ściśniono aż do utwardzenia.

#### 4.2.2. Stanowisko badawcze

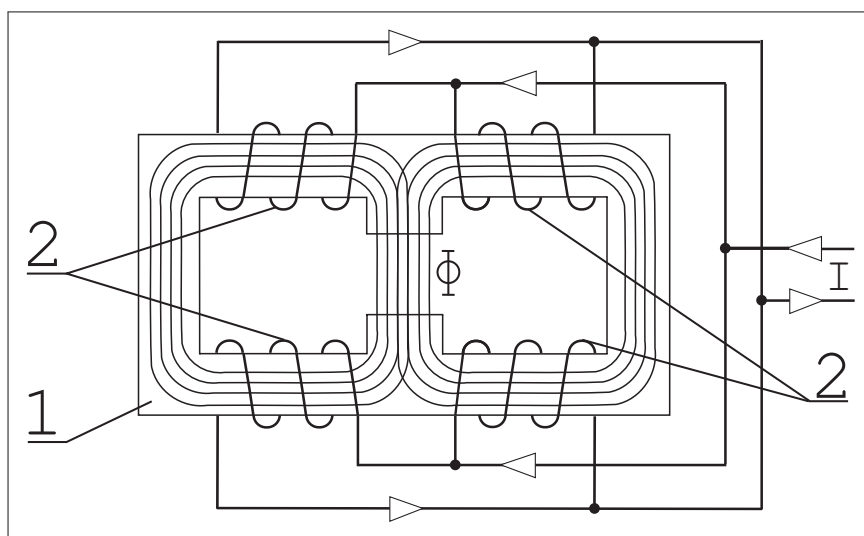
Budując stanowisko pomiarowe, autor miał na uwadze, że wytworzone próbki elastomerów magnetoreologicznych poddawane będą ścinaniu [159]. W celu zrealizowania obciążenia mechanicznego o odpowiednim przebiegu, wykorzystano pulsator hydrauliczny firmy MTS (model 810), znajdujący się w Laboratorium Dynamiki Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Do pakietu, składającego się z dwóch próbek wklejonych pomiędzy płytki z laminatu, przykręcano specjalne uchwyty z materiału paramagnetycznego (rysunek 4.14). Wszystkie elementy służące do montażu, a więc trzpienie, nakrętki oraz podkładki również wykonane były z materiałów niemagnetycznych (mosiądz, stal austenityczna). Następnie ca-



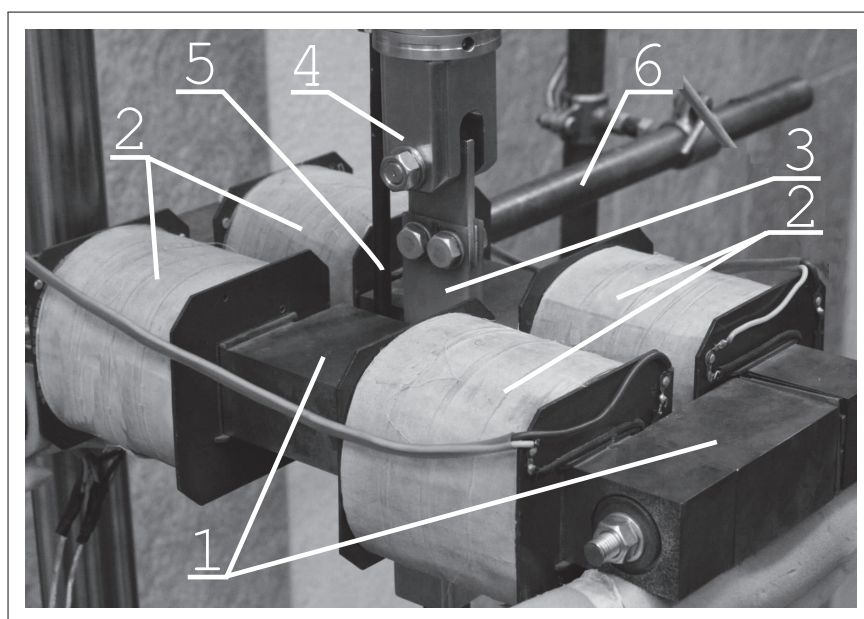
Rysunek 4.14. Próbki wklejone pomiędzy płytki z laminatu, z przykręconymi uchwytami. 1 – płytki z laminatu, 2 – próbki z kompozytu magnetoreologicznego, 3 – uchwyty z materiału paramagnetycznego.

łość mocowano do pulsatora tak, że górny uchwyt przykręcony był do nieruchomej ramy, natomiast dolny uchwyt do ruchomego tłoka. Ponieważ celem badania było sprawdzenie wpływu pola magnetycznego na własności mechaniczne kompozytu magnetoreologicznego, konieczne było wyposażenie stanowiska pomiarowego w układ magnetyczny. W tym celu na stelażu ze sta-

lowych rurek umieszczono rdzeń magnetyczny wykonany z miękkiego magnetycznie materiału, żeby charakteryzował się małym polem koercji, z czterema cewkami (rysunek 4.15). Aby zapobiec ewentualnemu przepływowi prądu po-



(a)



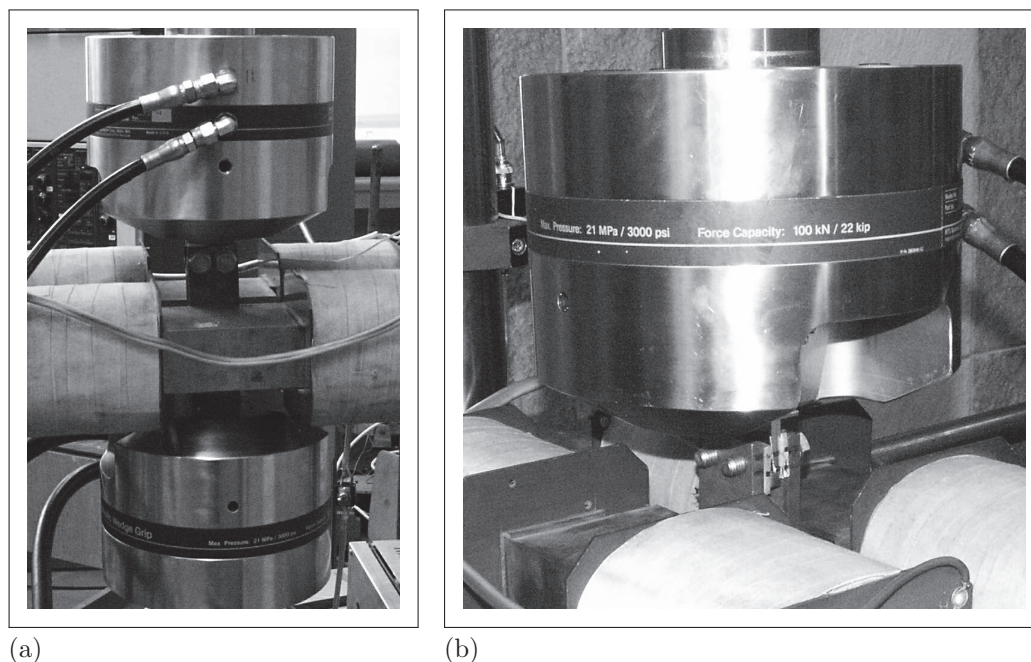
(b)

Rysunek 4.15. Układ magnetyczny; (a) – schemat obwodu, (b) – widok ogólny; oznaczono: 1 – rdzeń magnetyczny, 2 – cewki, 3 – płytki z laminatu z wklejonymi próbkami kompozytu magnetoreologicznego, 4 – uchwyt ze stali nierdzewnej, 5 – czujnik sondy Hall’a, 6 – element stelażu podtrzymującego układ magnetyczny,  $\Phi$  – strumień magnetyczny w szczelinie rdzenia.

między układem magnetycznym, a stelażem, stalowe rurki owinięto izolatorem. Do pomiaru natężenia pola magnetycznego zastosowano sondę Halla.

W początkowej fazie budowy stanowiska pomiarowego, do zamocowania próbek wklejonych uprzednio pomiędzy płytki z laminatu, zastosowano stalowe uchwyty będące standardowym wyposażeniem pulsatora hydraulicznego

MTS 810 (rysunek 4.16). Stwierdzono jednak, że dodatkowa siła wynikająca



Rysunek 4.16. Stalowe szczęki pulsatora hydraulicznego MTS; (a) – widoczne obie szczęki z zamocowaną próbką, (b) – górna szczeka.

z oddziaływanie na nie pola magnetycznego była na tyle duża, że uniemożliwiała zarejestrowanie efektu magnetoreologicznego. Dlatego wymieniono je na uchwyty ze stali niemagnetycznej. Dodatkowo nowe uchwyty miały dużo mniejszą masę, co również było bardziej korzystne, gdyż zmniejszyło bezwładność poruszającego się uchwytu.

Ze względu na konieczność odizolowania czujnika siły od pola magnetycznego, konieczne było również zastosowanie elementu dystansującego z tworzywa sztucznego, będącego izolatorem. Przeprowadzono także testy mające na celu sprawdzenie, czy pole magnetyczne nie wpływa na pracę serwozaworu pulsatora hydraulicznego.

Badania pierwszych próbek pokazały, że wartości maksymalne rejestrowanych sił mieściły się w przedziale do 1000 N, co stanowiło jedynie 10 % zakresu pomiarowego czujnika siły pulsatora hydraulicznego. Z tej przyczyny konieczne było zastosowanie dodatkowego czujnika siły. Wybrano czujnik 208C04 z firmy PCB Piezotronics. Jego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 4.4.

Schemat oraz zdjęcie stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.17. Aby zdjęcie stanowiska było czytelne, nie uwzględniono na nim komputera pomiarowego, zasilaczy układu magnetycznego oraz czujnika siły PCB, a także układu rejestrującego wartość natężenia pola magnetycznego.

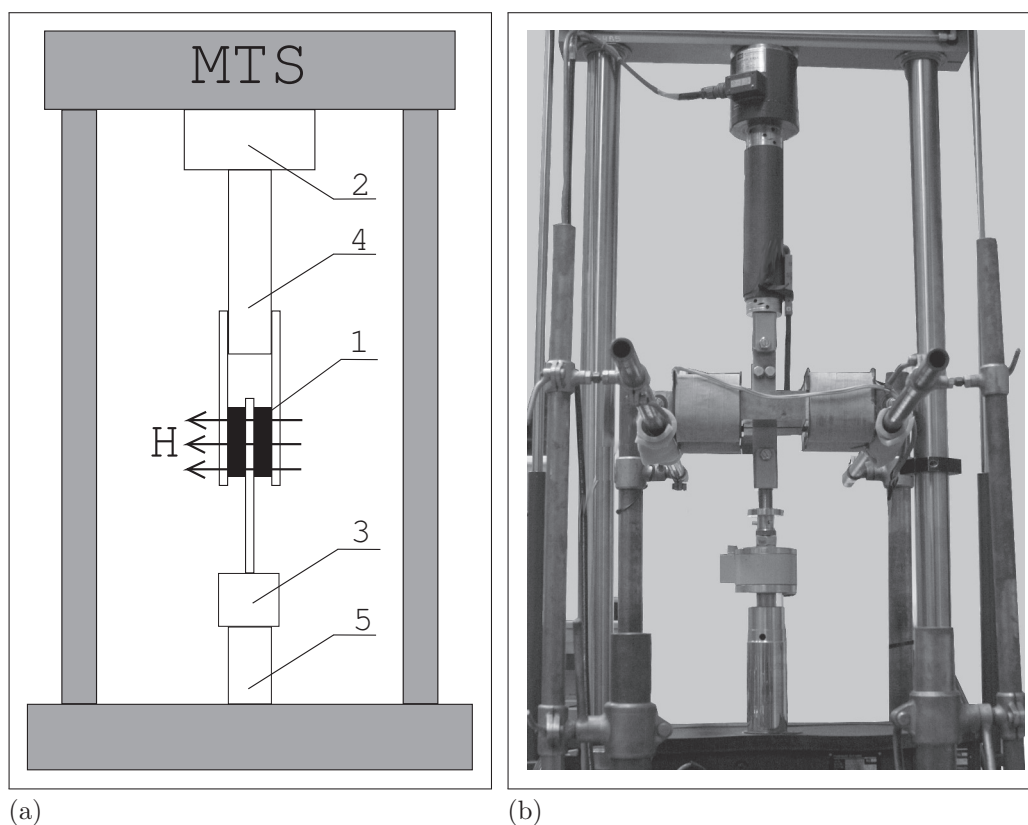
#### 4.2.3. Procedura badawcza

Próbki poddawano odkształceniu cyklicznemu. Schemat odkształcania przedstawiono na rysunku 4.18. Sterując przemieszczeniem ruchomego tłoka

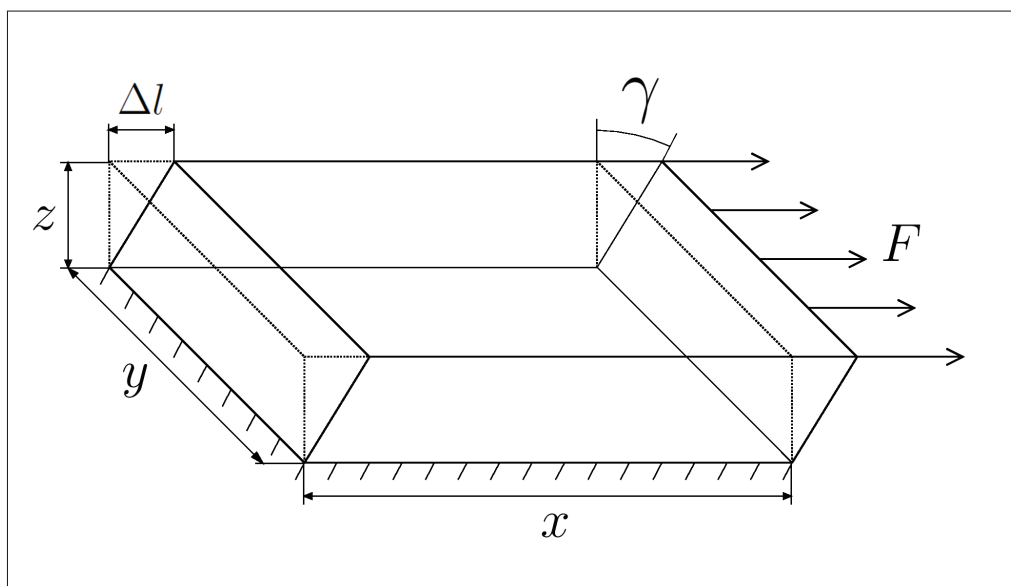


Tablica 4.4. Parametry dodatkowego czujnika siły 208C04 firmy PCB Piezotronics.

| Parametr                                | Wartość        | Jednostka   |
|---|----------------|-------------|
| Czułość                                 | 1174           | mV/kN       |
| Zakres pomiarowy (ściskanie)            | 4,448          | kN          |
| Zakres pomiarowy (rozciąganie)          | 2,224          | kN          |
| Maksymalna statyczna siła (ściskanie)   | 26,69          | kN          |
| Maksymalna statyczna siła (rozciąganie) | 2,224          | kN          |
| Nieliniowość                            | <1             | %           |
| Wpływ temperatury na czułość            | <0.09          | %/°C        |
| Temperatura pracy                       | od -54 do +121 | °C          |
| Sztywność jednostkowa                   | 1,05           | kN/ $\mu m$ |



Rysunek 4.17. Stanowisko pomiarowe; (a) – schemat stanowiska pomiarowego, (b) – widok ogólny. 1 – próbki wklejone pomiędzy płytki mocujące, 2 – czujnik siły MTS, 3 – dodatkowy czujnik siły PCB, 4 – element dystansowy z tworzywa sztucznego, 5 – ruchomy tłok, 6 – sonda Halla, 7 – stelaż podtrzymujący układ magnetyczny,  $H$  – wektor pola magnetycznego.



Rysunek 4.18. Schemat ścinania kompozytu magnetoreologicznego.

maszyny wytrzymałościowej, wymuszano przemieszczenie środkowej płytki  $\Delta l$ , na podstawie którego wyznaczano kąt odkształcenia postaciowego  $\gamma$ , a następnie odkształcenie postaciowe:

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{\Delta l}{2 \cdot z} \% , \quad (4.2)$$

gdzie:  $z$  – grubość próbki. Podczas pomiaru rejestrowano siłę  $F$ , na podstawie której wyliczano naprężenie ścinające, korzystając ze wzoru:

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot S} \% , \quad (4.3)$$

gdzie:  $S = x \cdot y$  – pole powierzchni próbki.

Amplitudę odkształcenia dobrano z zakresu od 0,025 do 0,125, co odpowiadało amplitudzie przemieszczenia od 0,1 mm do 0,5 mm. Częstotliwości wymuszenia zmieniano w przedziale od 1 Hz do 8 Hz, co 1 Hz, uwzględniając możliwości stanowiska pomiarowego. W celu zarejestrowania wpływu pola magnetycznego na badane próbki, pomiary prowadzono dla dwóch skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego. Minimalna wartość natężenia, mierzona w szczelinie układu magnetycznego, wynosiła  $H_0=5$  [kA/m], natomiast maksymalna  $H_1=130$  [kA/m]. Ze względu na histerezę magnetyczną, mierzone natężenie magnetyczne przy braku zasilania cewki zawsze przekraczało nieznacznie wartość 0 kA/m, dlatego przyjęto 5 kA/m jako minimalną wartość, którą można było uzyskać dla wszystkich pomiarów.

W pierwszej serii badań każdą z próbek poddawano wielokrotnemu obciążaniu dla pełnego zakresu amplitud wymuszenia i częstotliwości, zarówno dla minimalnych, jak i maksymalnych wartości natężenia pola magnetycznego. Analizując wyniki eksperymentalne zauważono nieodwracalne zmiany w materiale wywoływane cyklicznym odkształcaniem. Kolejne badania mające na celu dokładniejsze zbadanie zjawiska wykazały, iż przy wymuszeniu



o stałej amplitudzie i częstotliwości tej samej próbki, malała amplituda rejestrowanej siły. Efekt ten zauważano głównie w pierwszych kilkudziesięciu cyklach obciążania. Zjawisko to, występujące w polimerach z wypełniaczami, nazywa się efektem Mullinsa [160]. Podczas cyklicznego obciążania materiału cząstki wypełniacza odklejają się od otaczającego je polimeru [161]. Po zdjęciu obciążenia część połączeń się odbudowuje, jednak dalsze obciążanie powoduje dalsze rozwarstwianie. Po pewnym czasie większość połączeń jest zerwana, stąd następuje pewna stabilizacja wartości rejestrowanego naprężenia. Przedstawiony efekt próbowano wielokrotnie opisać złożonymi modelami matematycznymi [162], ale charakter zjawiska oddaje proste równanie [68]:

$$R'_i = \frac{R_i}{R_1} \cdot 100\% , \quad (4.4)$$

gdzie:  $R'_i$  – procent pozostałej energii odkształcenia ,  $R_i$  – energia odkształcenia dla  $i$ -tego cyklu ,  $R_1$  – energia odkształcenia dla pierwszego cyklu.

Z badań wynika, że wartość  $R'_i$  maleje dla kolejnych cykli odkształcania. Ponadto stwierdzono, że jest ona większa dla izotropowych elastomerów magnetoreologicznych w porównaniu do zawierających taką samą ilość cząstek magnetycznych materiałów anizotropowych.

Ponieważ nie było możliwe rozróżnienie zmian amplitudy rejestrowanej siły wywołanych działaniem pola magnetycznego od spowodowanych występowaniem opisanego powyżej zjawiska, otrzymane wyniki badań nie mogły posłużyć do jednoznacznego określenia wpływu pola magnetycznego na własności mechaniczne badanych kompozytów magnetoreologicznych. Z tego względu konieczne było ujednoczenie programu badań tak, aby w późniejszej analizie dla poszczególnych próbek porównywać wyniki dla tych samych z kolei cykli wymuszenia. Do badań używano tylko świeżych próbek, które nie były wcześniej obciążane. Dla każdej próbki ustalano jedną, stałą wartość natężenia pola magnetycznego. Obciążanie zaczynało się od amplitudy odkształcenia 0,025 i częstotliwości 1 Hz. Po 100 cyklach wzrastała częstotliwość wymuszenia. Kiedy wartość częstotliwości dochodziła do maksymalnej założonej przy zadanej amplitudzie, zwiększano amplitudę odkształcenia, a następnie odpowiednio częstotliwość. Dla każdej wartości amplitudy i częstotliwości wymuszenia program obciążania obejmował po 100 cykli. W literaturze przedmiotu znaleziono opis podobnych badań, przed którymi w celu wyeliminowania efektu Mullinsa świeżą próbkę obciążano jedynie przez 5 cykli [163], jednak badania własne wykazały, iż efekt spadku wartości naprężenia zmniejsza się wyraźnie dopiero po około 90 cyklach. Dlatego wybrano wartość 100 jako optymalną. Całkowita ilość cykli podczas badania każdej próbki wynosiła 2900, natomiast całkowity czas pomiaru 1201,5 sekundy. Zestawienie wszystkich wartości wymuszenia przedstawiono w tabeli 4.5.

W czasie pomiaru zapisywano do pliku czas, wartości przemieszczenia, siły rejestrowanej przez czujnik MTS oraz wartości siły rejestrowanej przez dodatkowy czujnik PCB. Sygnał próbkowano i zapisywano z częstotliwością 4096 Hz. Do obróbki danych napisano specjalny program, używając oprogramowania HP VEE. Program wyodrębniał po jednym okresie przebiegu dla każdej wartości częstotliwości i amplitudy wymuszenia. Zawsze wybierano ten sam z kolei cykl, a więc historia obciążenia każdej próbki była dokładnie

Tablica 4.5. Program obciążeń mechanicznych próbek elastomeru magnetoreologicznego.

| Numery cykli | Amplituda odkształcenia $\gamma_a$ [-] | Częstotliwość $f$ [Hz] |
|--------------|--|------------------------|
| 1 – 800      | 0,025                                  | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |
| 801 – 1400   | 0,050                                  | 1, 2, 3, 4, 5, 6       |
| 1401 – 1900  | 0,075                                  | 1, 2, 3, 4, 5          |
| 1901 – 2400  | 0,100                                  | 1, 2, 3, 4, 5          |
| 2401 – 2900  | 0,125                                  | 1, 2, 3, 4, 5          |

taka sama. Dzięki temu możliwe było jednoznaczne stwierdzenie, że uzyskane zmiany wynikają jedynie z działania pola magnetycznego, a nie różnej historii obciążania. Do dalszej analizy zarejestrowane sygnały przeliczano na przebiegi naprężenia i odkształcenia w czasie, również wykorzystując samodzielnie napisany program, przy użyciu pakietu HP VEE.

Podczas badań kontrolowano także temperaturę cewek. Stosowano wentylator do ich ochładzania. Podczas badań materiałów wykonanych na bazie elastomerów magnetoreologicznych ważne jest utrzymanie stałej temperatury, gdyż jej wahania wpływają na ich własności.

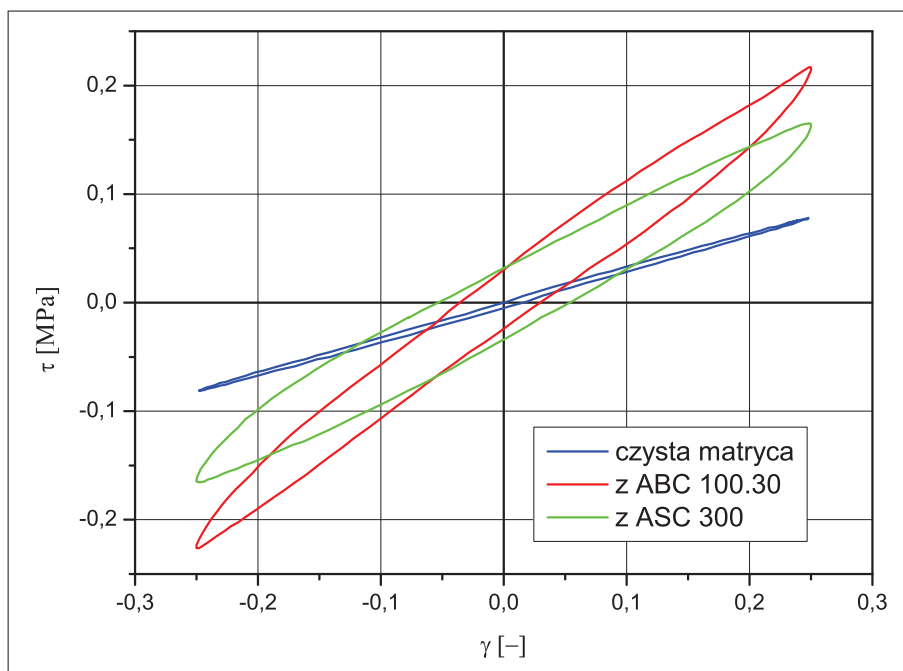
#### 4.2.4. Wpływ wypełnienia na właściwości elastomeru MR

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania, do celów porównawczych, próbki wykonanej z czystego elastomeru termoplastycznego *Téfabloc*<sup>®</sup> oraz wypełnionej proszkiem ferromagnetycznym. Wyniki pokazano na rysunku 4.19 w postaci pętli histerezy w układzie naprężenie–odkształcenie.

Widoczny na wykresie efekt powiększenia pętli jest spowodowany wprowadzeniem cząstek żelaza, które przy dużym zagęszczeniu (w badanych próbkach około 30% objętościowo) w momencie obciążania i odkształcania próbki zaczynają przemieszczać się względem siebie. Tarcie wewnętrzne pomiędzy cząstkami jak i matrycą jest dyssypatywnym procesem, który powoduje straty. Oczywiście pętla czystego materiału także nie jest pętlą o zerowym polu powierzchni i procesy tarcia wewnętrznego w niej zachodzą. Natomiast ich skala jest zdecydowanie mniejsza.

Oprócz możliwości porównania wpływu cząstek żelaza na własności mechaniczne materiału, badanie czystej matrycy umożliwiło również weryfikację działania układu pomiarowego. Przeprowadzono badania dla skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego. W obu przypadkach uzyskano jednakowe wyniki, co pozwoliło jednoznacznie stwierdzić brak wpływu pola magnetycznego na poprawność działania układu pomiarowego.

Do opisanego własności tłumiących badanych materiałów przyjęto energię przez nie rozpraszaną podczas cyklicznego obciążania, wyrażoną poprzez pole histerezy  $\Delta W$  w układzie współrzędnych  $\tau - \gamma$ . Do obliczenia wartości



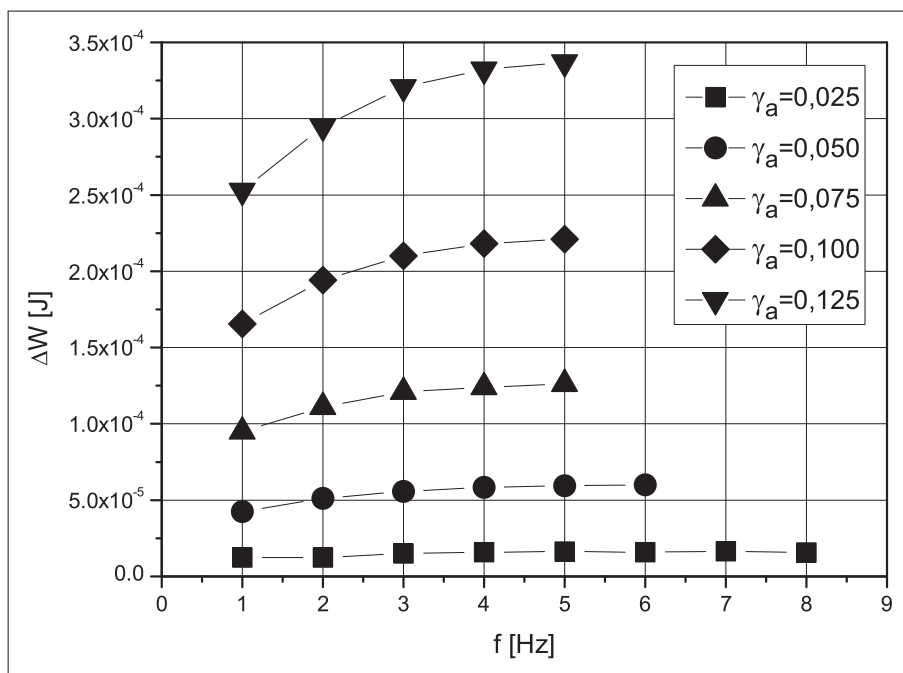
Rysunek 4.19. Porównanie pętli histerezy otrzymanych dla próbki czystego elastomeru *Téfabloc*<sup>®</sup> oraz próbek elastomerów wypełnionych proszkiem żelaza.

$\Delta W$  na podstawie otrzymanych danych eksperymentalnych wykorzystano algorytm oparty na analizie i syntezie sygnałów za pomocą transformaty Fouriera [164]. Wyniki badań otrzymane dla czystego elastomeru uzyskane podczas obciążania cyklicznego zestawiono na wykresie 4.20. Przedstawiono je jako zależność energii rozpraszanej podczas jednego cyklu od częstotliwości wymuszania, dla różnych amplitud odkształcenia. Zauważyć można, że materiał wybrany na matrycę kompozytów magnetoreologicznych cechuje bardzo mała pętla histerezy.

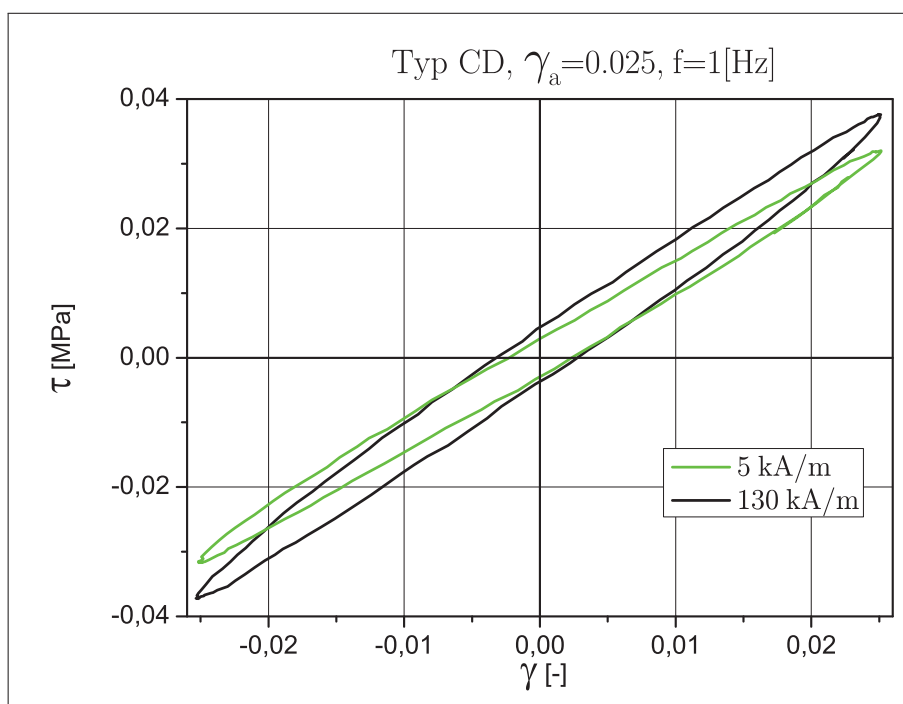
#### 4.2.5. Badania cykliczne elastomerów magnetoreologicznych

Jako bezpośredni rezultat badań uznano pętle histerezy w układzie naprężenie odkształcenie. W zależności od typu obciążania i stymulacji polem magnetycznym otrzymywano różne kształty i wielkości. Ponieważ z każdego eksperymentu otrzymywano bardzo dużą ilość danych i pokazywanie wszystkich pętli nie jest sensowne, na rysunkach będą pokazane tylko reprezentatywne przypadki. Przykładowo zaprezentowano pętle dla materiału typu CD, przy różnych polach magnetycznych, na rysunku 4.21.

W celu precyzyjnego porównania zmian wywołanych polem magnetycznym w poszczególnych typach próbek wprowadzono dwa parametry:  $\delta\tau_a$  oraz  $\delta W$ . Pierwszy z nich, opisany równaniem (4.5), określa procentową zmianę amplitudy naprężenia ścinającego wywołaną działaniem pola magnetycznego, natomiast drugi parametr, opisany równaniem (4.6), określa zmianę pola pętli histerezy pod wpływem działającego pola magnetycznego. Wartości parametrów  $\delta\tau_a$  oraz  $\delta W$  wyznaczono dla wszystkich przebadanych materiałów.



Rysunek 4.20. Wykres pokazujący wartości pól pętli histerezy otrzymanych podczas cyklicznego ścinania czystego elastomeru, w zależności od częstotliwości wymuszania, dla różnych amplitud wymuszenia.



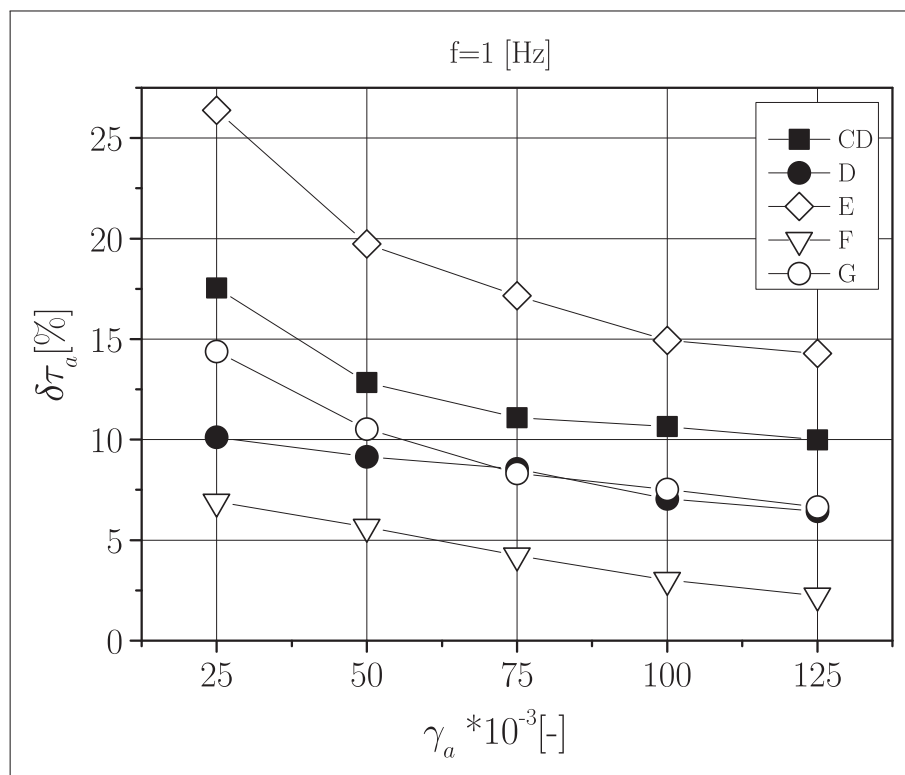
Rysunek 4.21. Pętle histerezy dla materiału z CD przy dwóch skrajnych wartościach natężenia pola magnetycznego.

$$\delta\tau_a = \frac{\tau_a(H_1) - \tau_a(H_0)}{\tau_a(H_0)} \cdot 100\% , \quad (4.5)$$

gdzie:  $\tau_{a(H_0)}$  – wartość amplitudy naprężenia ścinającego przy najmniejszym natężeniu pola magnetycznego;  $\tau_{a(H_1)}$  – oznacza wartość amplitudy naprężenia ścinającego przy największym natężeniu pola magnetycznego

$$\delta w = \frac{\Delta W_{(H_1)} - \Delta W_{(H_0)}}{\Delta W_{(H_0)}} \cdot 100\% , \quad (4.6)$$

gdzie:  $\Delta W_{(H_0)}$  – wartość pola pętli przy najmniejszym natężeniu pola magnetycznego;  $\Delta W_{(H_1)}$  – wartość pola pętli przy największym natężeniu pola magnetycznego.

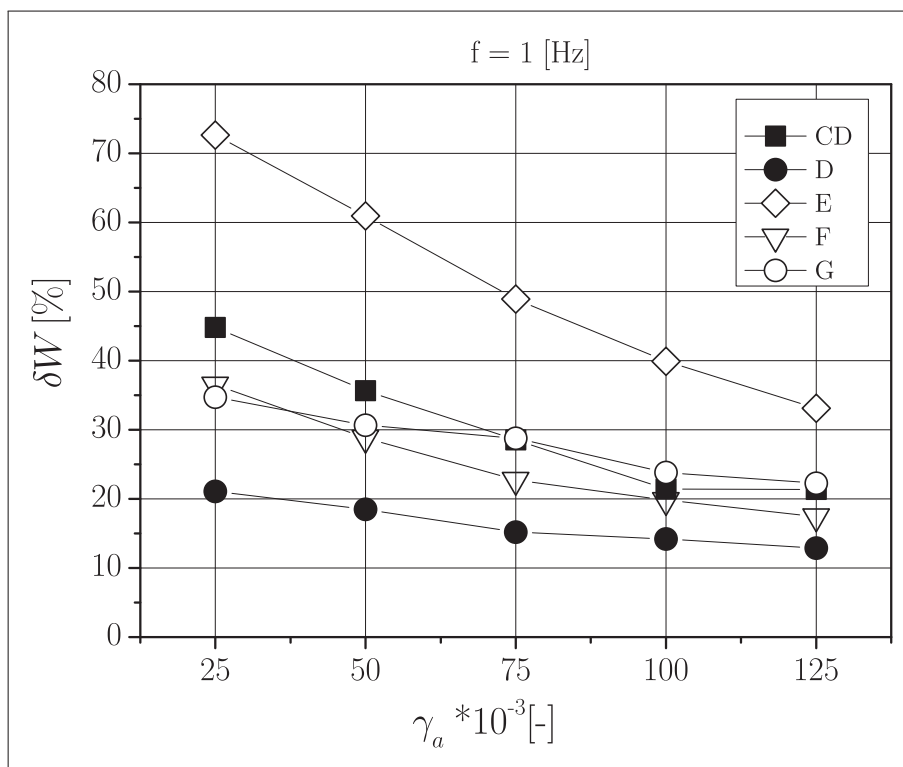


Rysunek 4.22. Zależność procentowej zmiany amplitudy naprężenia ścinającego wywołanej działaniem pola magnetycznego od amplitudy wymuszenia, dla częstotliwości wymuszenia równej 1 Hz, dla wybranych próbek.

Na wykresie 4.22 przedstawiono zależność  $\delta\tau_a$  od amplitudy odkształcenia dla jednej wybranej częstotliwości wymuszenia równej 1 Hz, na przykładzie kilku typów badanych elastomerów magnetoreologicznych. Z kolei wykres 4.23 prezentuje wartości  $\delta W$  w funkcji amplitudy odkształcenia, również dla częstotliwości wymuszenia 1 Hz, dla tych samych próbek.

Maksymalne wartości obu parametrów zarejestrowano podczas badania kompozytu zawierającego 35 % cząstek żelaza objętościowo oraz olej, oznaczonego symbolem E. Wartości obu parametrów wynosiły:  $\delta\tau_a=26,38\%$  oraz  $\delta W=72,62\%$  ([165,166]). Uzyskano je dla częstotliwości wymuszenia równej 1 Hz oraz amplitudy odkształcenia  $\gamma_a=0,025$ .

Uzyskane wyniki są zgodne z przewidywaniami, według których maksymalny efekt magnetoreologiczny można uzyskać w materiale zawierającym



Rysunek 4.23. Zależność procentowej zmiany pola pętli histerezy wywołanej działaniem pola magnetycznego od amplitudy wymuszenia, dla częstotliwości wymuszenia równej 1 Hz, dla wybranych próbek.

ilości cząstek magnetycznych zbliżoną do wartości CPVC [74]. Także zgodnie z danymi prezentowanymi w literaturze przedmiotu korzystny wpływ na badany efekt miało dodanie oleju, zmniejszającego sztywność matrycy [79].



## 5. Elastomer magnetoreologiczny - badania wybranego typu

W poprzednim rozdziale opisano procedurę wytwarzania kilku typów elastomerów magnetoreologicznych. Różniły się one zarówno pod względem wypełnienia, matrycy, jak i sposobu wykonania. W toku prowadzonych badań wstępnych uzyskano szereg wyników, które pozwoliły na ocenę przydatności otrzymanych materiałów w świetle postawionych na początku założeń. Głównym kryterium oceny było uzyskanie największego efektu magnetoreologicznego. Dlatego do dalszej dokładnej analizy wybrano materiał oznaczony symbolem E.

### 5.1. Procedura wykonywania elastomerów typu Ed

Rozdział ten zawiera opis wytwarzania serii próbek elastomeru na bazie typu E, które posłużyły do wykonania ostatniego etapu badań będących tematem tej rozprawy. Należy zaznaczyć, iż w tym przypadku procedura wytwarzania różniła się nieznacznie od procedury opisanej w rozdziale 4.2.1.5. W trakcie realizacji badań uzyskano możliwość wykonania próbek z wykorzystaniem mieszalnika, który gwarantuje wysoką powtarzalność wyników, a w porównaniu do poprzednio stosowanej technologii mieszania, umożliwia lepszą kontrolę procesu. Uznano, iż poprzednio uzyskane do tej pory próbki i wyniki wstępne badań można zachować. Ze względu na rozróżnienie wyników dla próbek wykonanych w nowym mieszalniku wprowadzono nowe oznaczenie – typ Ed.

Próbki elastomeru typu Ed zostały wytworzone w następujących krokach: przygotowanie materiału, uformowanie materiału, wycięcie próbek, wklejenie próbek między okładziny. W tabeli 5.1 przedstawiono skład wykonywanych próbek typu Ed.

| <b>Składnik</b> | <b>Wypełnienie<br/>magnetyczne [g]</b> | <b>Materiał<br/>matrycy [g]</b> | <b>Dodatki<br/>[g]</b> |
|-----------------|--|---------------------------------|------------------------|
| Typ             | ASC 300                                | Tefabloc                        | Olej parafinowy        |
| Ilość           | 125                                    | 23,4                            | 2,6                    |

Tablica 5.1. Składy próbek elastomeru magnetoreologicznego typu Ed.

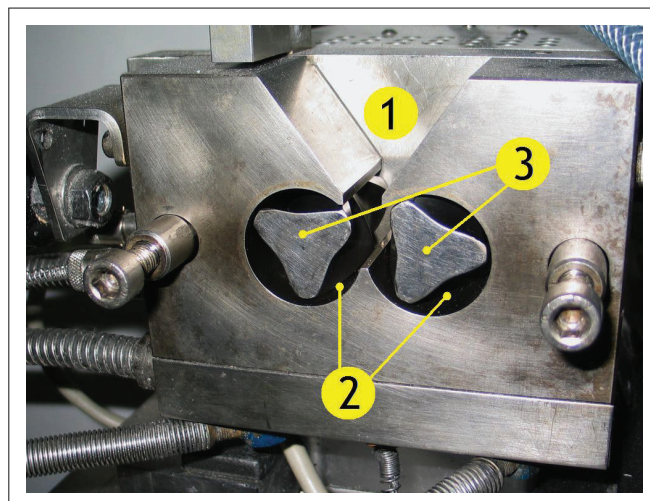
Do przygotowania ostatecznej wersji materiału użyto urządzenia Plasti-Corder Lab-Station firmy Brabender z przystawką do mieszania polime-

rów (5.1) znajdującego się na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej w Zakładzie Inżynierii i Technologii Polimerów. Sterowanie mieszalnikiem odbywało się za pośrednictwem komputera PC, dzięki czemu istniała możliwość obserwacji parametrów procesu w czasie rzeczywistym oraz ich późniejszy zapis. Mieszanie elastomerów odbywało się w komorze przedstawionej na rysunku 5.2 nagrzanej do temperatury  $190^{\circ}\text{C}$ . Dwa rotory znajdujące się w komorze miały zadaną prędkość obrotową 60 obr./min oraz początkowy moment obrotowy 1 Nm.



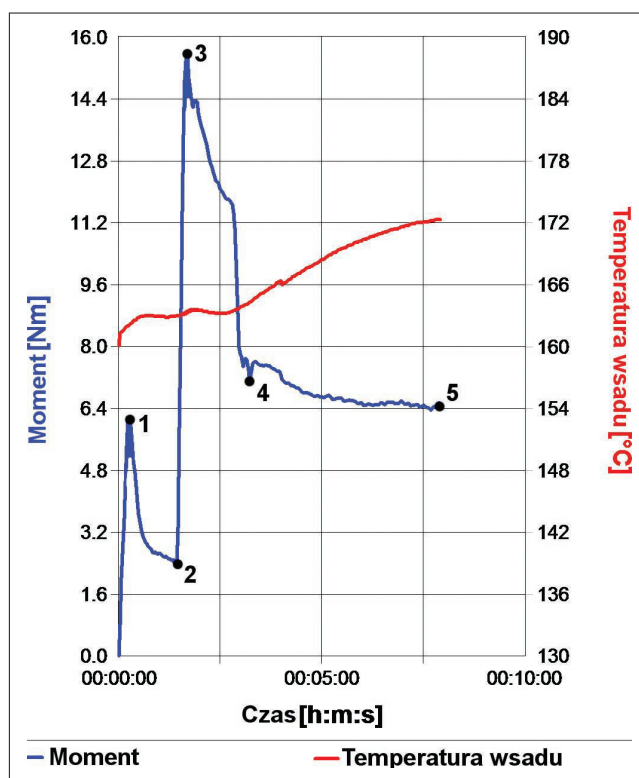
Rysunek 5.1. Plasti-Corder Lab-Station (<http://www.brabender.de>).

Plastogram przedstawiony na rysunku 5.3 przedstawia przebieg procesu mieszania elastomeru typu Ed. Na wykresie przedstawiono moment obrotowy oraz temperaturę wsadu znajdującego się w komorze mieszalnika w zależności od czasu. Poszczególne punkty na wykresie określają kiedy dodawano poszczególne składniki elastomeru do mieszalnika. Proces mieszania rozpoczynano od wsypania materiału matrycy w postaci granulatu do nagrzanej komory mieszalnika z obracającymi się rotorami (punkt 1 wykresu 5.3). Materiał mieszano przez około 1 minutę, aż do jego całkowitego uplastycznienia (punkt 2) po czym dodawano proszek żelaza ASC300, co powodowało bardzo szybki wzrost momentu obrotowego (punkt 3). Moment obrotowy stabilizował się po połowie minuty, co oznaczało wymieszanie się materiału matrycy z żelazem. Wtedy dodawano plastyfikator w postaci oleju parafinowego (punkt 4). Całość mieszano przez 5 minut. Rzeczywista temperatura materiału wahała się w zakresie  $160 - 175^{\circ}\text{C}$ , co było wystarczające do uplastycznienia matrycy i wymieszania wszystkich składników. Po zakończeniu



Rysunek 5.2. Zdjęcie komory mieszalnika urządzenia Plasti-Corder Lab-Station, gdzie: 1 - lej wlotowy, 2 - komora mieszalnika, 3 - rotory.

procesu mieszania, gorącą masę wyjmowano z komory mieszalnika i pozostawiano w temperaturze pokojowej aż do ostygnięcia.

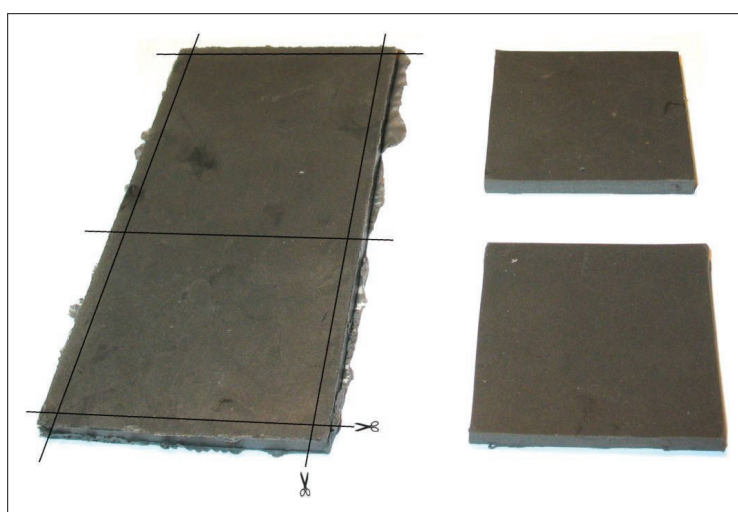


Rysunek 5.3. Plastogram uzyskany podczas wytwarzania próbek typu Ed. Punkty na wykresie oznaczają: 1 - dodanie polimeru matrycy, 2-3 - dodanie proszku żelaza, 4 - dodanie oleju parafinowego, 5 - zakończenie procedury, wyciągnięcie wsadu z komory.

Kolejnym etapem w procesie przygotowania próbek było ich prasowanie. W tym celu ostudzony materiał cięto, co pozwalało na równomierne wypeł-

nienie formy przedstawionej na rysunku 4.10. Formę wykonano z blachy stalowej o grubości 4 mm z prostokątnym otworem o wymiarach 50 x 100 mm oraz dwóch okładzin, również wykonanych z blachy. Materiał elastomeru oddzielano od okładzin przekładkami z folii PET, co miało zapobiegać przywieraniu materiału do okładzin.

W procesie prasowania próbek wykorzystano prasę tzw. gorącą oraz zimną. Na początku formę wraz z materiałem wkładano do prasy gorącej (4.11a) podgrzanej do temperatury 190°C. Po całkowitym uplastycznieniu materiału zwiększano docisk do 200kG/cm<sup>2</sup> i zostawiano pod obciążeniem na około 2 minuty. Wyprasowaną próbkę wraz z prasą przekładano do prasy zimnej (4.11b) gdzie stygła przez 5 do 7 minut pod obciążeniem 100kG/cm<sup>2</sup>. Kiedy próbka osiągała około 40°C, wyciągana była z prasy i studzona w temperaturze pokojowej. Uformowana próbka miała wymiary 50 x 100 x 4 mm.



Rysunek 5.4. Próbką kompozytu po wyjęciu z formy oraz po docięciu właściwego kształtu - gotowa do wklejenia w uchwyty.

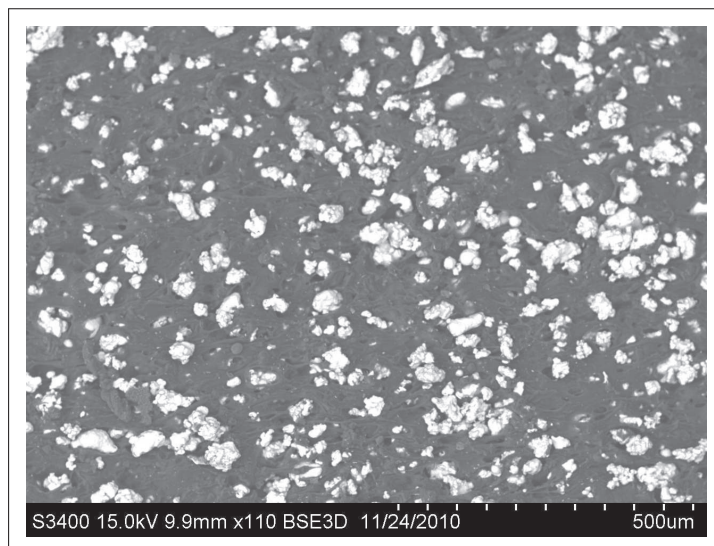
Otrzymane wypraski elastomeru magnetoreologicznego cięto na prostopadłościennie o wymiarach 40 x 40 x 4 mm, co przedstawiono na rysunku 5.4. Krawędź zewnętrzną odcinano w celu usunięcia nierównych krawędzi oraz defektów kumulujących się na brzegach wyprasek. Z jednej wypraski otrzymywano dwie wycięte płytki, które wklejano między okładziny z laminatu szklano-epoksydowego.

Wklejenie płytek między okładziny było ostatnim etapem przygotowywania próbek do badań i odbywało się etapowo. Każdą stronę płytki przyklejano jednorazowo tylko do jednej okładziny, następnie suszono pod niewielkim dociskiem przez 24 godziny, aby zapewnić trwałość połączenia. Schemat łączenia do okładzin oraz proces klejenia odbywał się identycznie jak przy poprzednio wykonywanych próbkach.

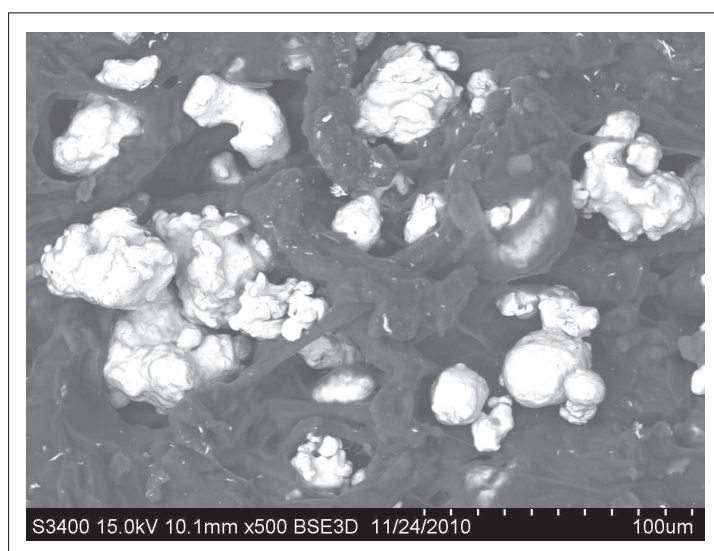
### 5.1.1. Badania mikroskopowe struktury wewnętrznej

Po wykonaniu próbek elastomerów poddano je dodatkowej ocenie. Z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego wykonano zdjęcia struktury wewnętrznej. Kolejne zdjęcia, przy różnych powiększeniach, zaprezentowano na ry-

sunku 5.5. Zdjęcia wykonano z wykorzystaniem detektora elektronów wstecznie rozproszonych BSE (z ang. backscattered electron). Technika ta pozwoliła na wyraźne zaobserwowanie materiału o większej gęstości - wypełnienia ferromagnetycznego.



(a)



(b)

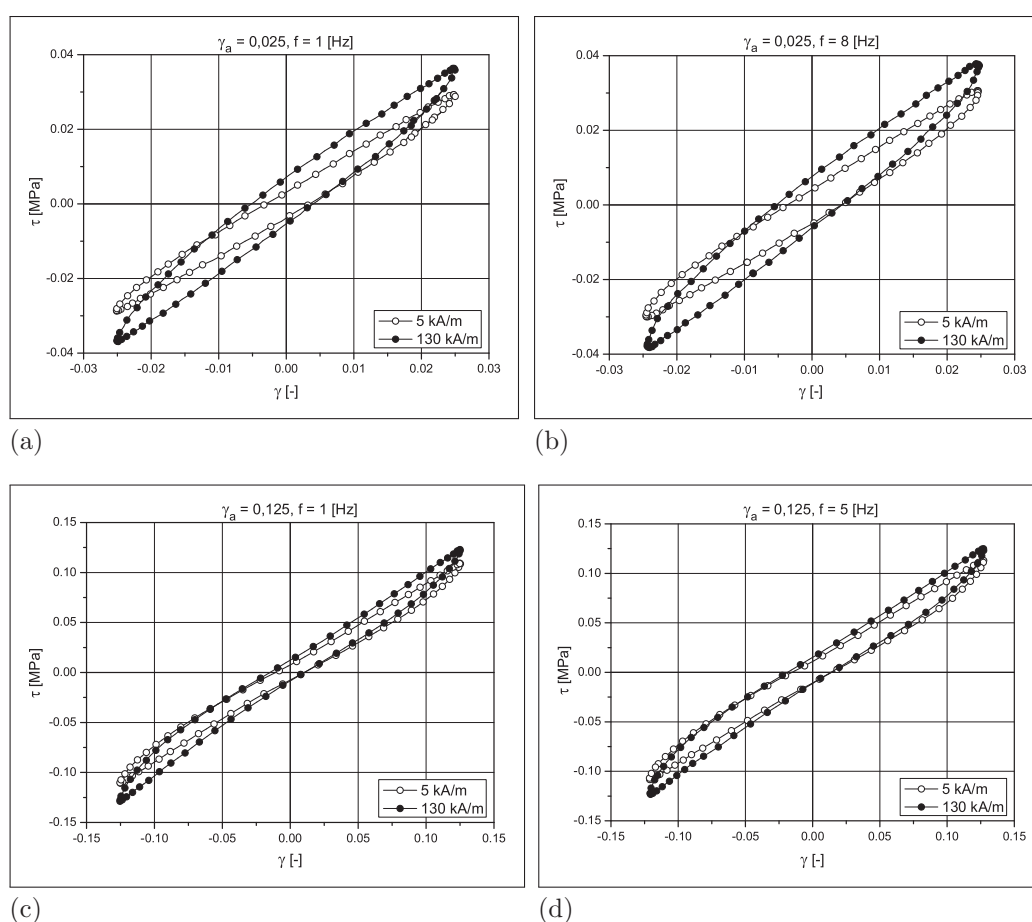
Rysunek 5.5. Zdjęcia struktury elastomeru magnetoreologicznego typu Ed. (Wykonane w Laboratorium Materiałów Zol-Żelowych i Nanotechnologii Politechniki Wrocławskiej).

Na pierwszym zdjęciu pokazano rozłożenie cząstek żelaza ASC300 w matrycy. Ich położenie jest równomierne i powtarzalne, co zaobserwowano na podobnych zdjęciach w całej objętości badanej próbki. Kolejne zdjęcie wykonane w dużym powiększeniu uwidacznia nieciągłości związane z połączeniem proszku i matrycy. Ich wpływ na globalne właściwości elastomeru magnetoreologicznego pozostaje jednak nieokreślony i wymaga innego rodzaju badań, których zakres wykracza poza zakres tej rozprawy.



### 5.1.2. Badania właściwości magnetomechanicznych

Na rysunku 5.6 zestawiono pętle histerezy uzyskane podczas cyklicznego obciążania, które stanowiły dane wejściowe do dalszej analizy. Na wykresach zaprezentowano pojedyncze pętle zarejestrowane dla skrajnych wartości amplitud oraz częstotliwości wymuszania, przy minimalnych i maksymalnych wartościach natężenia pola magnetycznego. Zauważyć można wyraźny wpływ pola magnetycznego na uzyskane wyniki, w szczególności dla minimalnej amplitudy odkształcenia. Wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego rośnie pole powierzchni pętli histerezy. Działanie pola magnetycznego powoduje także obrócenie pętli przeciwnie do kierunku wskazówek zegara, zwiększając amplitudę rejestrowanego naprężenia.

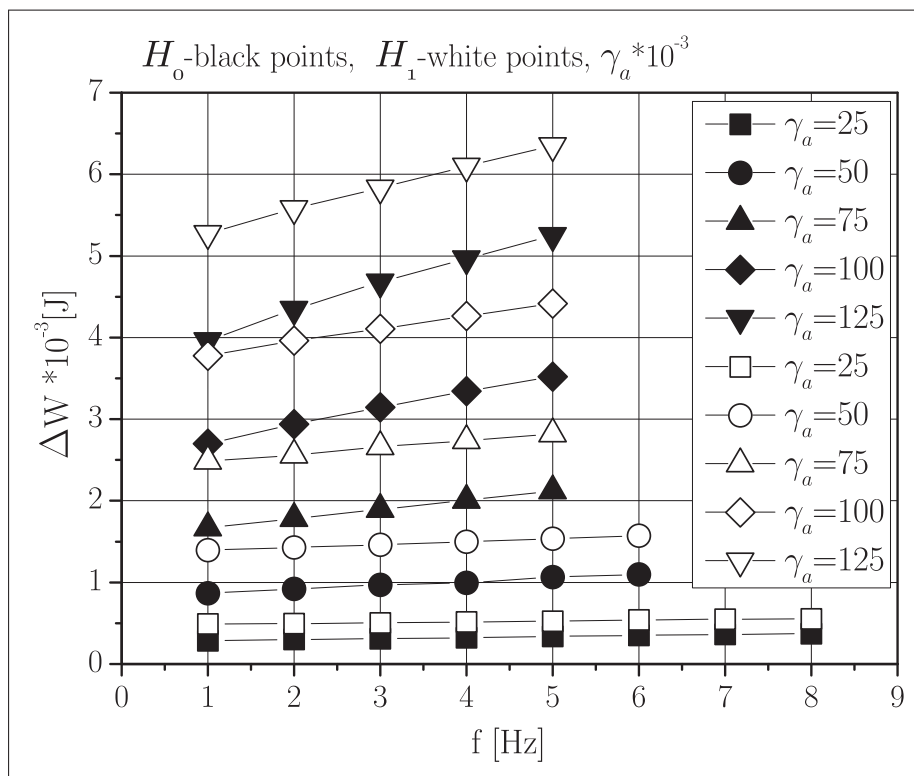


Rysunek 5.6. Pętle histerezy dla próbki oznaczonej jako Ed, przy skrajnych wartościach wymuszeń: (a)  $\gamma_a=0,025$  i  $f=1$  Hz, (b)  $\gamma_a=0,025$  i  $f=8$  Hz, (c)  $\gamma_a=0,125$  i  $f=1$  Hz, (d)  $\gamma_a=0,125$  i  $f=8$  Hz.

Wpływ pola magnetycznego na wartość pola pętli histerezy rejestrowanej podczas cyklicznego obciążania kompozytu typu Ed, pokazano na wykresie zbiorczym na rysunku 5.7. Przedstawiono na nim wartości  $\Delta W$  w zależności od częstotliwości wymuszania dla wszystkich amplitud odkształcenia, różniąc wyniki uzyskane podczas poddań ze skrajnymi wartościami natężenia



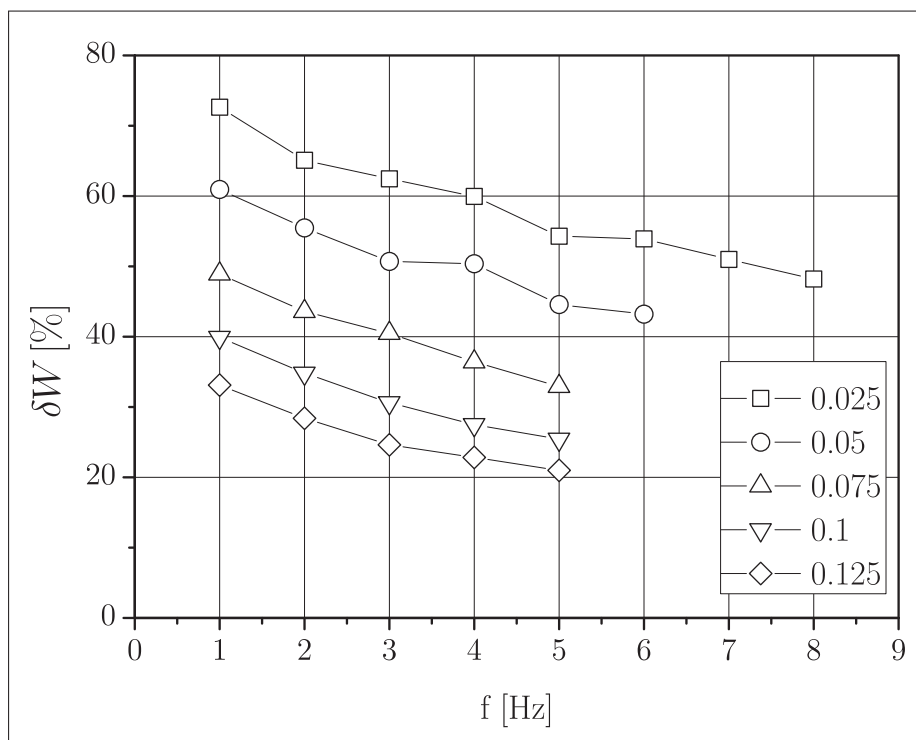
pola magnetycznego. Widać wyraźnie, iż dla wszystkich cykli pomiarowych, włączenie pola magnetycznego powoduje wzrost wartości pola pętli histerezy. Dodatkowo zauważyć można liniowy wzrost wartości  $\Delta W$  wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszania.



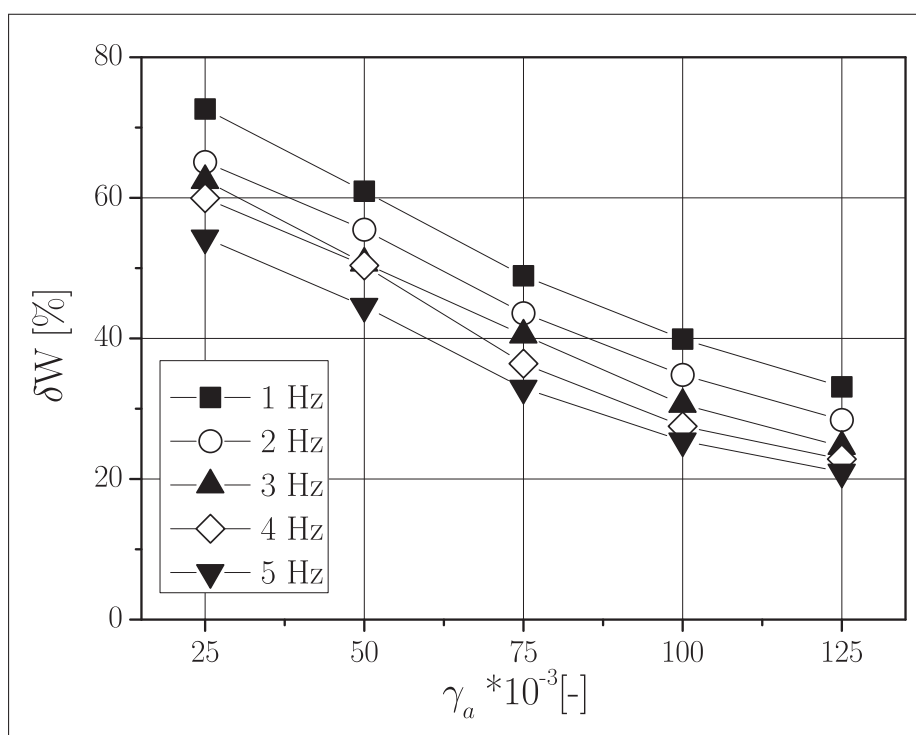
Rysunek 5.7. Wpływ pola magnetycznego na pole pętli histerezy pokazany na wykresie zależności wielkości pól powierzchni pętli histerezy od częstotliwości wymuszania, dla różnych amplitud odkształcenia,  $H_0=0$  kA/m,  $H_1=130$  kA/m [166].

Maksymalny bezwzględny wzrost wartości pola pętli histerezy wywołany działaniem pola magnetycznego, wynoszący 0,0013 J, uzyskano dla maksymalnej amplitudy odkształcenia ( $\gamma_a = 0,125$ ) i minimalnej częstotliwości wymuszania ( $f = 1$  Hz). Jednak wraz ze wzrostem amplitudy odkształcenia rośnie też wartość  $\Delta W$  uzyskana bez działania pola magnetycznego, przez co duży przyrost względny nie odpowiada zmianie bezwzględnej. Obserwuje się wręcz sytuację odwrotną, gdyż największe bezwzględne przyrosty wartości pola pętli uzyskano dla maksymalnych amplitud odkształcenia, podczas gdy największe względne powiększenie pola pętli uzyskano dla minimalnych amplitud odkształcenia. Zilustrowano to na rysunku 5.8, pokazując procentową zmianę pola pętli wywołaną działaniem pola magnetycznego.

Na wykresie 5.8a pokazano o ile procent pod wpływem działania pola magnetycznego zwiększyło się pole pętli histerezy w funkcji częstotliwości wymuszenia, dla wszystkich amplitud odkształcenia. Z kolei wykres 5.8b ilustruje również procentową zmianę, ale w funkcji amplitudy odkształcenia dla wszystkich częstotliwości wymuszenia. Wyraźnie widać, że maksymalna procentowa zmiana, będąca zmianą względną, uzyskana została dla częstotli-

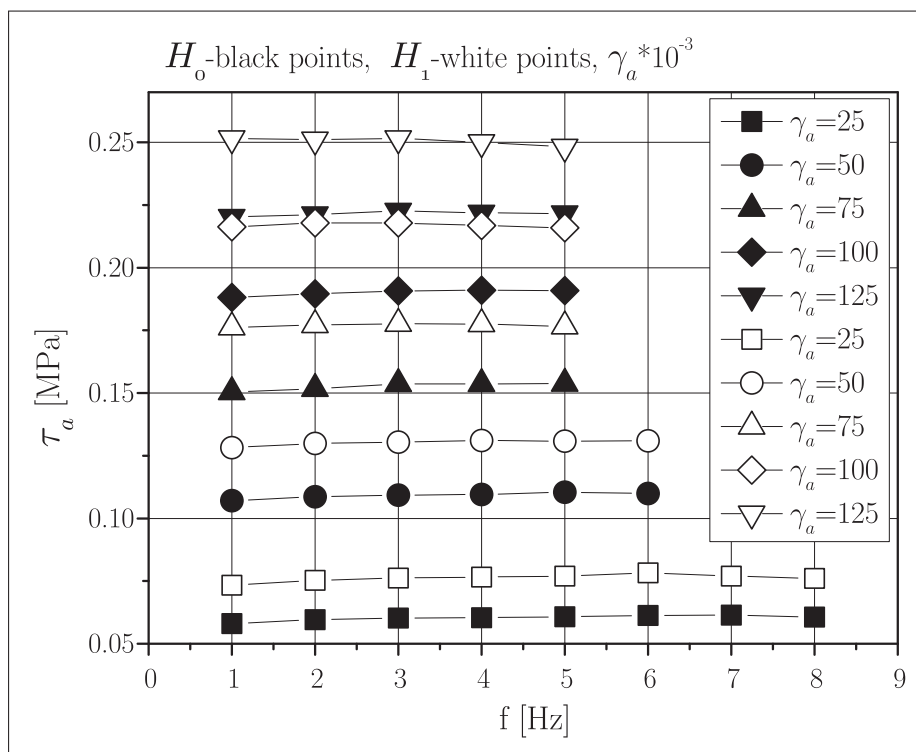


(a)



(b)

Rysunek 5.8. Zależność procentowej zmiany pola pętli histerezy od częstotliwości wymuszenia dla różnych wartości amplitud wymuszenia - (a) oraz od amplitudy wymuszenia dla różnych częstotliwości wymuszenia - (b) dla elastomeru magnetoreologicznego typu Ed [166].



Rysunek 5.9. Wpływ pola magnetycznego na amplitudę naprężenia pokazany na wykresie zależności amplitudy naprężenia od częstotliwości wymuszania, dla różnych amplitud odkształcenia [166].

wości wymuszania  $f = 1\text{Hz}$ , podobnie jak maksymalny wzrost bezwzględny wartości  $\Delta W$ . Jednak w przeciwieństwie do przyrostu bezwzględnego, procentowy przyrost wynoszący  $\delta W = 72,62\%$ , jest największy dla najmniejszej amplitudy odkształcenia. Wyraźnie widoczne jest, że wartość  $\delta W$  maleje wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszania i amplitudy odkształcenia.

Oprócz wzrostu pola pętli histerezy, pod wpływem działania pola magnetycznego obserwuje się także zmianę rejestrowanego naprężenia, co pokazano na rysunku 5.9. Zaprezentowano na nim zależność naprężenia od częstotliwości wymuszania dla wszystkich amplitud odkształcenia, dla obu wartości natężenia pola magnetycznego. Zauważyć można wzrost wartości  $\tau$  wywołany działaniem pola magnetycznego dla wszystkich parametrów wymuszania.

### 5.1.3. Szczegółowa analiza wybranego materiału - wytrzymałość na rozrywanie

Elastomer termoplastyczny *Téfabloc*<sup>®</sup> został wybrany na matrycę kompozytu magnetoelastycznego między innymi ze względu na jego bardzo dobre parametry mechaniczne, mając na uwadze możliwość zastosowanie wytworzonego materiału w aplikacji przemysłowej. Dodanie cząstek żelaza do elastomeru powoduje pogorszenie tych parametrów, dlatego przeprowadzono badania mające na celu sprawdzenie, czy kompozyt będzie odpowiednio wytrzymały. Do testów wybrano materiał typu Ed, dla którego zarejestrowano największy efekt magnetoelastyczny. Do pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przygotowano próbki prostokątne o przekroju 10 mm x 4 mm.



Rysunek 5.10. Zrywarka TIRA test 2705 z zamocowaną próbką kompozytu magnetoreologicznego typu ASC – Ed podczas eksperymentu.

Rozciągano je na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej (zrywarcie) typu TIRA test 2705 (rysunek 5.10). Próbkę zaciskano na obu końcach w standardowych uchwytach. Dolny uchwyt pozostawał nieruchomy, natomiast przemieszczał się uchwyt górny. Podczas testu utrzymywano stałą prędkość rozciągania. Przeprowadzono testy dla pięciu próbek typu Ed o jednakowych wymiarach. Wyniki miały charakter orientacyjny, jednakże jasno widać było iż wytrzymałość próbek typu Ed na bazie wybranej matrycy jest bardzo duża i nawet przy odkształceniach rzędu kilkuset procent nie dochodzi do zerwania próbki. Jest to rezultat bardzo dobry zważywszy na poprzednie doświadczenia z matrycami silikonowymi których wytrzymałość spadała tak znacznie, iż można było je łamać w rękach.

Część III

**Modelowanie właściwości  
magnetoreologicznych**

## 6. Weryfikacja modelu

W tym rozdziale opisano próbę weryfikacji opisu związków konstytutywnych w badanym materiale za pomocą modelu Kelvina-Voigta. Jak wynika z przeprowadzonych dotychczas badań eksperymentalnych, zależności naprężenie-odkształcenie w badanym materiale zbliżone są do rezultatów uzyskiwanych dla materiałów typowo lepkosprężystych. Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, iż model Kelvina-Voigta jest najczęściej stosowanym modelem w przypadku tych materiałów.

Analiza danych literaturowych dotyczących wytwarzania, badania i modelowania właściwości elastomerów magnetoreologicznych pokazuje, iż najczęstszym stosowanym do ich opisu jest model tzw. lepkosprężysty. Jest on powszechnie stosowany w reologii tworzyw sztucznych, a ponieważ matryce elastomerów magnetoreologicznych wytwarzane są najczęściej z materiałów reprezentujących tą właśnie grupę, może to tłumaczyć tak częste użycie tego właśnie modelu. Ze względu jednak na drugi składnik kompozytów magnetoreologicznych jakim jest wypełnienie ferromagnetyczne, należy uwzględnić także dodatkowe cechy i właściwości. Wzajemne oddziaływanie pomiędzy elementami wypełnienia, zazwyczaj metalicznymi cząstkami o wielkości kilku mikrometrów, wpływa w kluczowy sposób na jego globalne właściwości, zwane właściwościami magnetoreologicznymi. W ogólności określa się je jako zależność pola odkształceń i naprężeń w funkcji natężenia pola magnetycznego. W celu przystosowania modelu lepkosprężystego do opisu elastomerów magnetoreologicznych należy uzależnić jego parametry od pola magnetycznego. W tym celu wyznacza się bezpośrednią funkcję zależności sztywności i lepkości.

Model lepkosprężysty w dużym stopniu upraszcza opis matematyczny elastomerów magnetoreologicznych. W większości wyników prezentowanych w pracach naukowych z tego tematu autorzy unikają pokazywania przebiegów rzeczywistych. Analiza wyników zostaje sprowadzona do pokazania wartości modułu zachowawczego  $G'$  oraz modułu stratności  $G''$ , które dodatkowo uzmiennia się w zależności od różnych parametrów. Bez wykresów pokazujących pętle histerezy, bądź przebiegi czasowe dla naprężenia i odkształcenia, nie ma możliwości weryfikacji, czy związki konstytutywne w danym materiale można opisać za pomocą modelu lepkosprężystego. Ich brak można tłumaczyć korzystaniem przez autorów z uproszczonych procedur badawczych na reometrach, które umożliwiają jedynie uzyskanie wyniku w postaci zależności  $G'$  oraz  $G''$ . Należy także uwzględnić szeroką paletę typów elastomerów magnetoreologicznych. Połączenie matrycy z tworzywa sztucznego i wypełnienia ferromagnetycznego może być realizowane na bardzo wiele sposobów. Modyfikacjom mogą ulegać zarówno typy matryc i wypełnień jak i sposób ich



połączenia i wzajemnego ułożenia. Wyniki analiz i badań przeprowadzonych poniżej będą opierały się na materiale wytworzonym przez autora tej pracy i ewentualne porównania do wyników uzyskanych przez innych autorów powinny być prowadzone z uwzględnieniem różnic w strukturze porównywanych materiałów.

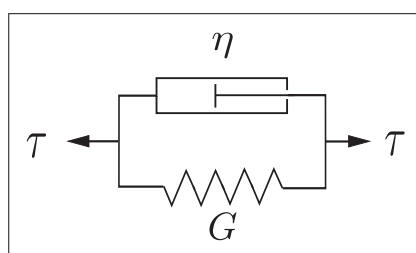
Mając na uwadze powyższą dyskusję postawiono sobie za cel sprawdzenie możliwości opisu wykonanego materiału elastomeru magnetoreologicznego za pomocą modelu Kelvina-Voigta.

## 6.1. Model Kelvina-Voigta

W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawowe informacje na temat modelu lepkosprężystego zwanego modelem Kelvina-Voigta. Pokazano zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem oraz wyprowadzono zależności opisujące parametry modelu: lepkość i sztywność. Dodatkowo pokazano zależności pomiędzy parametrami modelu, a modułami sztywności i stratności.

### 6.1.1. Podstawowe zależności

Schemat modelu pokazano na rysunku 6.1. Składa się on z dwóch elementów połączonych równolegle. Całkowite naprężenie generowane jest jako suma oddziaływań każdego z nich osobno. Oba cechuje natomiast takie samo odkształcenie.



Rysunek 6.1. Schemat modelu Kelvina-Voigta.

Naprężenie całkowite w modelu jest wynikiem sumowania dwóch naprężeń:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 . \quad (6.1)$$

Jedno z nich pochodzi od elementu związanego z efektem lepkości, drugi natomiast od związanego ze sprężystością. Naprężenia w członie sprężystym zależą od odkształcenia  $\gamma$  i współczynnika proporcjonalności – sprężystości  $G$ :

$$\tau_1 = G\gamma_1 . \quad (6.2)$$

Naprężenia w członie lepkiem zależne są z kolei od prędkości odkształcenia  $\dot{\gamma}$  oraz współczynnika proporcjonalności – lepkości  $\eta$ :

$$\tau_2 = \eta\dot{\gamma}_2 . \quad (6.3)$$

Zależność naprężenie – odkształcenia można więc zapisać następująco:

$$\tau = G\gamma_1 + \eta\dot{\gamma}_2 , \quad (6.4)$$

gdzie odkształcenie dla obu elementów połączonych równolegle musi być jednakowe:

$$\gamma = \gamma_1 = \gamma_2. \quad (6.5)$$

Dla potrzeb badań eksperymentalnych i pomiarów wielkości rzeczywistych, prezentowanych w tej pracy, najłatwiej było uzyskać wyniki dla tzw. sterowania odkształceniem. Maszyna wytrzymałościowa MTS810, na której przeprowadzono badania, ma wbudowany układ sprzężenia zwrotnego, który umożliwia kontrolę odkształcenia. Kontroler PID ustala wartość siły tak, aby uzyskać założony przebieg odkształcenia. W badaniach cyklicznych założono przebieg funkcji odkształcenia w czasie o charakterze sinusoidalnym ze stałą amplitudą i zadaną częstotliwością. Z powyższych powodów dalszą analizę modelu prowadzono dla odkształcenia w postaci:

$$\gamma = \gamma_o \sin(\omega t) \quad (6.6)$$

oraz prędkości odkształcenia:

$$\dot{\gamma} = \gamma_o \omega \cos(\omega t), \quad (6.7)$$

gdzie  $\gamma_o$  oznacza amplitudę odkształcenia, a  $\omega$  częstość wymuszenia.

Podstawiając powyższe funkcje do równania 6.4 otrzymujemy następującą zależność:

$$\tau = G\gamma_o \sin(\omega t) + \eta\gamma_o\omega \cos(\omega t). \quad (6.8)$$

Powyższe równanie składa się z dwóch członów, które można przedstawić jako sumę dwóch naprężeń zmieniające się w czasie:

$$\tau = \tau'_o \sin(\omega t) + \tau''_o \cos(\omega t), \quad (6.9)$$

gdzie ich amplitudy wynoszą odpowiednio:

$$\tau'_o = G\gamma_o \quad \text{i} \quad \tau''_o = \eta\gamma_o\omega = \eta\dot{\gamma}_o. \quad (6.10)$$

### 6.1.2. Moduł moduł zachowawczy $G'$ i moduł stratności $G''$

W celu oznaczenia właściwości materiału do gromadzenia i rozpraszania energii wprowadza się pojęcie modułu zachowawczego (sprężystości)  $G'$  i modułu stratności (lepkiego)  $G''$ . Wyprowadza się je przez modyfikację wzoru 6.9. Dzieliąc równanie przez amplitudę odkształcenia  $\gamma_o$  i przekształcając otrzymuje się:

$$\tau = \gamma_o(G' \sin(\omega t) + G'' \cos(\omega t)), \quad (6.11)$$

gdzie:

$$G' = \frac{\tau'_o}{\gamma_o} = \frac{G\gamma_o}{\gamma_o}, \quad (6.12)$$

$$G'' = \frac{\tau''_o}{\gamma_o} = \frac{\eta\dot{\gamma}_o}{\gamma_o}. \quad (6.13)$$

Odpowiedzią materiału lepkosprężystego na sinusoidalnie zmienne odkształcenie jest sinusoidalnie zmienne naprężenie przesunięte w stosunku do niego w fazie. Można je zapisać wg poniższego wzoru:

$$\tau = \tau_o \sin(\omega t + \delta) , \quad (6.14)$$

gdzie  $\delta$  jest wartością kąta przesunięcia pomiędzy sygnałem naprężenia i odkształcenia. Dalej rozwijając powyższy wzór do postaci:

$$\tau = \tau_o (\sin(\omega t) \cos(\delta) + \cos(\omega t) \sin(\delta)) \quad (6.15)$$

i podstawiając do równania 6.11 otrzymuje się:

$$\tau_o (\sin(\omega t) \cos(\delta) + \cos(\omega t) \sin(\delta)) = \gamma_o (G' \sin(\omega t) + G'' \cos(\omega t)) . \quad (6.16)$$

Porównując stronami uzyskuje się układ dwóch równań:

$$\begin{cases} \tau_o \sin(\omega t) \cos(\delta) = \gamma_o G' \sin(\omega t) \\ \tau_o \cos(\omega t) \sin(\delta) = \gamma_o G'' \cos(\omega t) , \end{cases} \quad (6.17)$$

$$\begin{cases} G' = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \cos(\delta) \\ G'' = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \sin(\delta) . \end{cases} \quad (6.18)$$

Porównując otrzymane wyrażenia na moduły  $G'$  i  $G''$  z wzorami 6.12 i 6.13 można otrzymać zależności od parametrów modelu Kelvina-Voigta. Sztywność  $G$  jest równa co do wartości modułowi zachowawczemu:

$$G = G' = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \cos(\delta) , \quad (6.19)$$

natomiast lepkość:

$$\frac{\tau_o}{\gamma_o} \sin(\delta) = G'' = \frac{\eta \dot{\gamma}_o}{\gamma_o} , \quad (6.20)$$

$$\eta = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}_o} \sin(\delta) . \quad (6.21)$$

Jak widać z powyższych równań, do wyznaczenia parametrów  $G'$  i  $G''$  niezbędny jest pomiar kąta przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem naprężenia i odkształcenia. Jego wartość mierzona jest na podstawie przebiegów rzeczywistych. Można też wyprowadzić go z wzajemnej zależności modułów na podstawie wzoru:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{G''}{G'} . \quad (6.22)$$

Moduły stratności i zachowawczy często przedstawiane są jako składowe moduły zespolonego  $G^*$ :

$$G^* \equiv G' + i G'' , \quad (6.23)$$

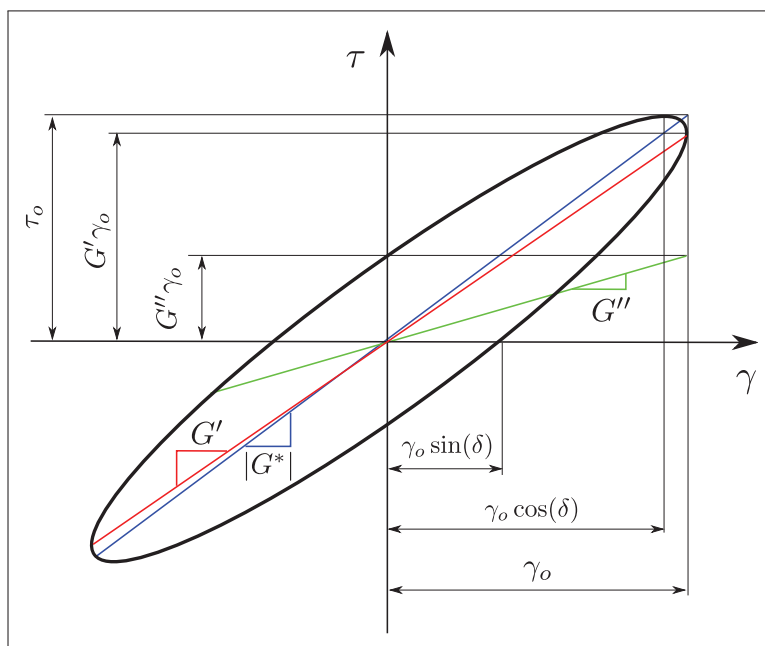
gdzie jego wartość bezwzględną można wyznaczyć na podstawie:

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} . \quad (6.24)$$

Wykorzystując wzory 6.18 można wyznaczyć wielkość modułu zespolonego ze stosunku amplitud odkształcenia i naprężenia:

$$|G^*| = \frac{\tau_o}{\gamma_o} . \quad (6.25)$$

Przykładową pętlę histerezy pokazano na rysunku 6.2. Naniesiono na ten rysunek oznaczenia modułów  $G'$ ,  $G''$  oraz  $|G^*|$ , które interpretować można jako pochylenie krzywych wyznaczonych przez specyficzne dla kształtu pętli punkty.



Rysunek 6.2. Pętla histerezy z modelu K-V wraz z oznaczeniami wartości modułów  $G'$  i  $G''$ .

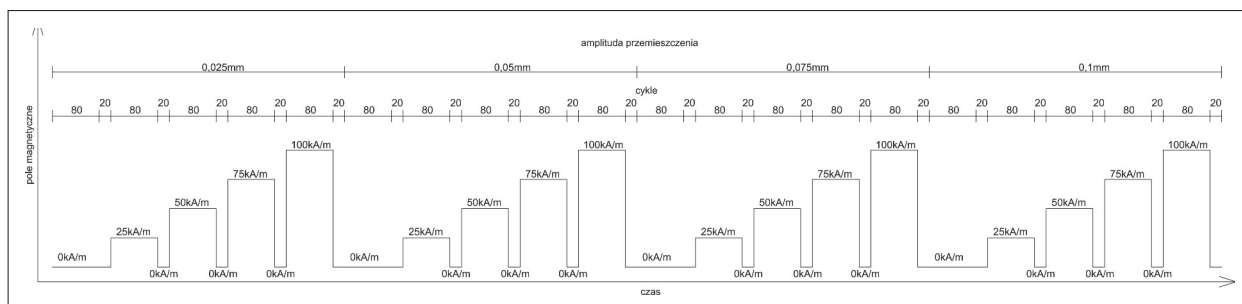
## 6.2. Wpływ amplitudy odkształcenia na parametry modelu

Pierwszy z serii testów, jakim poddano badany materiał, miał na celu sprawdzenie wpływu wartości amplitudy odkształcenia oraz wartości natężenia pola magnetycznego na parametry modelu. W tym celu przyjęto program badań, którego poszczególne parametry przestawiono w tabeli 6.1. Badania zaplanowano dla trzech próbek materiału.

Tablica 6.1. Zestawienie parametrów Test-1, dla eksperymentu weryfikującego wpływ amplitudy odkształcenia.

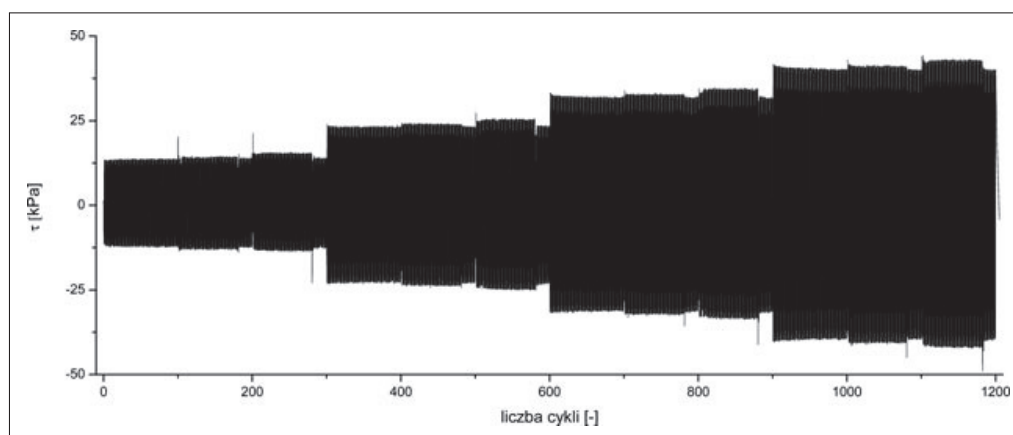
| Próbki<br>lp. | $f$<br>[Hz] | $\gamma_o$<br>[mm/mm]* $10^{-3}$ | H<br>[kA/m]        | ilość<br>cykli |
|---------------|-------------|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Ed1, Ed2, Ed4 | 1           | 6.25, 12.5, 18.75, 25            | 0, 25, 50, 75, 100 | 1200           |

Badanie przeprowadzono realizując kolejno zaprogramowane wartości odkształcenia oraz natężenia pola magnetycznego. Częstotliwość odkształcenia była stała i wynosiła 1 Hz. Dla jednej wartości amplitudy odkształcenia sprawdzano wpływ pola magnetycznego poprzez skokowe zmiany jego wartości. Pomędzy kolejnymi progami wykonywano zerowanie pola magnetycznego. Schematyczny przebieg programu odkształcenia przedstawiono na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3. Graficzne przedstawienie programu badań - Test-1.

Po zakończeniu pomiaru otrzymywano zestaw danych pomiarowych, które następnie poddawano dalszej obróbce. Przykład wyników, zmiany naprężenia podczas badania Test-1 dla próbki A2 pokazano na rysunku 6.4.

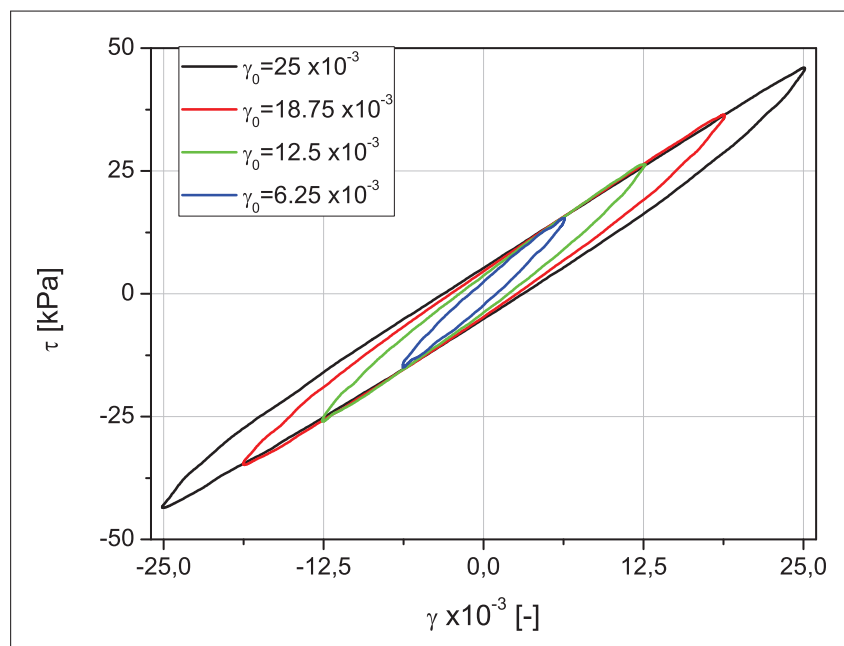


Rysunek 6.4. Rezultat badań - przebieg zmian naprężenia dla próbki Ed2 (Test-1).

Na każdym progu zadanego odkształcenia i wartości pola magnetycznego wykonywano kilkadziesiąt cykli, dlatego do końcowej analizy wybierano tylko jeden okres z ustabilizowanej części pomiaru do dalszej analizy. Wycięcie pojedynczego okresu naprężenia i odkształcenia umożliwiło pokazanie wyników w postaci pętli histerezy. Przykładowy zbiór pętli dla jednej wartości pola magnetycznego, przy czterech kolejno zwiększających się wartościach amplitudy odkształcenia pokazano na rysunku 6.5.

### 6.2.1. Identyfikacja parametrów modelu - Test-1

Pętle uzyskane z wyników eksperymentalnych, jak można zauważyć na rysunku 6.5, mają kształt zbliżony do elipsy. Można wnioskować na tej pod-



Rysunek 6.5. Zestawienie pętli histerezy z przebiegów rzeczywistych dla różnych amplitud odkształcenia. Próbka Ed2,  $H=100\text{kA/m}$ .

stawie, iż możliwy jest opis materiału za pomocą modelu Kelvina-Voigta. W tym celu poddano identyfikacji parametry modelu w zależności od wartości pola magnetycznego i amplitudy odkształcenia. Do wyznaczenia wartości sztywności  $G$  oraz lepkości  $\eta$  użyto wzorów 6.19 oraz 6.21. Wartości amplitud odkształcenia, naprężenia oraz przesunięcia fazowego wyznaczono z danych eksperymentalnych.

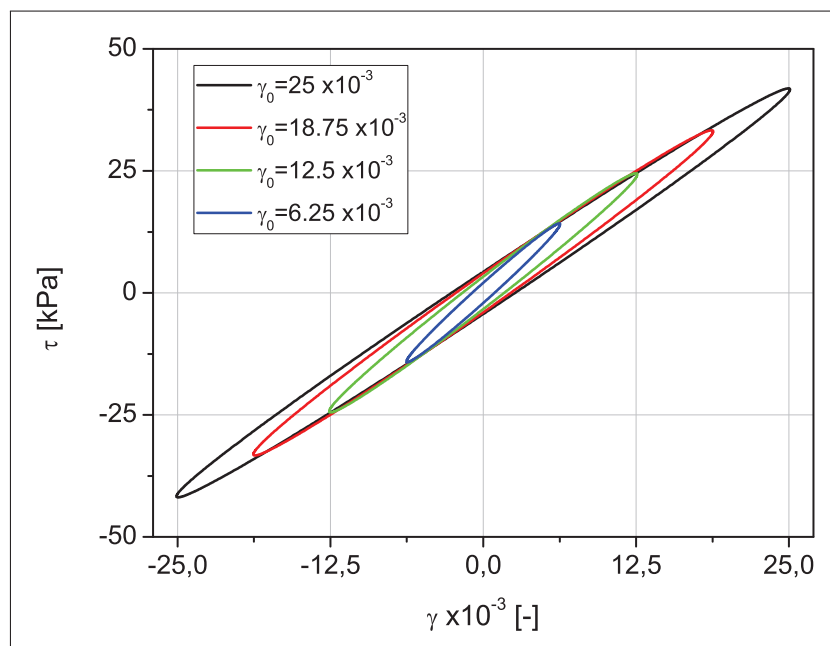
Dla otrzymanych wartości parametrów modelu możliwe było otrzymanie przebiegów i porównanie z wynikami rzeczywistymi. Zespół pętli otrzymanych z modelu dla różnych wielkości amplitudy odkształcenia pokazano na rysunku 6.6. Pojedynczą pętlę histerezy z eksperymentu oraz otrzymaną z modelu Kelvina-Voigta pokazano na rysunku 6.7. Należy zaznaczyć, iż wyniki modelowe zostały wyznaczone dla idealnego przebiegu odkształcenia, sztucznie wygenerowanego, o amplitudzie i częstotliwości jak w rzeczywistym przebiegu.

W dalszej kolejności wyliczono parametry modelu dla każdej pętli histerezy otrzymanej z eksperymentu. Dzięki temu możliwe było otrzymanie całego zestawu wartości  $G$  i  $\eta$  w zależności od amplitudy odkształcenia i pola magnetycznego. Wyniki zaprezentowano na rysunkach 6.8(a) i 6.8(b).

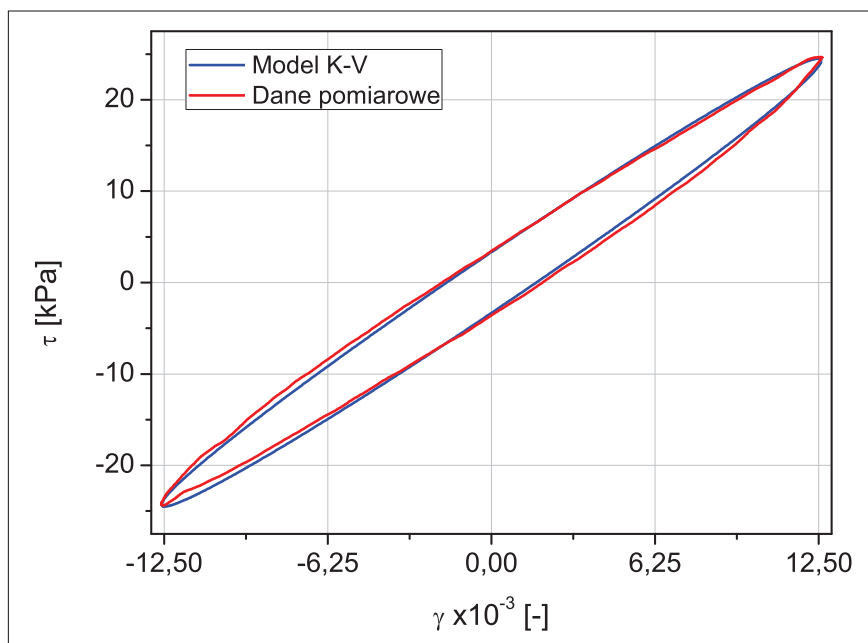
Analiza zmian wyznaczonych parametrów nasuwa wniosek, iż zależą one silnie od wartości natężenia pola magnetycznego. Problemem stanowi natomiast to, iż parametry  $G$  i  $\eta$  zależą od wartości amplitudy odkształcenia. Ich zmianę zaprezentowano na wykresach 6.9(a) i 6.9(b).

W celu pokazania niezgodności modelu lepko-sprężystego z otrzymanymi wynikami, na rysunku 6.10 pokazano zbiór pętli otrzymanych dla jednego zestawu wybranych wartości współczynników  $G$  i  $\eta$ . Pętle te tworzą zbiór elips, z których każda ma stałą wartość pochylenia, natomiast pole powierzchni



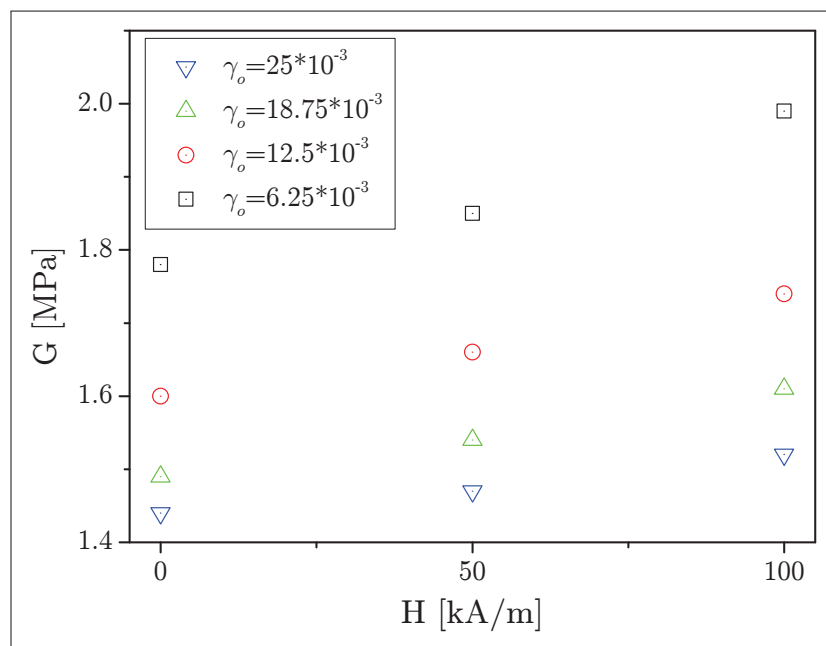


Rysunek 6.6. Wyniki identyfikacji. Przebiegi dla modelu K-V przy różnych wartościach amplitudy odkształcenia. Każda otrzymana dla indywidualnie zidentyfikowanych wartości parametrów dla każdej pętli z osobna.

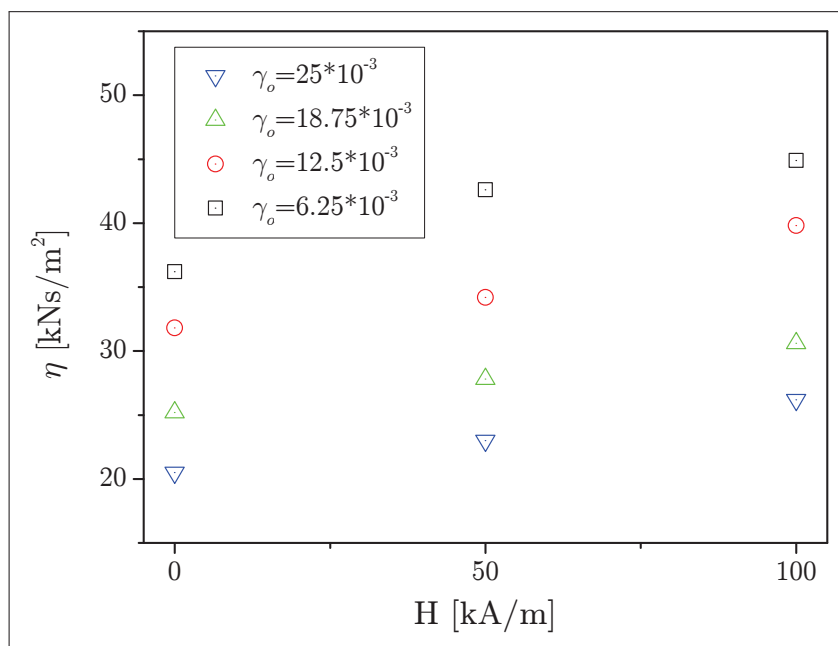


Rysunek 6.7. Porównanie pętli rzeczywistej oraz otrzymanej z modelu na podstawie wyznaczonych wartości parametrów dla wybranej wartości odkształcenia postaciowego.

rośnie na skutek tracenia energii przy wykonywaniu większej wartości odkształcenia. Ich porównanie z pętlami rzeczywistymi z rysunku 6.5 uwiidacznia różnice.



(a)

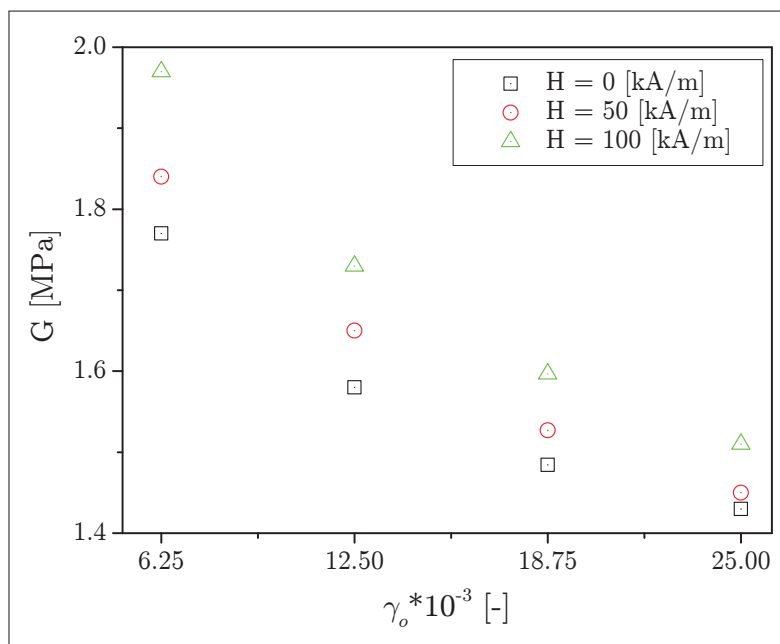


(b)

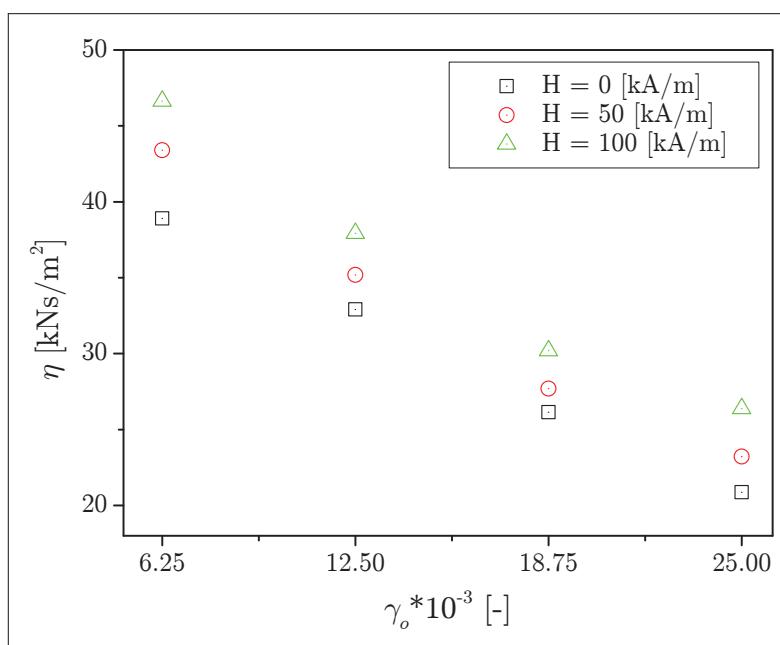
Rysunek 6.8. Wyniki identyfikacji. Wartości parametru  $G$  i  $\eta$  w zależności od pola magnetycznego dla różnych wartości amplitud odkształcenia.

### 6.3. Wpływ pola magnetycznego na parametry modelu

W kolejnym etapie podjęto próbę dokładnego określenia wpływu zewnętrznego natężenia pola magnetycznego na parametry analizowanego modelu materiału. W przeciwieństwie do poprzednich badań zdecydowano się na



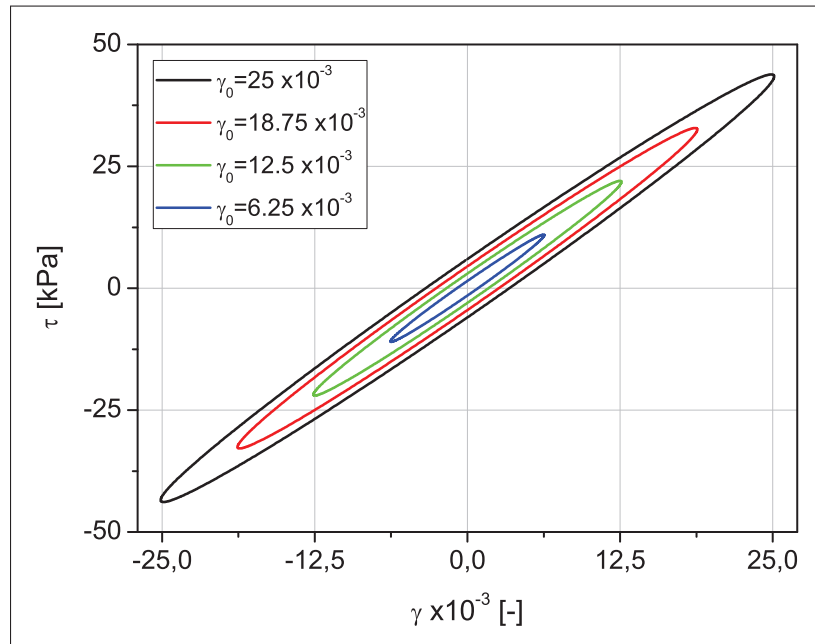
(a)



(b)

Rysunek 6.9. Wyniki identyfikacji. Wartości parametru  $G$  i  $\eta$  w zależności od amplitudy odkształcenia dla różnych wartości pola magnetycznego.

przyjęcie wartości amplitudy odkształcenia na jednym poziomie. Przyjęto skokową zmianę wartości natężenia pola magnetycznego w zakresie od 0 do 110 kA/m. Sygnał odkształcenia, podobnie jak w poprzednim badaniu, miał przebieg sinusoidalny o częstotliwości równej 1 Hz. Program badań rozpisano w tabeli 6.2. Natężenie pola magnetycznego zmieniano skokowo. Pomędzy kolejnymi progami wykonywano „zerowanie” pola magnetycznego na czas

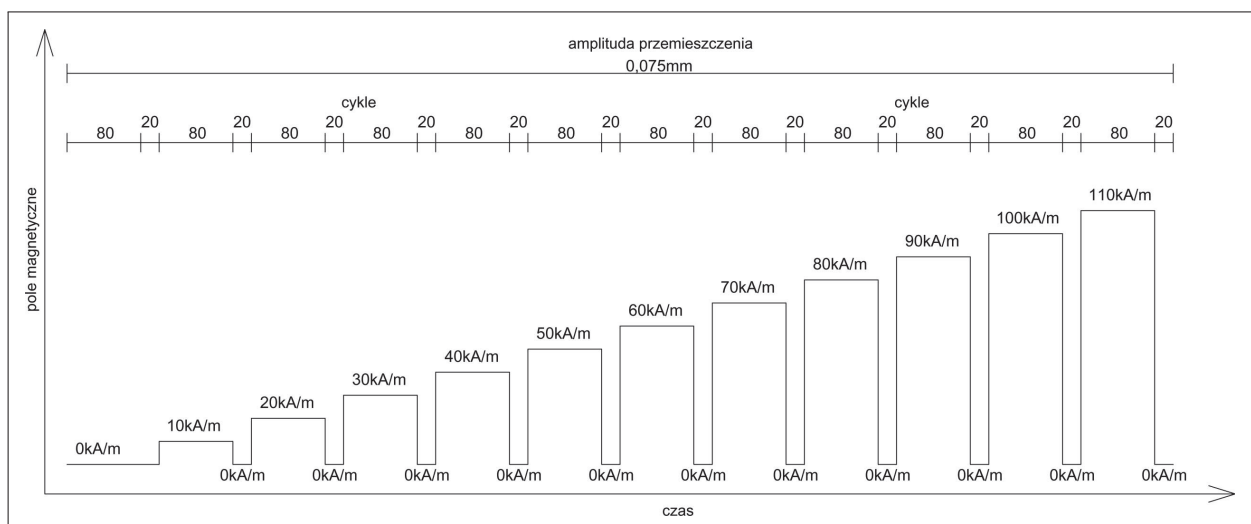


Rysunek 6.10. Zestawienie pętli histerezy otrzymanych z modelu dla stałej wartości parametrów:  $G = 1.73 \text{ MPa}$  i  $\eta = 37.92 \text{ kNs/m}^2$

Tablica 6.2. Zestawienie parametrów Test-2, dla eksperymentu weryfikującego wpływ natężenia pola magnetycznego.

| Próbka numer | $f$ [Hz] | $\gamma_0$ [mm/mm]* $10^{-3}$ | H [kA/m]    | ilość cykli |
|--------------|----------|-------------------------------|-------------|-------------|
| Ed1,Ed2,Ed7  | 1        | 18.75                         | 0÷110 co 10 | 1200        |

około 20 sekund. Schematyczny przebieg programu odkształcenia przedstawiono na rysunku 6.11.



Rysunek 6.11. Graficzne przedstawienie programu badań dla Test-2.

### 6.3.1. Identyfikacja parametrów modelu - Test-2

Rezultaty identyfikacji parametrów pokazano na kolejnych rysunkach. Rysunek 6.12(a) przedstawia zmiany parametru  $G$ , natomiast rysunek 6.12(b) zmiany  $\eta$ . Przedstawione wartości są wartościami uśrednionymi z wyników otrzymanych dla trzech próbek. Są one zgodne z wynikami otrzymanymi dla poprzedniej grupy próbek, które przedstawiono na rysunkach 6.8(a) oraz 6.8(b). Zmiany zarówno  $G$  jak i  $\eta$  w badanym zakresie pola magnetycznego są proporcjonalne. Wzrost  $G$  świadczy o usztywnianiu się materiału, natomiast zwiększenie lepkości powoduje zwiększenie strat i większą dyssypację energii.

W celu pokazania zmienności parametrów  $G$  i  $\eta$  wykonano dodatkowo obliczenia zmiany danej wartości, jaką uzyskano przy każdorazowej zmianie pola magnetycznego. Zmiana pola następowała od zera do wartości zadanej. Zarejestrowane dane pozwoliły na wyznaczenie dwóch wartości każdego parametru modelu oraz ich różnicę. Wyniki uśredniono biorąc pod uwagę wszystkie przebadane próbki i wykonane dla nich pomiary. Rezultaty prezentują wykresy 6.13(a) i 6.13(b).

## 6.4. Wpływ częstotliwości wymuszenia na parametry modelu

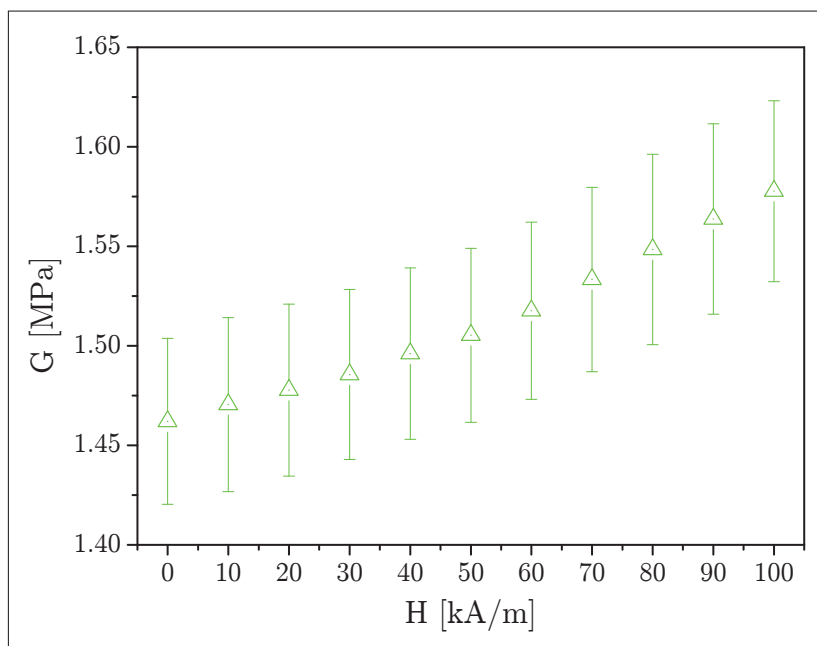
Kolejnym testem weryfikującym poprawność przyjęcia modelu lepkosprężystego było sprawdzenie, jak parametry modelu zachowują się w zależności od prędkości odkształcania. W tym celu przeprowadzono badania przy zmiennej wartości częstotliwości odkształcania. Program badań został zaprezentowany w tabeli 6.3.

Tablica 6.3. Zestawienie parametrów Test-3, dla eksperymentu weryfikującego wpływ prędkości odkształcania.

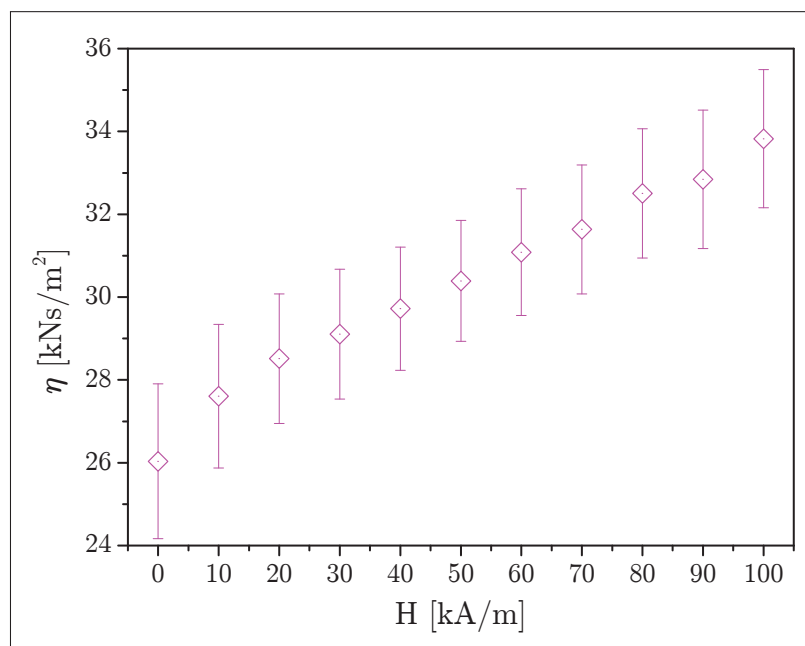
| Próbki<br>lp. | $f$<br>[Hz]           | $\gamma_o$<br>[mm/mm]* $10^{-3}$ | H<br>[kA/m] | ilość<br>cykli |
|---------------|-----------------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| Ed3, Ed5, Ed8 | 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 | 18.75                            | 0, 50, 100  | 1200           |

### 6.4.1. Identyfikacja parametrów modelu - Test-3

Wyniki identyfikacji pokazano na rysunkach 6.15(a) oraz 6.15(b). Jak można zauważyć, wartości obu parametrów są zależne od częstotliwości i ulegają zmianom. Sztywność  $G$  rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Wielkość tych zmian jest porównywalna z wartościami uzyskiwanymi przy stymulacji polem magnetycznym. Powyżej częstotliwości 2 Hz następuje widoczna stabilizacja wartości tego parametru. Zmienność pod wpływem pola zachowana jest w całym zakresie częstotliwości.



(a)

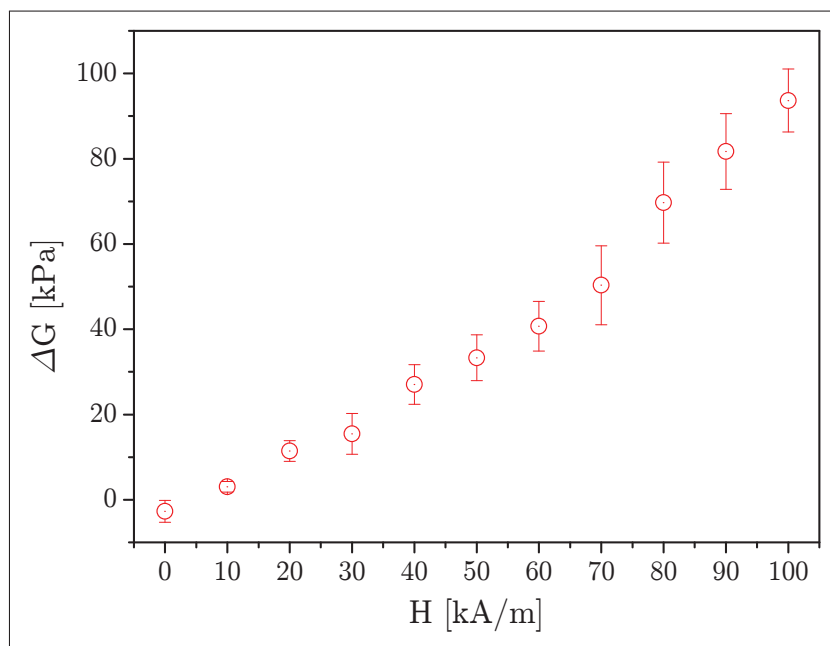


(b)

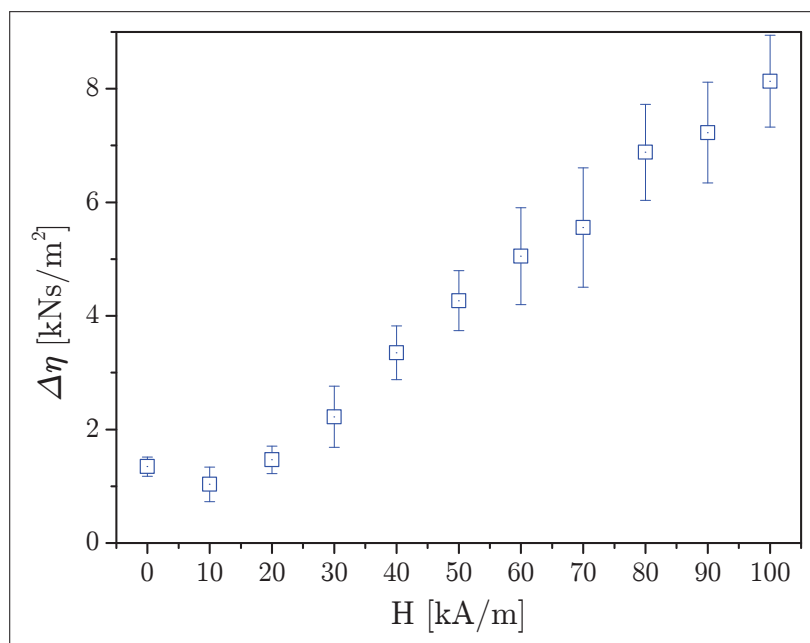
Rysunek 6.12. Wyniki identyfikacji. Wartości parametru  $G$  i  $\eta$  w zależności od wartości natężenia pola magnetycznego, uzyskane przy ustalonej amplitudzie odkształcenia  $\gamma_o = 18.75$ .

Inaczej zachowuje się parametr lepkości, którego wartość maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Zmiany te sięgają nawet dwóch rzędów przy porównaniu dla częstotliwości 0,2 i 10 Hz. Dodatkowo wpływ pola magnetycznego na wartość  $\eta$  maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. W celu zobrazowania tego efektu zmiany w funkcji natężenia pola magnetycznego pokazano na rysunkach 6.16(b) i 6.16(a).





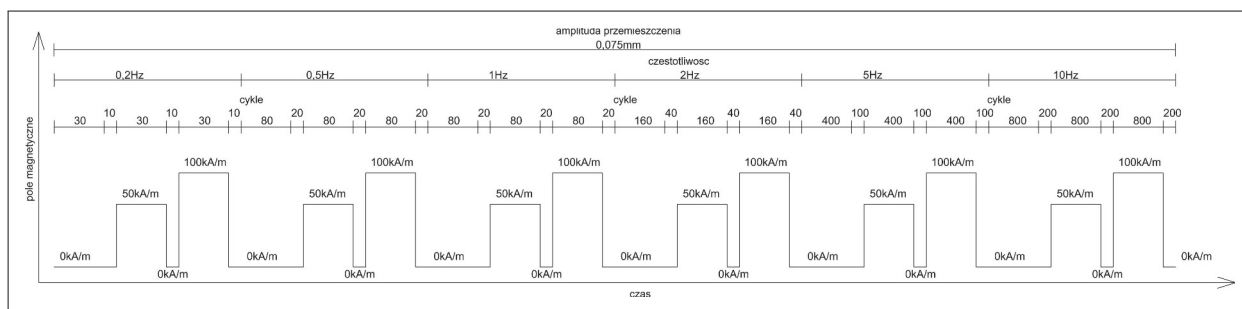
(a)



(b)

Rysunek 6.13. Wyniki identyfikacji. Zmiany wartości parametrów  $G$  i  $\eta$  w zależności od skoku wartości natężenia pola magnetycznego, uzyskane przy ustalonej amplitudzie odkształcenia  $\gamma_o = 18.75$ .

W większości danych, opublikowanych dla badań elastomerów magneto-reologicznych, wykorzystuje się do pokazania jego właściwości magnetomechanicznych tzw. moduł zespolony  $G^*$ . Przedstawiany jest w postaci sumy dwóch modułów: zachowawczego  $G'$  i stratności  $G''$ . Wartość  $G'$  jest bezpośrednio równa wartości parametru sztywności  $G$  z modelu lepkosprężystego. Wartość modułu stratności  $G''$  jest uzależniona od parametru  $\eta$  zgodnie ze



Rysunek 6.14. Graficzne przedstawienie programu badań dla Test-3.

wzorem 6.13. Na rysunkach 6.17(b) i 6.17(a) pokazano wartości otrzymane z obliczeń.

Zauważyć można, iż podobnie jak  $\eta$ , maleje on wraz ze wzrostem częstotliwości. Zdecydowanie lepiej widoczny jest wpływ pola magnetycznego, który występuje dla całego zakresu częstotliwości.

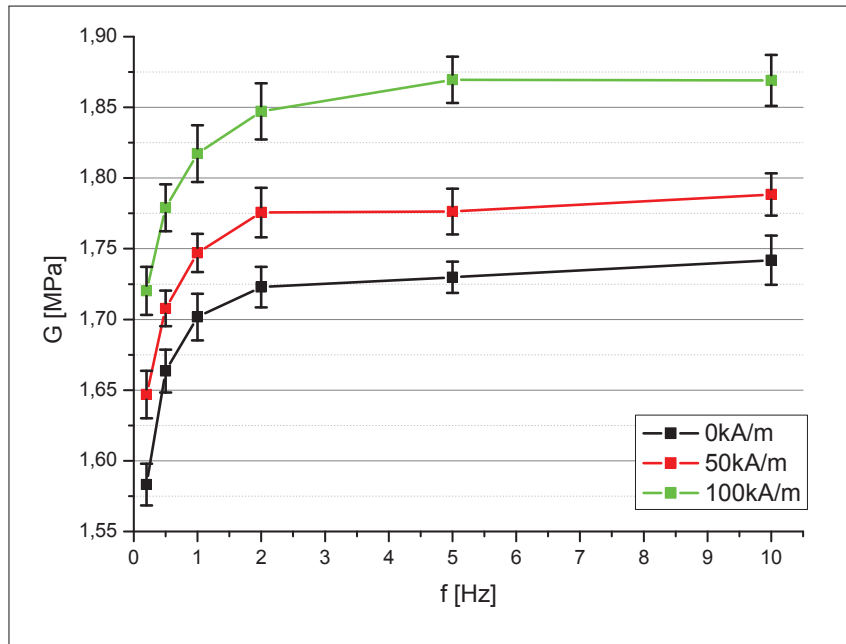
Analiza wyników identyfikacji parametrów modelu, przeprowadzonych w teście wpływu częstotliwości pokazuje jasno, iż ich wartości dla badanego materiału nie są stałe. Wprawdzie stabilizują się one wraz ze wzrostem częstotliwości, jednak dla wartości poniżej 3 Hz zarejestrowane zmiany są mniejsze nawet o dwa rzędy. Dodatkowo w celu pokazania, iż model lepkoplastyczny nie odwzorowuje badanego elastomeru magnetoreologicznego, wykonano rysunki pokazujące pętle rzeczywiste otrzymane dla różnych wartości częstotliwości oraz pętle wyliczone z modelu przy ustalonych wartościach parametrów  $G$  i  $\eta$ . Rysunek 6.18 prezentuje zestaw pętli z eksperymentu, natomiast rysunek 6.19 pętle dla modelu.

## 6.5. Porównanie otrzymanych wyników z wynikami z literatury przedmiotu

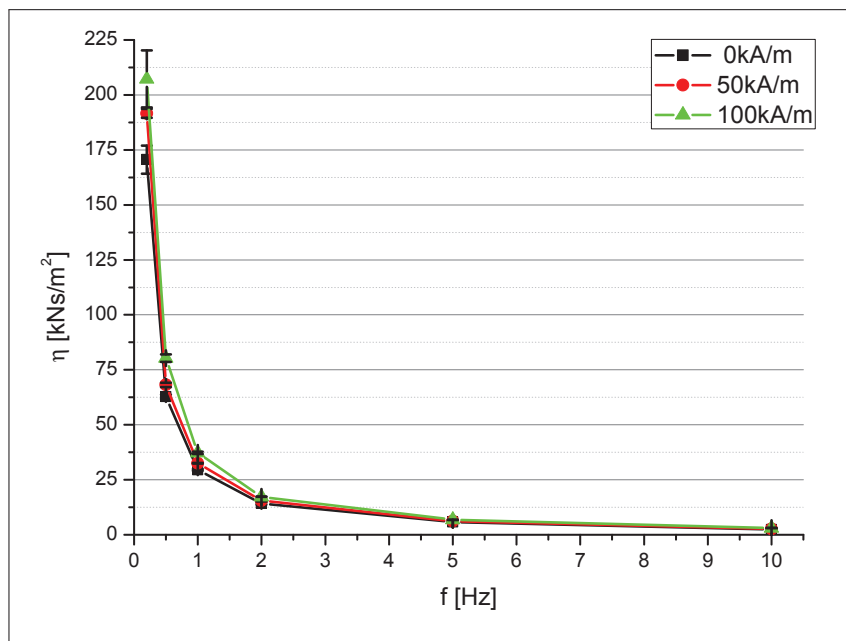
W szeroko analizowanej literaturze przedmiotu (co przedstawione zostało w poprzednich rozdziałach) zauważyć można dużą różnorodność elastomerów magnetoreologicznych zarówno pod względem materiałów matrycy, jak i wypełnienia. Z tego powodu trudno odszukać dwa identyczne materiały wytwarzane i testowane w ten sam sposób. Jednak porównanie otrzymanych wyników i odniesienie do innych prezentowanych materiałów jest istotnym krokiem, który podsumowuje uzyskane rezultaty.

Kolejnym problemem przy porównywaniu wyników, który należy wziąć pod uwagę, jest sugerowana zgodność charakterystyk materiału z modelem Kelvina–Voighta. Autorzy zdecydowanej większości prac nie skupiają się na udowodnieniu poprawności stosowanie wyżej wymienionego modelu, bez pokazywania pętli naprężenie odkształcenie z eksperymentu, zamieszczają jedynie końcowe wyniki. Są to najczęściej różnorodne funkcje parametrów  $G'$  i  $G''$ . Uzależnia się je od pola magnetycznego co jest poprawnym założeniem ale również bardzo często od częstotliwości wymuszenia lub amplitudy.

Mimo tych zastrzeżeń wykonano porównanie wyników zebranych w literaturze z wynikami prezentowanymi w tej pracy. W tym celu zebrano wartości



(a)

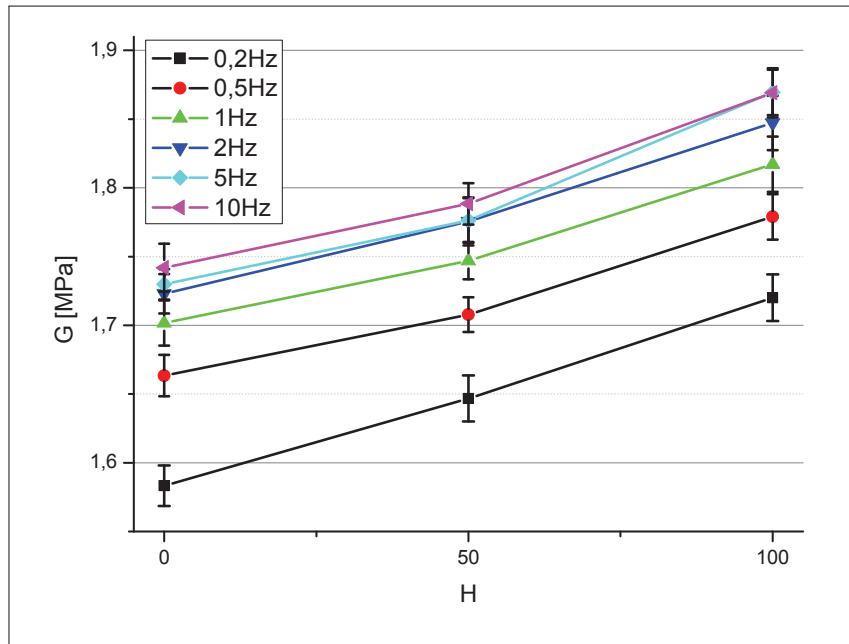


(b)

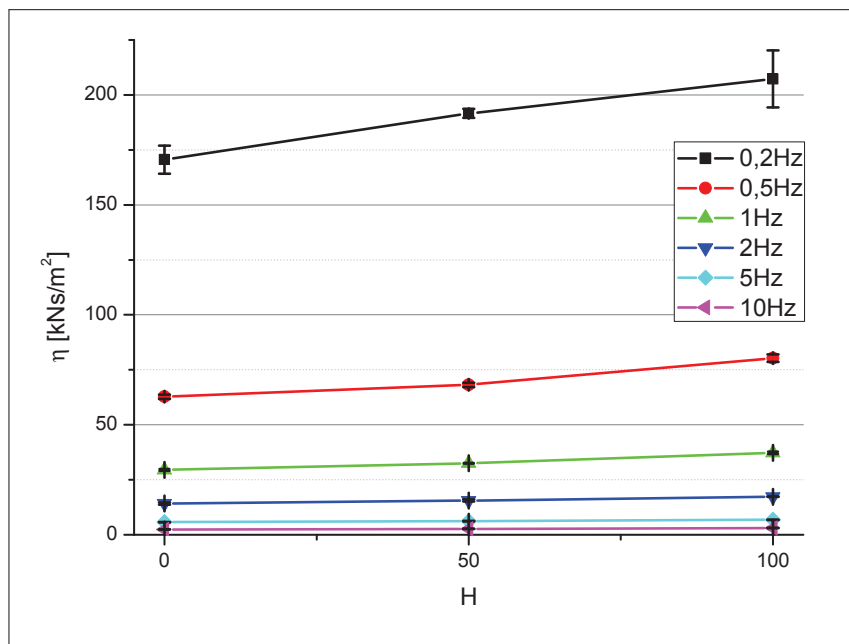
Rysunek 6.15. Wyniki identyfikacji. Zmiany wartości parametrów  $G$  i  $\eta$  w zależności od wartości częstotliwości odkształcenia przy różnych wartościach pola magnetycznego. Amplituda odkształcenia  $\gamma_o = 18.75$ .

modułu stratności oraz modułu zachowawczego wraz z opisem warunków dla których zostały uzyskane. Dane zawarto w tabeli 6.4. Ostatni wiersz zawiera dane uzyskane przez autora dla elastomeru typu Ed, co umożliwia porównanie z innymi materiałami.

Poszczególne parametry zamieszczone w tabeli wybrano z publikacji opi-



(a)

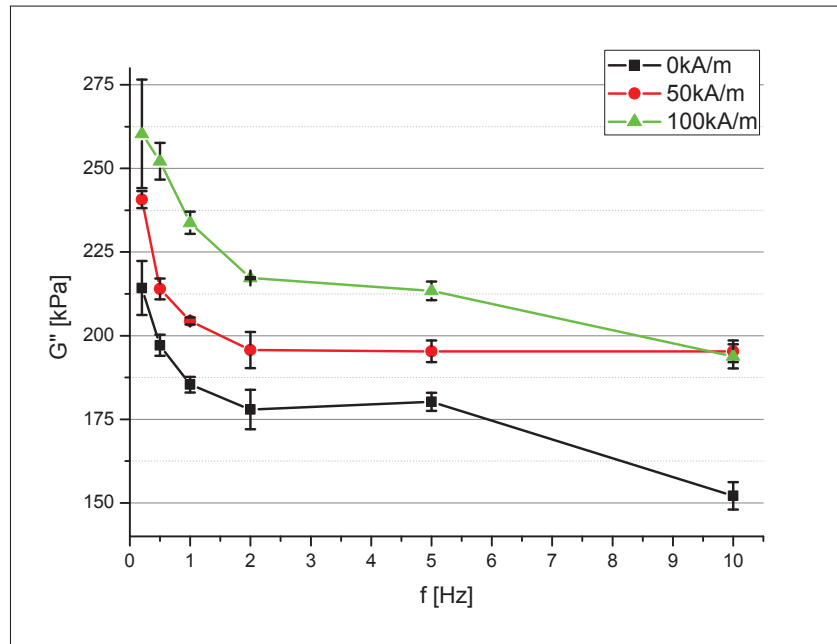


(b)

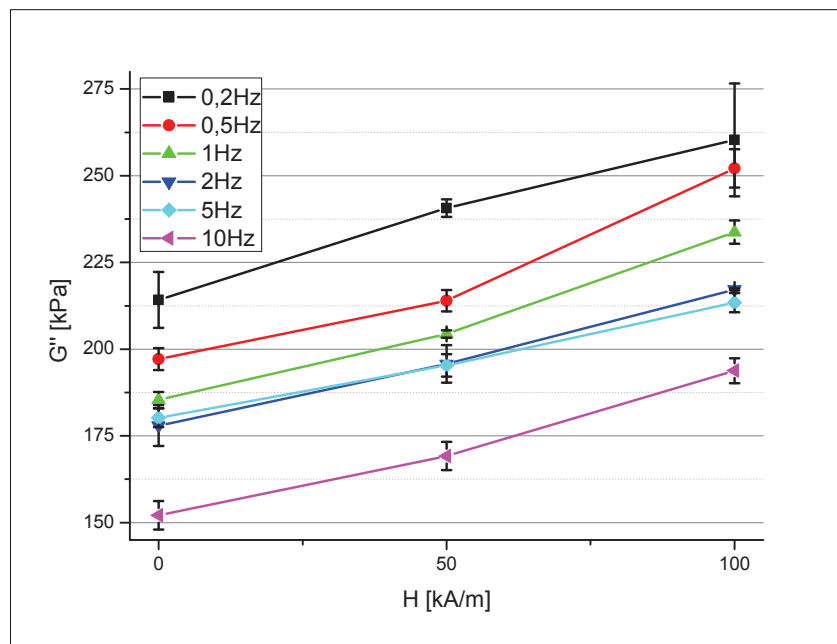
Rysunek 6.16. Wyniki identyfikacji. Zmiany wartości parametrów  $G$  i  $\eta$  w zależności od wartości natężenia pola magnetycznego przy różnych częstotliwościach odkształcenia. Amplituda odkształcenia  $\gamma_o = 18.75$ .

sujących podobne materiały testowane w zbliżonych warunkach, jednak ze względu na różnice zestawienie należy traktować jako orientacyjne.

Porównując dane wg tabeli 6.4 można zauważyć, iż dla elastomeru typu Ed moduły  $G'$  oraz  $G''$  mają wartości zbliżone do prezentowanych w literaturze przedmiotu.



(a)

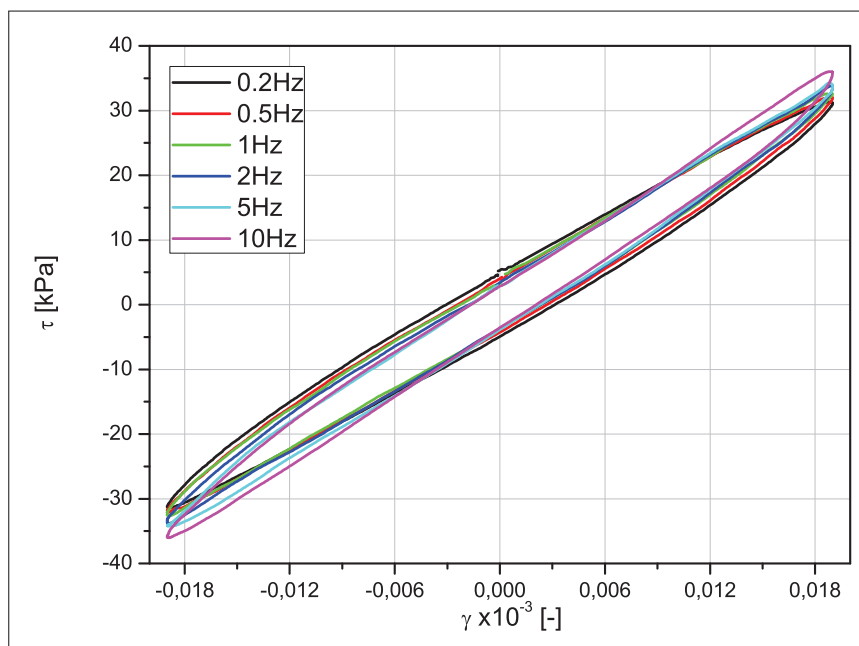


(b)

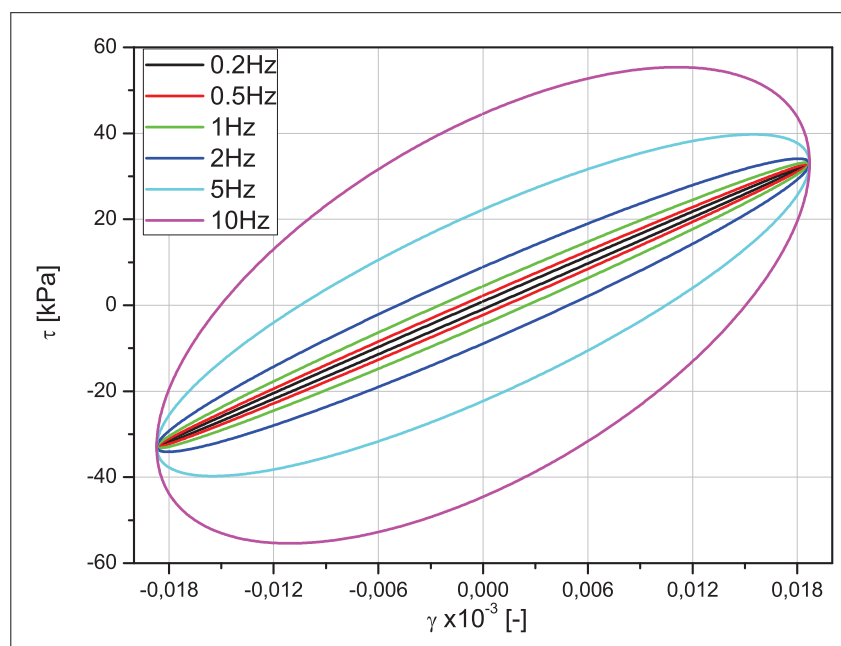
Rysunek 6.17. Wyniki identyfikacji. Zmiany wartości parametru  $G''$  w zależności od wartości częstotliwości odkształcenia dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego. Amplituda odkształcenia  $\gamma_o = 18.75$ .

## 6.6. Podsumowanie

Z przedstawionych w powyższym rozdziale analiz wynika, iż model lepkościowy, szeroko stosowany do opisu elastomerów magnetoreologicznych,



Rysunek 6.18. Zestawienie pętli histerezy z przebiegów rzeczywistych dla różnych wartości częstotliwości odkształcenia. Próbka Ed5 w polu 100kA/m.



Rysunek 6.19. Zestawienie pętli histerezy otrzymanych z modelu dla stałej wartości parametrów:  $G = 1.73 \text{ MPa}$  i  $\eta = 37.92 \text{ kNs/m}^2$ .

nie jest modelem w pełni opisującym właściwości materiałów z tej grupy. Szczegółowa analiza zmian przebiegów wartości otrzymanych z eksperymentu pokazuje, iż tylko w pewnym wybranym zakresie zmienności parametrów prawidłowo opisuje badany materiał. W szerszym zakresie, uwzględniając zmiany odkształcenia i częstotliwości, konieczne jest zaproponowanie innego modelu.



Tablica 6.4. Zestawienie wartości parametrów modułu stratności i modułu zachowawczego wykonane na podstawie literatury przedmiotu

| Lp | Rok  | Matryca                           | Zawartość ferromag.    | Wielkość cząstek    | Ilość wagowo | Pole magnesowania | $\gamma_a$ [%] | $f$ [Hz] | $G'$ [MPa] | $\Delta G'$ [MPa] | $G''$ [MPa] | $\Delta G''$ [MPa] |                |
|----|------|-----------------------------------|------------------------|---------------------|--------------|-------------------|----------------|----------|------------|-------------------|-------------|--------------------|----------------|
| 1  | 2012 | guma cis-polibutadienowa          | żelazo CN              | 6 $\mu\text{m}$     | 60%          | 1,3 T             | 0,03           | 10       | 0,25       | 0,19              | 0,06        | –                  | [167]          |
| 2  | 2012 | SEBS                              | proszek tlenku żelaza  | 3 ÷ 5 $\mu\text{m}$ | 70%          | 0,6 T             | 0,5            | 5        | 0,27       | 0,07              | –           | –                  | [168]          |
| 3  | 2011 | guma silikonowa                   | żelazo karbonylowe     | 5 $\mu\text{m}$     | 70%          | –                 | 0,2            | 5        | 0,034      | 0,0075            | 0,011       | 0,003              | [169]          |
| 4  | 2011 | guma silikonowa 704               | żelazo karbonylowe     | 7 $\mu\text{m}$     | 70%          | 1,0 T             | 0,2            | 13       | 0,41       | 0,115             | –           | –                  | [170]          |
| 5  | 2011 | poliuretan                        | żelazo karbonylowe     | 2 ÷ 9 $\mu\text{m}$ | 70%          | 1,2 T             | 0,1            | 1        | 2,0        | 0,1               | –           | –                  | [107]          |
| 6  | 2010 | poliuretan                        | żelazo karbonylowe     | 3 ÷ 5 $\mu\text{m}$ | 70%          | 0,9 T             | 0,2            | 1        | 6,38       | 0,22              | –           | –                  | [171]          |
| 7  | 2009 | silikon                           | proszek żelaza         | 40 $\mu\text{m}$    | 35% (Vol.)   | –                 | 1              | 10       | 0,3        | 0,24              | 0,3         | 0,23               | [92]           |
| 8  | 2008 | guma silikonowa HTV               | proszek żelaza CN      | 6 $\mu\text{m}$     | 60%          | 0,35 T            | 2              | 10       | 0,29       | 0,02              | –           | –                  | [172]          |
| 9  | 2003 | kauczuk akrylonitrylo-butadienowy | żelazo ASC300          | 45 $\mu\text{m}$    | 80%          | –                 | 1              | 11       | –          | 0,75              | –           | –                  | [79]           |
| 10 | 2002 | silikon typu RTV                  | proszek żelaza CN - HQ | 2 $\mu\text{m}$     | 30% (Vol.)   | 0,25 T            | 0,1            | 5        | 2,5        | 1,7               | 0,5         | 0,5                | [96]           |
| 11 | 2012 | SEBS <i>Téfabloc</i> ®            | ASC 300                | 42 $\mu\text{m}$    | 82%          | –                 | 0,6            | 1        | 1,97       | 0,2               | 0,29        | 0,051              | Badania własne |

## 7. Analiza możliwości opisu materiału za pomocą modelu sprężysto-plastycznego

Rezultaty wyników modelowania przedstawione w poprzednim rozdziale uznano za niewystarczające. Analiza modelu lepkosprężystego pokazała wyraźnie, że nie nadaje się on do opisu zachowania badanych elastomerów magnetoreologicznych. Dla badanego zakresu częstotliwości i amplitud wymuszenia nie udało się uzyskać stałych wartości parametrów. Aby opisać poszczególne pętle wyznaczono dla każdej z nich odrębny parametr.

W celu znalezienia modelu, najlepiej opisującego właściwości elastomerów magnetoreologicznych, przeprowadzono analizę literatury przedmiotu. Skupiono się przy tym na pracach dotyczących kompozytów magnetoreologicznych powstałych z połączenia matrycy polimerowej posiadającej wewnętrzną strukturę otwartych porów wypełnionej cieczą magnetoreologiczną. Zmiana właściwości materiału następuje również na skutek działania zewnętrznego pola magnetycznego. Źródłem zmian są oddziaływania w skali mikro pomiędzy cząstkami ferromagnetycznymi, które stanowią główny, aktywnych składnik.

### 7.1. Model sprężysto-lepkoplastyczny

Analizując rezultaty przedstawione w pracy [32] uznano, że ze względu na podobieństwo materiałów istnieje możliwość wykorzystania modelu materiału sprężysto-lepkoplastycznego do opisu badanych elastomerów magnetoreologicznych. W tym celu poddano analizie wyniki badań eksperymentalnych w kierunku przydatności tego modelu. Obliczenia zdecydowano się wykonać dla tych samych danych pomiarowych, które użyto przy identyfikacji parametrów modelu Kelvina–Voigta, opisanego w poprzednim rozdziale.

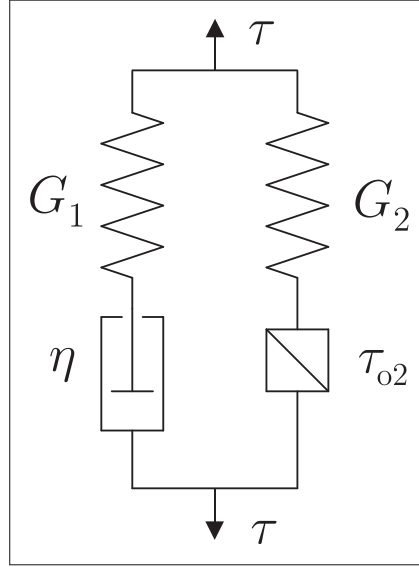
Poszukując modelu materiału dla elastomeru magnetoreologicznego, przyjęto następujące założenia ogólne:

- model powinien umożliwiać opis zachowania się materiału w złożonym stanie naprężenia, nawet jeśli początkowo będzie identyfikowany jedynie dla czystego ścinania,
- parametry modelu mechanicznego powinny być możliwie proste, jednocześnie powinny być funkcją natężenia pola magnetycznego.

Dla wybranego modelu materiału założono wstępnie, że elastomer może być ciałem sprężysto-lepkoplastycznym, tzn. lepkosprężystym do granicy plastyczności i lepkoplastycznym powyżej [54]. Granica plastyczności w takim modelu zależy od prędkości obciążania, natomiast powyżej granicy plastyczności występują dwa rodzaje odkształceń nieodwracalnych: zależne od skali

czasu oraz zależne od trajektorii odkształcenia. Taka konfiguracja uniemożliwia zastosowanie zasady superpozycji.

Model ciała sprężysto-lepkoplastycznego, przedstawiony w tej części pracy, stosowano także do opisu gruntów lub tworzyw sztucznych [173–175]. Jego schemat przedstawiono na rysunku 7.1.



Rysunek 7.1. Schemat modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego [32]

Model składa się z połączenia ciała Maxwella równolegle z ciałem sprężysto idealnie plastycznym (element sprężysty połączony szeregowo z plastycznym). Związki konstytutywne dla takiego modelu można przedstawić:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad \text{i} \quad \gamma = \gamma_1 = \gamma_2, \quad (7.1)$$

gdzie

$$\dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}_1}{G_1} + \frac{\tau_1}{\eta}, \quad (7.2)$$

jest związkiem między naprężeniem i odkształceniem w ciele Maxwella oraz

$$\tau_2 = G_2(\gamma - \gamma_k) \pm \tau_{o2} \quad \text{dla} \quad |\tau_2| \leq \tau_{o2}, \quad (7.3)$$

gdzie z kolei  $\gamma_k$  jest wartością odkształcenia w chwili, gdy w elemencie idealnie plastycznym rozpoczęto proces odciażania.

Uwzględniając powyższe założenia możliwe jest wyprowadzenie związku między naprężeniem i odkształceniem. Za [32] można napisać dla przypadku, gdy nie jest przekroczona granica plastyczności:

$$\tau + \frac{\eta}{G_1} \dot{\tau} = G_2 \left( \gamma + \eta \dot{\gamma} \frac{G_1 + G_2}{G_1 G_2} \right) - G_2 \gamma_k + \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau} \quad (7.4)$$

oraz po jej przekroczeniu:

$$\tau + \frac{\eta}{G_1} \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} + \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau}, \quad \text{gd}y \quad \tau_2 = \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau}. \quad (7.5)$$

W kolejnym etapie podjęto próbę identyfikacji przedstawionego powyżej modelu ciała i sprawdzenie możliwości opisanego elastomeru magnetoreologicznego. W przedstawionym modelu występują jedynie cztery parametry ( $\eta, G_1, G_2, \tau_{o2}$ ), jednak ich wyznaczenie jest zadaniem skomplikowanym, co wynika z połączenia kilku równań różniczkowych. Możliwe jest natomiast uproszczenie modelu, a więc i procesu identyfikacji, przyjmując założenie dotyczące wpływu prędkości odkształcania. Analiza zmian zachowania się materiału w badanym zakresie zmienności  $0.2 - 10Hz$  pozwala zauważyć, że są one niewielkie (np. rysunek 6.18). Przyjęcie takiego założenia pozwala na wyeliminowanie elementu opisującego lepkość. Jest on jedynym, w badanym modelu, charakteryzującym się zależnością od prędkości odkształcania. Jego pominięcie upraszcza model ciała sprężysto-lepkoplastycznego do ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym. Zakłada się wówczas, iż dominującym procesem nieodwracalnym, rozpraszającym energię jest czynnik plastyczny.

## 7.2. Model sprężysto-plastyczny z kinematycznym wzmocnieniem liniowym

Poniżej zaprezentowano związki konstytutywne modelu sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym. Na rysunku 7.2a pokazano schemat strukturalny takiego modelu, na którym można wyróżnić elementy sprężyste oraz element plastyczny. Rysunek 7.2b prezentuje pętlę histerezy wraz z oznaczonymi jej punktami charakterystycznymi. Umieszczone zostały tam cztery proste odcinki opisane odpowiednio p1, p3 dla procesu obciążania oraz p2, p4 dla odciążania.

Związki konstytutywne (za [32]), dla tak przyjętego modelu ciała są następujące:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad \text{i} \quad \gamma = \gamma_1 = \gamma_2, \quad (7.6)$$

gdzie

$$\tau_1 = G_1\gamma_1, \quad \tau_2 = G_2\gamma_2 - G_2\gamma_k + \tau_{o2}\text{sign}\dot{\tau}. \quad (7.7)$$

Dalej wyprowadzając związki pomiędzy naprężeniem a odkształceniem, gdy nie jest przekroczona granica plastyczności w elemencie idealnie plastycznym, otrzymuje się:

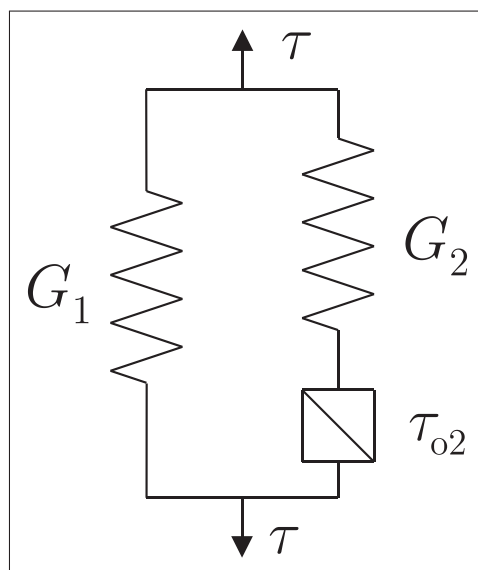
$$\tau = \gamma(G_1 + G_2) - G_2\gamma_k + \tau_{o2}\text{sign}\dot{\tau} \quad (7.8)$$

oraz, gdy granica plastyczności jest przekroczona:

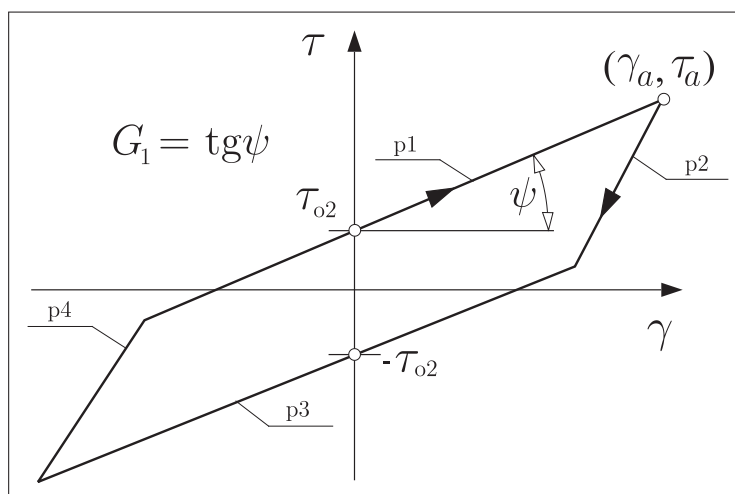
$$\tau = \gamma G_1 + \tau_{o2}\text{sign}\dot{\tau}, \quad \text{dla} \quad \tau_2 = \tau_{o2}\text{sign}\dot{\tau}. \quad (7.9)$$

### 7.2.1. Procedura identyfikacji parametrów $G_1$ i $\tau_{o2}$

W celu identyfikacji parametrów  $G_1$  oraz  $\tau_{o2}$  posłużono się częścią danych eksperymentalnych opisujących proces obciążania materiału (proste p1 i p3 na rysunku 7.2). Wybrane fragmenty pętli histerezy posłużyły do znalezienia punktu przecięcia z osią  $\gamma$  oraz kąta nachylenia prostej. Schematycznie zaznaczono to na rysunku 7.3. Dla wybranej pętli wyników eksperymentalnych



(a)

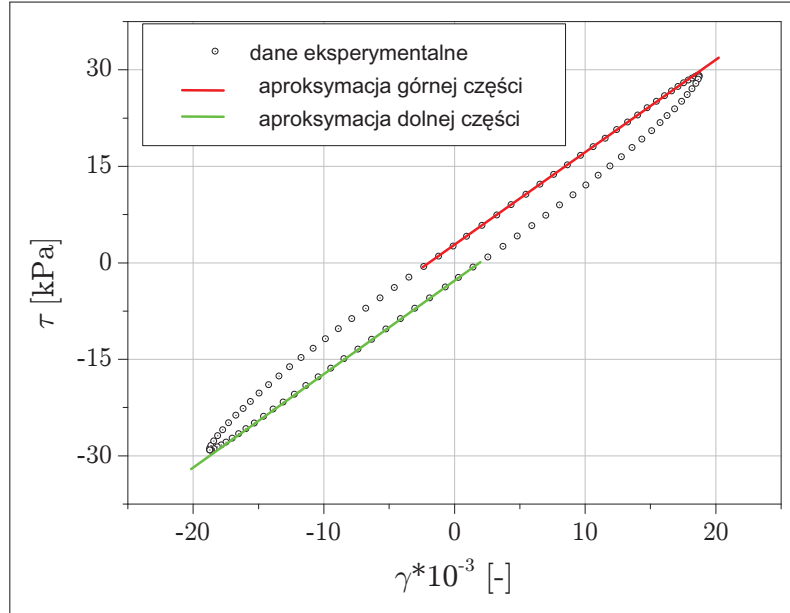


(b)

Rysunek 7.2. Schemat strukturalny modelu ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym – (a) oraz przykładowa pętla histerezy z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi – (b) [32].

zaznaczono za pomocą funkcji liniowych przybliżenie górnej i dolnej części wykresu. Ograniczenie części danych, które wybierano do identyfikacji, wykonano od przecięcia z poziomą osią  $\gamma$  do punktu osiągnięcia maksimum amplitudy naprężenia. Taki wybór początkowego punktu podyktowany był tym, iż niemożliwe było wyznaczenie jednoznacznie miejsca przejścia materiału ze stanu sprężystego w stan sprężysto-plastyczny.

Aproksymację odcinków pętli histerezy wykonano z wykorzystaniem regresji liniowej opartej na metodzie najmniejszych kwadratów. Analizowano zgodność funkcji liniowej w postaci  $\tau = \gamma G_1 + \tau_{o2}$ . Dzięki temu możliwe było jednocześnie wyznaczenie dwóch z trzech poszukiwanych parametrów modelu. Obliczenia wykonywano dla zgromadzonych danych pomiarowych wykorzystanych przy analizie poprzedniego modelu (Kelvina-Voigta). Analizowano



Rysunek 7.3. Pętla histerezy wraz z zaznaczonymi prostymi aproksymującymi linie obciążania i odciążania.

dane z testów próbek: Test–1 (Tabela 6.1), Test–2 (Tabela 6.2) i Test–3 (Tabela 6.3). Dodatkowo w celu zwiększenia dokładności brano jednocześnie pod uwagę dwie części pętli – górną i dolną. Taki zabieg pozwolił na maksymalne wykorzystanie informacji zawartych w zgromadzonych danych pomiarowych.

### 7.2.2. Procedura identyfikacji parametru $G_2$

Po zidentyfikowaniu parametrów  $G_1$  i  $\tau_{o2}$ , do pełnego modelu, pozostał do wyznaczenia tylko jeden parametr –  $G_2$ . Do jego obliczenia sformułowano kryterium określające zgodności punktów pętli histerezy otrzymanych z modelu oraz danych eksperymentalnych. Kryterium to zdefiniowano w następującej postaci:

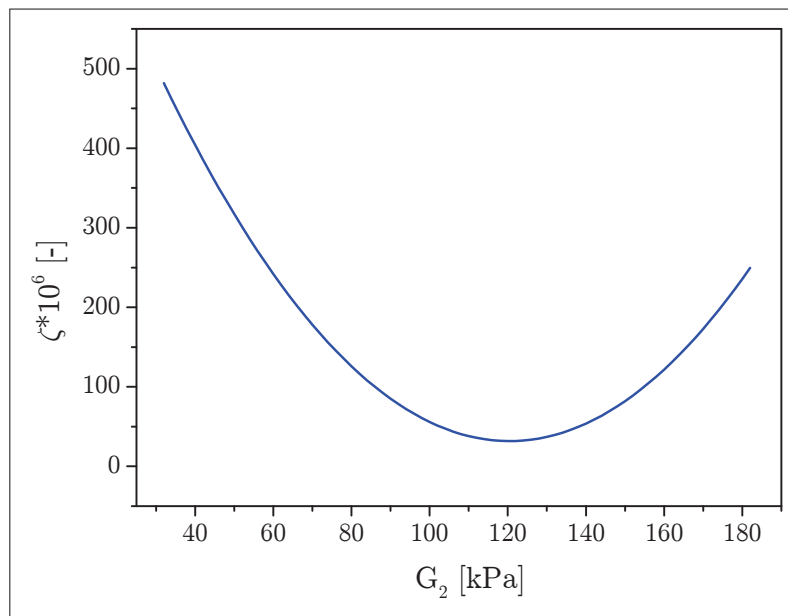
$$\zeta = \sum_{i=0}^n (\tau_{(eks)}(t_i) - \tau_{(mod)}(t_i))^2, \quad (7.10)$$

gdzie  $\tau_{(eks)}(t_i)$  oznacza wartość naprężenia uzyskanego w eksperymencie, natomiast  $\tau_{(mode)}(t_i)$  dla wartości otrzymanych z modelu. Sumowanie odbywa się dla jednego pełnego okresu w kolejnych odcinkach czasu  $t_i$ , w których wykonano pomiar lub obliczenia. Kryterium  $\zeta$  zostało zdefiniowane jedynie dla wartości naprężeń, ponieważ eksperyment przeprowadzono przy sterowaniu sygnałem odkształcenia, którego kształt i przebieg zadano wcześniej. Procedura identyfikacji polegała na wyznaczeniu wartości parametru  $G_2$  przy której kryterium  $\zeta$  uzyskiwało minimum. W tym celu zastosowano procedurę numeryczną polegającą na wygenerowaniu tablicy dyskretnych wartości poszukiwanego parametru oraz wykonaniu obliczeń dla każdego z nich. Na koniec wyszukiwano punkt minimum kryterium  $\zeta$ , a wartość  $G_2$ , dla której go uzyskano, uznawano za wynik końcowy.

Przykład wyznaczania  $G_2$  zaprezentowano na rysunku 7.4. Pokazany został przebieg zmienności kryterium  $\zeta$  w funkcji poszukiwanego parametru.



Wyraźnie możliwy jest do wskazania punkt, w którym kryterium  $\zeta$  osiąga wartość minimum. Na tej podstawie wyznaczano  $G_2$ . Wszystkie wykonane obliczenia dla przebadanych próbek i testów dawały podobne rezultaty w postaci pojedynczego minimum.

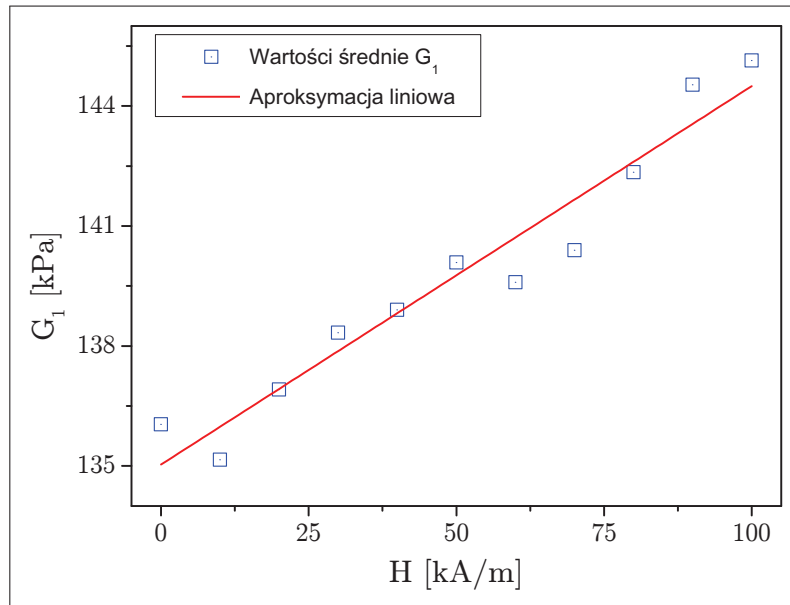


Rysunek 7.4. Przykładowy wykres wartości kryterium  $\zeta$  w funkcji poszukiwanego parametru  $G_2$ .

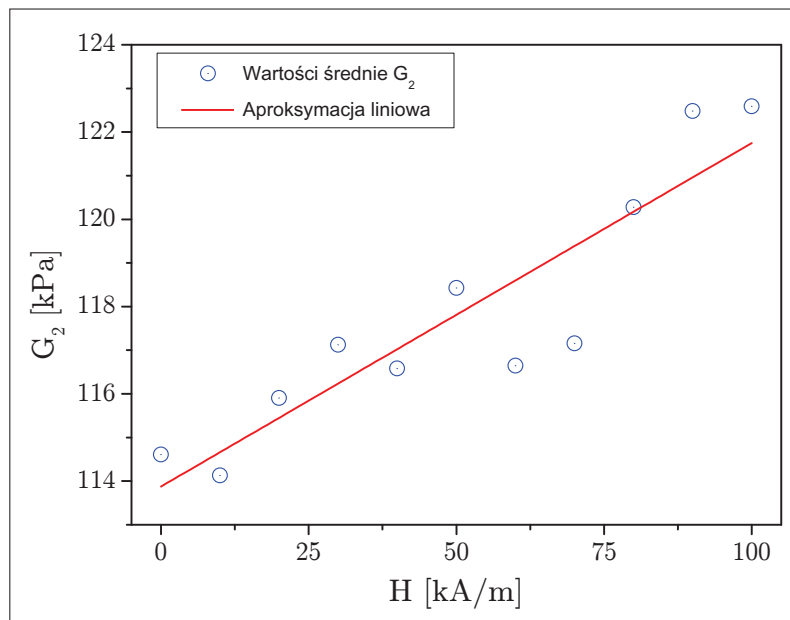
### 7.2.3. Wyniki identyfikacji dla różnych amplitud odkształcenia przy stałej częstotliwości.

Testy odpowiednio Test-1, Test-2 i Test-3 obejmowały zarówno zmiany amplitudy odkształcenia, pola magnetycznego jak i częstotliwości. Identyfikację parametrów modelu przeprowadzono w kilku grupach. Pierwsza z nich obejmowała wszystkie wyniki uzyskane przy czterech różnych amplitudach odkształcenia  $\gamma_A = 6.25 \cdot 10^{-3}, 12.5 \cdot 10^{-3}, 18.75 \cdot 10^{-3}, 25 \cdot 10^{-3}$  w funkcji kolejno zadawanych wartości pól magnetycznych i jednej częstotliwości wymuszenia  $f = 1 \text{ Hz}$ . Rezultaty identyfikacji w postaci wykresów przedstawiono na rysunkach 7.5a, b i c.

Parametry  $G_1$ ,  $G_2$  i  $\tau_{o2}$  wyznaczono osobno dla sześciu próbek z testów Test-1 oraz Test-2, a następnie obliczono ich wartość średnią, którą zaznaczono na wykresie w funkcji kolejnych wartości natężenia pola magnetycznego. Analiza zmienności wyznaczonych parametrów pokazuje jednoznacznie wzrost ich wartości wraz ze wzrostem wartości natężenia pola magnetycznego. Dodatkowo wykonano przybliżenie zmian za pomocą funkcji liniowej w postaci  $y = A + Bx$  (gdzie  $x$  jest natężeniem pola magnetycznego). Wykorzystano do tego regresję i metodę najmniejszych kwadratów. Rezultaty w postaci linii trendu umieszczono na wykresach, natomiast wartości współczynników oraz błędów standardowych ich wyznaczenia umieszczono w tabeli 7.1.



(a)

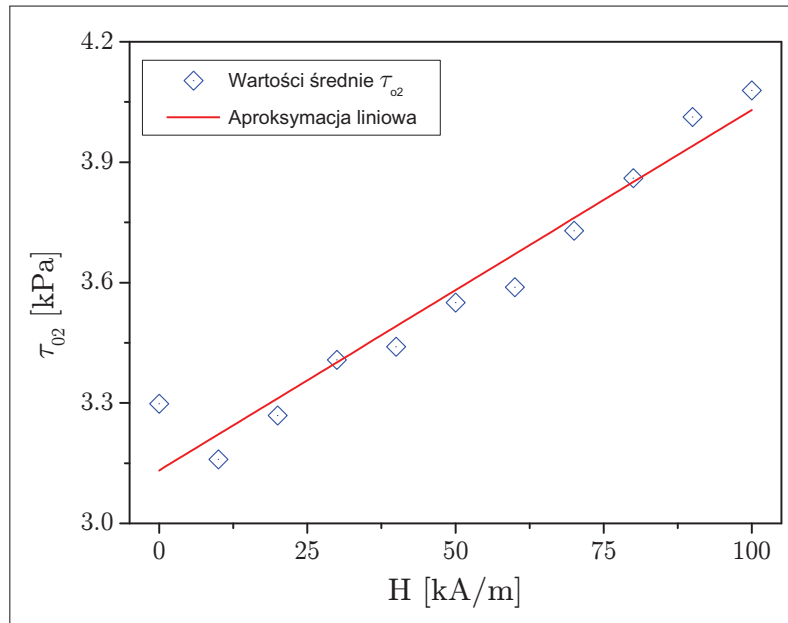


(b)

Rysunek 7.5. Zidentyfikowane parametry modelu w funkcji pola magnetycznego przy ustalonej częstotliwości wymuszenia  $f = 1Hz$ .

W celu zaprezentowania poprawności zidentyfikowanych parametrów modelu pokazano porównanie pętli histerezy uzyskanych z eksperymentu i z modelu. Przykładowy zbiór pętli pokazano na rysunku 7.6. Zaprezentowany zbiór wyników obejmuje jedną wartość pola magnetycznego  $H = 50kA/m$  oraz wszystkie cztery badane amplitudy odkształcenia.

Bezpośrednie porównanie pętli histerezy uzyskanych z eksperymentu oraz z modelu pokazano na rysunku 7.7. Na wykresie 7.7a i 7.7b zaprezentowano zbiór pętli dla kolejnych wartości pola magnetycznego, od  $H = 0 kA/m$  do  $H = 100 kA/m$  ze skokiem co 10. Z kolei na wykresie 7.7c pokazano



(c)

Rysunek 7.5. Zidentyfikowane parametry modelu w funkcji pola magnetycznego przy ustalonej częstotliwości wymuszenia  $f = 1Hz$ . (kontynuacja rysunku)

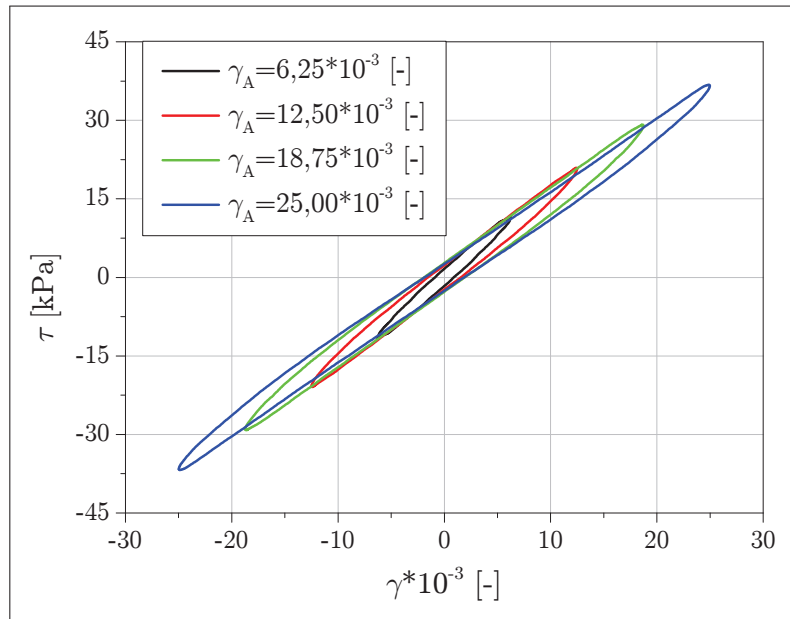
Tablica 7.1. Wartości parametrów funkcji linowej w postaci  $y = A + Bx$  do aproksymacji zależności  $G_1$ ,  $G_2$  i  $\tau_{02}$  od pola magnetycznego. Dodatkowo zamieszczono  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$  - odchylenie standardowe oraz  $R^2$ .

| Parametr $y$ | $A$    | $\sigma_A$ | $B$  | $\sigma_B$ | $R^2$   |
|--------------|--------|------------|------|------------|---------|
| $G_1$        | 135035 | 472        | 94   | 7.98       | 0.93315 |
| $G_2$        | 113875 | 709        | 78   | 11.98      | 0.80817 |
| $\tau_{02}$  | 3131   | 43         | 8.98 | 0.72       | 0.9380  |

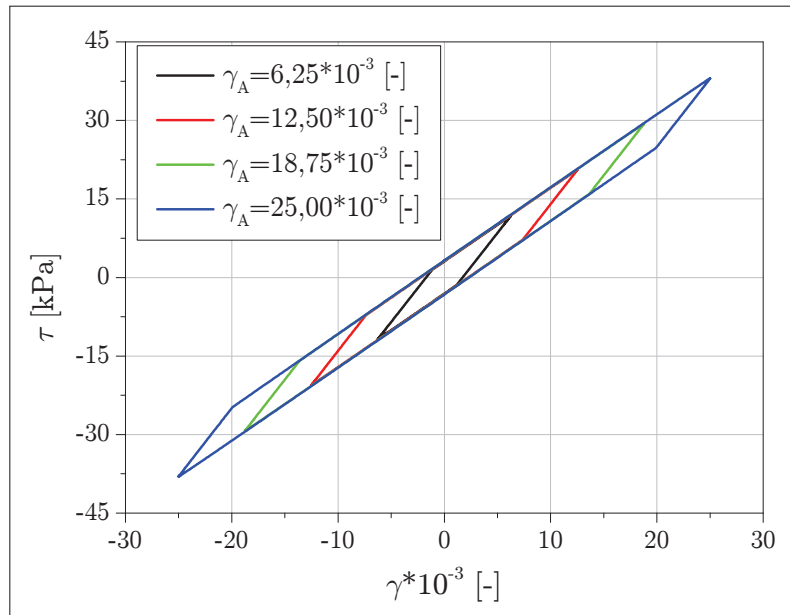
bezpośrednie porównanie pojedynczych pętli. Widoczne jest zadowalające odwzorowanie wyników rzeczywistych. Różnice pojawiają się w miejscach gdzie model nie przewiduje gładkich przejść, a pętle rzeczywiste mają kształt obły/zbliżony do elipsy.

#### 7.2.4. Wyniki identyfikacji dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego. Wpływ częstotliwości na wyniki identyfikacji.

Na początku tego rozdziału (7.2) przyjęto założenie o usunięciu elementu lepkiego z modelu. Taki krok zapewnił niezależność od prędkości odkształcenia, a więc i częstotliwości wymuszenia. Było to założenie upraszczające proces identyfikacji, ale i zubażające możliwości modelu. W założeniach początkowych, model dla badanego materiału powinien posiadać możliwość opisu zachowania w pewnym zakresie pól mechanicznych – wielkości odkształceń i częstotliwości.



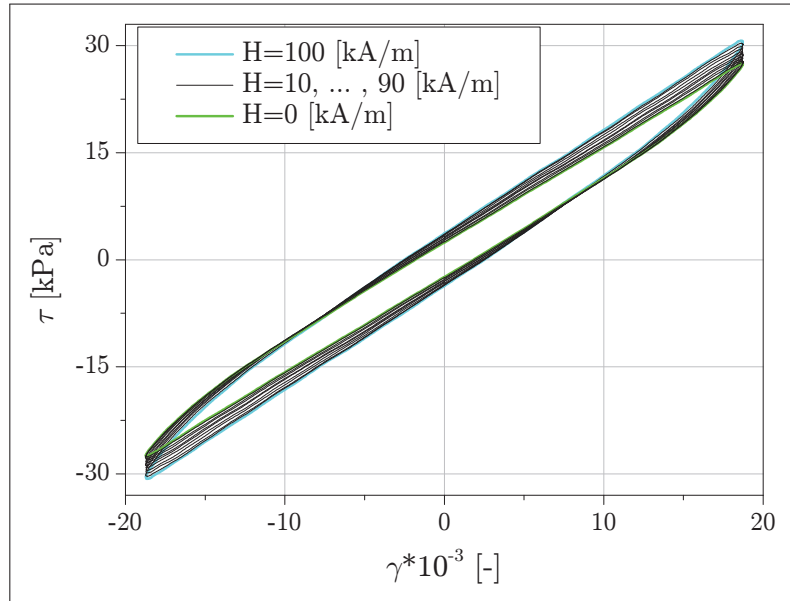
(a)



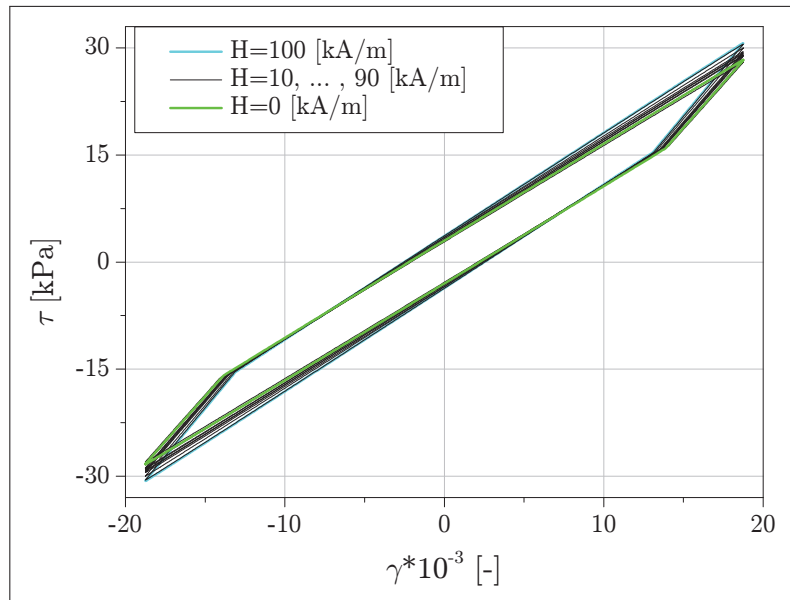
(b)

Rysunek 7.6. Rezultat identyfikacji parametrów modelu. Porównanie zbioru pętli rzeczywistych a) oraz zbioru pętli uzyskanych z modelu b) dla:  $H = 50kA/m$ ,  $f = 1Hz$ .

W tym punkcie identyfikacji sprawdzono czy model sprężysto-plastyczny z kinematycznym wzmocnieniem będzie dobrze odzwierciedlał zachowanie się badanego elastomeru magnetoreologicznego w badanym zakresie częstotliwości wymuszenia. W tym celu wykonano identyfikację parametrów modelu dla danych eksperymentalnych z badań określonych jako Test-3 (Tabela 6.3), uzyskanych dla różnych wartości częstotliwości odkształcenia. Analizę da-



(a)

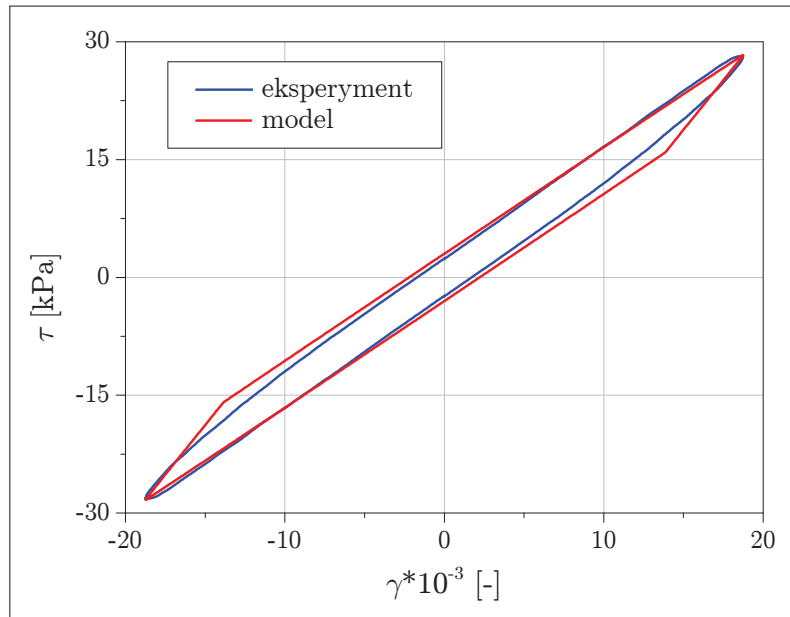


(b)

Rysunek 7.7. Porównanie pętli rzeczywistych oraz uzyskanych z modelu: a) – pętli rzeczywiste i b) – pętli z modelu dla kolejno narastających wartości pola magnetycznego.

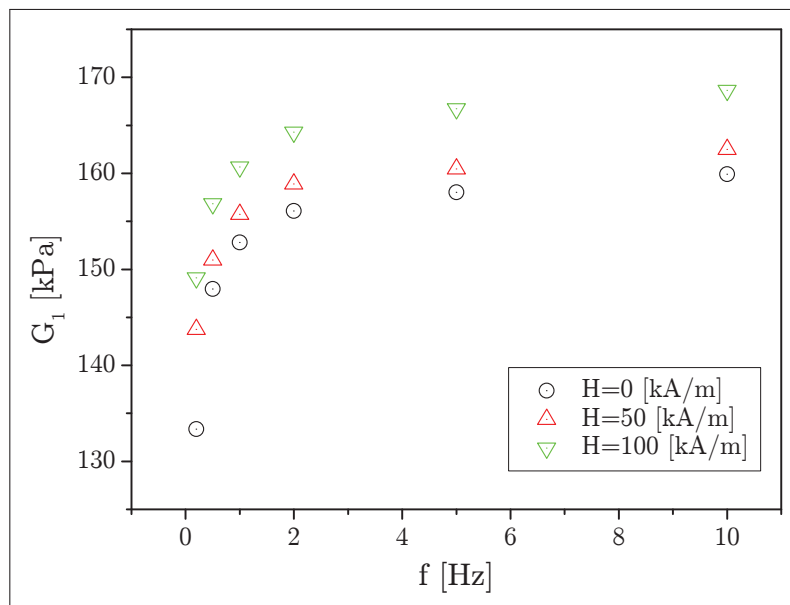
nych przeprowadzono osobno dla każdej częstotliwości i trzech wartości pól magnetycznych. Wyniki identyfikacji zaprezentowano na rysunku 7.8.

Analizując uzyskane wyniki wyraźnie widoczny jest zakres, w którym parametry modelu są niezależne od częstotliwości. Poniżej  $f = 1Hz$  następuje gwałtowny spadek wartości parametrów  $G_1$  i  $G_2$ , natomiast  $\tau_{o2}$  wzrasta. W zakresie  $1 - 10Hz$  można natomiast ich wartości uznać za stałe. Taki wynik pokazuje, że przyjęty model sprężysto-plastyczny z kinematycznym wzmocnieniem można z powodzeniem stosować w zakresie częstotliwości  $1 - 10Hz$



(c)

Rysunek 7.7. Porównanie pętli rzeczywistych oraz uzyskanych z modelu: c) - bezpośrednio porównanie pojedynczych pętli dla  $H = 0 \text{ kA/m}$ ,  $\gamma_A = 18.75 * 10^{-3}$ ,  $f = 1 \text{ Hz}$ . (kontynuacja rysunku)

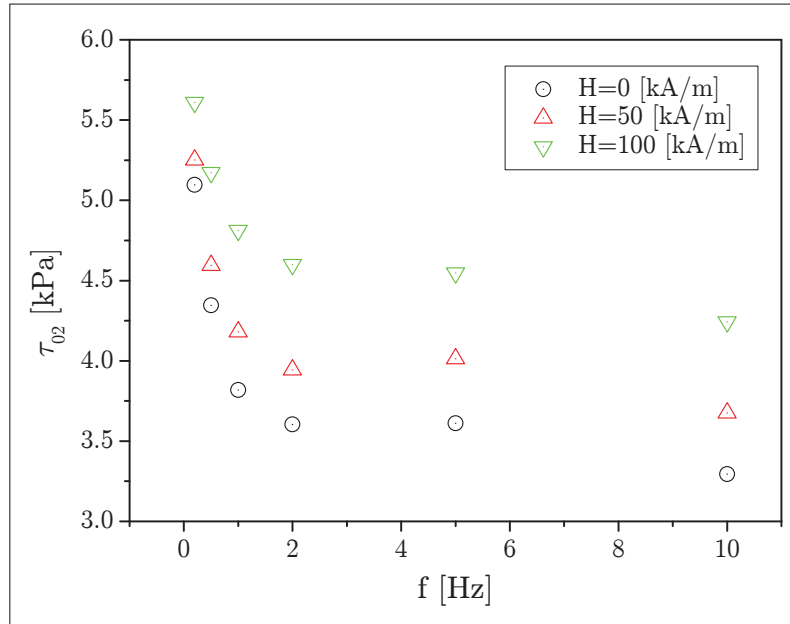


(a)

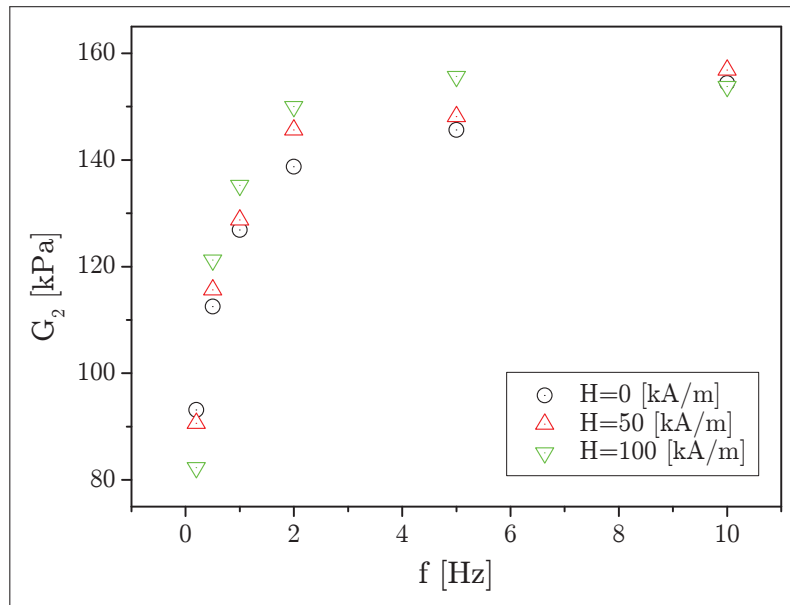
Rysunek 7.8. Wynik identyfikacji parametrów modelu w zależności od częstotliwości wymuszenia, przeprowadzony dla ustalonej amplitudy odkształcenia  $\gamma_a = 18,75$  i trzech wartości pola magnetycznego.

ponieważ możliwe jest jednoznaczne wyznaczenie wartości parametrów modelu zależne jedynie od pola magnetycznego. Wyniki identyfikacji z badań Test-3 dla opisywanego zakresu częstotliwości są zbliżone z wynikami uzyska-





(b)



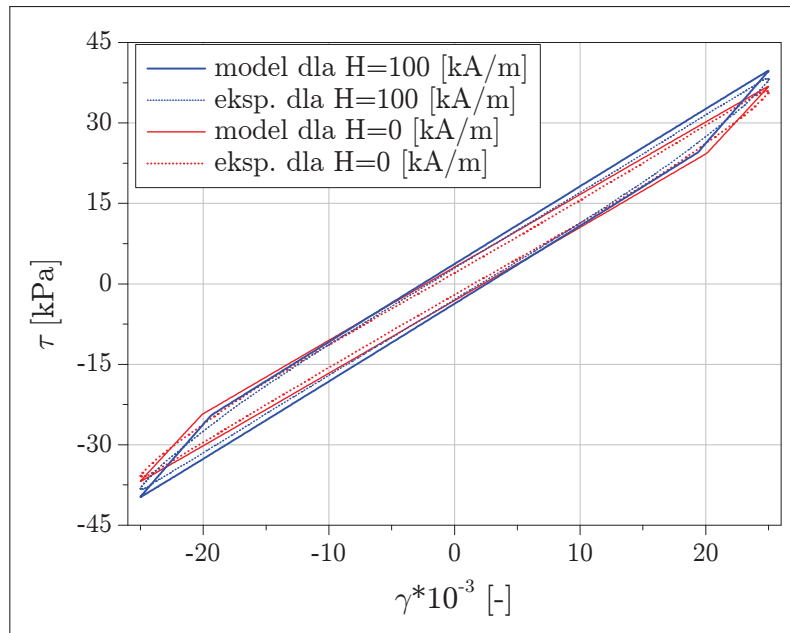
(c)

Rysunek 7.8. Wynik identyfikacji parametrów modelu w zależności od częstotliwości wymuszenia, przeprowadzony dla ustalonej amplitudy odkształcenia  $\gamma_a = 18,75$  i trzech wartościach pola magnetycznego. (kontynuacja rysunku)

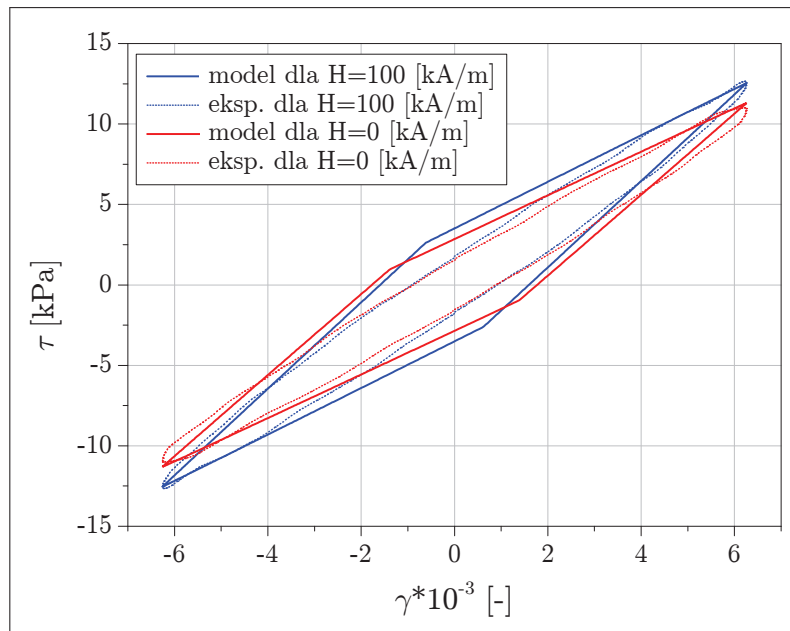
nymi dla Test-1 i Test-2 (wykonane przy  $f = 1 \text{ Hz}$ ). Dodatkowo zaobserwować można wyraźne i powtarzające się, dla każdej częstotliwości, oddziaływanie pola magnetycznego. Występuje ono w sposób podobny dla każdej z badanych częstotliwości wymuszenia. Parametry analizowanego modelu  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $\tau_{02}$  wzrastają wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego.

W celu końcowego zaprezentowania wyników identyfikacji wykonano wy-

kresy porównujące pętle rzeczywiste z pętlami uzyskanymi z modelu. Na rysunku 7.9 pokazano porównanie pętli przy skrajnych wartościach pól magnetycznych oraz dwóch skrajnych amplitudach odkształcenia.



(a)



(b)

Rysunek 7.9. Rezultat identyfikacji parametrów modelu. Porównanie pętli uzyskanych z modelu oraz danych rzeczywistych dla:  $H = 0 \text{ kA/m}$  i  $H = 100 \text{ kA/m}$  oraz  $\gamma_A = 25 \cdot 10^{-3}$  – a) oraz  $\gamma_A = 6.25 \cdot 10^{-3}$  – b).

Analiza tych wykresów pokazuje, że model dobrze odzwierciedla wyniki dla wysokich amplitud odkształceń ( $\gamma_A = 25 \cdot 10^{-3}$ ), natomiast w niskim zakresie są one gorsze ( $\gamma_A = 6.25 \cdot 10^{-3}$ ). Przyjęty model materiału sprężysto-plastycznego, ze względu na swoje cechy, umożliwia opisanie pętli w kształcie

równoległoboku. Z tego powodu pojawiają się różnice pomiędzy pętlami rzeczywistymi, a pętlami wyznaczonymi z modelu. Pomimo tego można uznać za dobry opis badanego materiału elastomeru magnetoreologicznego za pomocą modelu ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem, gdzie jego parametry są funkcjami pola magnetycznego.

## 8. Wnioski i uwagi końcowe

*Zaprezentowane wyniki prac pozwalają stwierdzić, iż możliwy jest opis właściwości magnetomechanicznych elastomeru magnetoreologicznego obciążonego cyklicznie w warunkach ścinania przy pomocy modelu ciała sprężysto-plastycznego. Jego parametry materiałowe są zależne liniowo od natężenia pola magnetycznego.*

Szczegółowe omówienie rezultatów zamieszczono poniżej. Wnioski podzielono odpowiednio na: obejmujące budowę materiałów, metodykę ich badania oraz identyfikacji modeli je opisujących.

1. Wytworzono grupę pierwszą, czyli selekcyjną grupę elastomerów magnetoreologicznych na bazie matryc polimerowych.
  - a) Opracowano technologię wykonywania elastomerów magnetoreologicznych na bazie matryc polimerowych oraz cząstek materiału ferromagnetycznego. Do tego celu posłużono się dostępnymi na rynku polimerami, które posłużyły za matrycę nośną. Wybrano dwa rodzaje: kauczuk silikonowy oraz kopolimer blokowy SEBS. Jako wypełnienie aktywne - materiał ferromagnetyczny wybrano dwa typy cząstek: żelazo karbonylkowe firmy BASF oraz proszki żelaza firmy *Höganäs*.
  - b) W rezultacie uzyskano typoszereg materiałów o zmiennych cechach mechanicznych pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Zaobserwowano wpływ tego pola na otrzymywane rezultaty badań mechanicznych. W zależności od typu badanego materiału, kompozycji matrycy i wypełnienia ferromagnetycznego uzyskano zróżnicowane pętle histerezy. Analiza porównawcza, dla skrajnych zmian wartości pola magnetycznego (0 - 110 kA/m,) pokazała, że zmiana wielkości pola pętli histerezy może się wahać w zakresie od 20 do 75 %.
  - c) Na podstawie całościowej analizy wyników oraz obserwacjach związanych z wykonaniem eksperymentu wytypowano jeden rodzaj materiału, dla którego wyniki uznano za najlepsze. Głównym kryterium była zmiana wielkości pól pętli histerezy oraz zmiana amplitudy naprężenia pod wpływem pola magnetycznego. Wybrano materiał oznaczonego jako Typ E o zawartości 35% objętościowo żelaza, matrycy z termoplastu Tefabloc i dodatku oleju parafinowego.
2. Wykonano stanowisko do eksperymentalnego wyznaczenia tłumienia w elastomerach magnetoreologicznych przy zmiennych wartościach parametrów pola mechanicznego i magnetycznego.
  - a) Zestawiono i zbudowano własne stanowisko pomiarowe umożliwiające badanie elastomerów magnetoreologicznych w warunkach cyklicznego

ścinienia. Zapewniono możliwość regulacji natężenia pola magnetycznego oraz zmiany parametrów widma obciążenia mechanicznego (amplituda odkształcenia, częstotliwość).

- b) Zaprojektowano i wykonano system zapewniający kontrolę i regulację parametrów mechanicznych i magnetycznych. Układ ten posiadał możliwość jednoczesnej akwizycji sygnałów pomiarowych oraz zapewniał możliwość ich przetwarzania w celu obliczania energii dyssypacji i krzyżowych charakterystyk magnetomechanicznych.
- c) Stworzono metodę badawczą do analizy wpływu parametrów obciążenia mechanicznego oraz natężenia pola magnetycznego na właściwości tłumiące wytworzonych elastomerów magnetoreologicznych. Umożliwiło to w dalszym etapie wykonanie identyfikacji zaproponowanej grupy modeli konstytutywnych.
- d) Przeprowadzono kilka serii badań, których wyniki posłużyły w kolejnych częściach pracy do identyfikacji modeli tłumienia.

Podsumowując, można stwierdzić, iż wykazano przydatność układu pomiarowego do badania właściwości elastomerów magnetoreologicznych do badań w warunkach obciążeń cyklicznych.

3. Po zrealizowaniu pilotowej serii badań, obejmujących szeroką grupę wytworzonych elastomerów magnetoreologicznych, zdecydowano się na wybranie jednego typu oraz poddanie go dokładnej analizie. Zmodyfikowano procedurę wytwarzania oraz zaplanowano i zrealizowano kompleksowy zbiór testów i badań.
  - a) Prowadzone badania wstępne pozwoliły na uzyskanie szeregu wyników, które pozwoliły na ocenę przydatności otrzymanych materiałów. Głównym kryterium było uzyskanie największego efektu magnetoreologicznego. Dlatego do dalszej dokładnej analizy wybrano materiał oznaczony jako Typ E.
  - b) Zmodyfikowano procedurę wytwarzania elastomeru tak, by zachować jak największą stabilność/powtarzalność parametrów procesu. Wykonano serię próbek o jednakowych parametrach, które przebadano analizując wpływ pola magnetycznego oraz pozostałych parametrów mechanicznych.
4. Wykonano identyfikację parametrów i na tej podstawie oceniono przydatność najpowszechniej stosowanego w literaturze przedmiotu modelu do opisu elastomerów magnetoreologicznych - modelu Kelvina-Voigta.
  - a) Zaplanowano oraz zrealizowano cykl badawczy obejmujący trzy testy. Przebadano wpływ pola magnetycznego, amplitudy odkształcenia oraz częstotliwości wymuszenia. Otrzymano zbiór wyników badań dla grupy próbek elastomeru magnetoreologicznego typu E.
  - b) Zidentyfikowano parametry modelu - współczynniki  $G'$  i  $G''$ . Wykazano, iż w przypadku badanych elastomerów magnetoreologicznych, przydatność modelu Kelvina-Voigta jest bardzo ograniczona. Wyznaczenie parametrów modelu dla pojedynczych pętli histerezy nie na-

stręczało trudności obliczeniowych, natomiast okazało się że są one silnie zależne od wartości amplitudy odkształcenia i częstotliwości.

5. Zaproponowano wykorzystanie innego modelu do opisu badanego materiału - modelu sprężysto-plastycznego. Wykazano jego przydatność i poprawność.
  - a) Ponieważ model lepkosprężysty materiału najczęściej wykorzystywany do opisu elastomerów magnetoreologicznych nie dał zadowalających rezultatów, zdecydowano się na próbę znalezienia nowego modelu. Mając na uwadze doświadczenia związane z innymi materiałami magnetoreologicznymi, wytypowano wstępnie model materiału charakteryzujący się dwoma rodzajami elementów odpowiedzialnych za rozpraszanie energii - lepkiem i plastycznym. Zaproponowano użycie modelu materiału sprężysto-lepkoplastycznego.
  - b) Zidentyfikowano parametry modelu i zweryfikowano otrzymane wyniki.

Zebrano ponadto ważne informacje dodatkowe (np. z zakresu sterowania właściwościami cieczy, pomiarów i identyfikacji modeli), których – prawdopodobnie świadomie – nie podają producenci ani renomowane laboratoria, traktując je jako kluczowe dla uzyskania przewagi kompetencyjnej. Zdobyte w ten sposób doświadczenie pozwoliło na podjęcie zasadniczego zagadnienia, jakim były pomiary i identyfikacja tłumienia w kompozytach MR.

6. Zgromadzony w trakcie przygotowania rozprawy dorobek opublikowano w 19 pracach (czasopismach lub recenzowanych materiałach konferencyjnych), których autorem lub współautorem jest doktorant.



## 9. Proponowane kierunki dalszych badań

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:

1. Optymalizację doboru składników elastomeru, w tym niemagnetycznej matrycy, elementów magnetycznie aktywnych (w tym: rodzaju, kształtu, ilości i rozmieszczenia cząstek) oraz dodatków uplastyczniających.
2. 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.
3. Przeprowadzenie gruntownych badań zmęczeniowych wytworzonych materiałów, gdyż możliwości aplikacyjne elastomerów magnetoreologicznych uzależnione są od stabilności właściwości tłumiących w zakresie wytrzymałości wysokocyklowej.
4. Poszukiwania związków konstytutywnych umożliwiających opis właściwości magnetomechanicznych, w tym szczególnie z uwzględnieniem wpływu częstotliwości obciążania.
5. Budowę demonstratorów laboratoryjnych prezentujących możliwości komercjalizacji elastomerów magnetoreologicznych.

## Bibliografia

- [1] Kaleta J., *Materialy magnetyczne Smart. Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [2] Stevens T., *A modern-day Ben Franklin*, *Industry Week*, 248, 1999, 20–25.
- [3] Rabinow J., *US Patent 2,575,360. Magnetic fluid torque and force transmitting device*.
- [4] Ławniczak A., Milecki A., *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1999.
- [5] Carlson J., *What makes a good MR fluid?*, [w:] *Proceedings of the 8th International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions* 2001.
- [6] Tao R., *Super-strong magnetorheological fluids*, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 13, 2001, 979–999.
- [7] Ouellette J., *Smart fluids move into the marketplace*, *The Industrial Physicist*, 9, 2003/2004, 14–17.
- [8] Barber D., Carlson J., *Performance Characteristics of prototype MR Engine Mounts Containing LORD Glycol MR Fluids*, *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.
- [9] Kaleta J., Lewandowski D., **Zajac P.**, *Damping with the magnetorheological fluids (MRF), experimental methods and model verification*, [w:] *9th Danubia-Adria Symposium On Experimental Methods In Solid Mechanics* 2002.
- [10] Kaleta J., **Zajac P.**, *Identyfikacja tłumienia magnetomechanicznego w cieczach i kompozytach typu MRF*, [w:] *II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia i Konstrukcji, Augustów* 2003.
- [11] Pare C., *Experimental Evaluation of Semiactive Magneto-Rheological Suspensions for Passenger Vehicles*, praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University 1998.
- [12] Lee H., Sung K., Choi S., *Ride Comfort Characteristics with Different Tire Pressure of Passenger Vehicle Featuring MR Damper*, *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.
- [13] Romanowski R., *Polski wkład w Ferrari*, *Projektowanie i konstrukcje inżynierskie*, 3(18), 2009, 62–65.
- [14] Simon D., *Experimental Evaluation of Semiactive Magnetorheological Primary Suspensions for Heavy Truck Applications*, praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University 1998.
- [15] Ha S., Choi S., Rhee E., Kang P., *Optimal Design of a Magnetorheological Fluid Suspension for Tracked Vehicle*, *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.
- [16] Gravatt J., *Magneto-Rheological Dampers for Super-Sport Motorcycle Applications*, praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University 2003.

- [17] Lee D., Nam Y., Yamane R., Park M., *Performance Evaluation on Vibration Control of MR Landing Gear*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [18] Wiehe A., Voth K., Maas J., *Rotary MR Actuators with Current less Holding Torque for a Vehicle Door Assistant*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [19] Hiemenz G., Hu W., Wereley N., *Adaptive Magnetorheological Seat Suspension for the Expeditionary Fighting Vehicle*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [20] Carlson J., Matthis W., Toscano J., *Smart Prosthetics Based on Magnetorheological Fluids*, [w:] *Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, A. McGowan (red.), 4332, SPIE 2001, 308–316.
- [21] Yang G., *Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control*, rozprawa doktorska, University of Notre Dame 2001.
- [22] Kikuchi T., Oda K., Yamaguchi S., Furusho J., *Leg-robot with MR Clutch to realize virtual spastic movements*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [23] Lampe D., *Untersuchungen Zum Einsatz Von Magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen*, rozprawa doktorska, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden 2000.
- [24] Bachman P., Milecki A., *MR haptic joystick in control of virtual servo drive*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [25] Chciuk M., Milecki A., Myszkowski A., *Applications of magnetorheological brakes in manual control of lifting devices and manipulators*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [26] Milecki A., Sędziak D., Hauke M., *Zastosowania cieczy magnetoreologicznych w pochłaniaczach energii. IV Wrocławskie Sympozjum, Automatyzacja Produkcji, Nauka-Wiedza Innowacje*, [w:] *T.2 serii Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003, 268–274.
- [27] Magnac G., Claeysen F., Vial K., Letty R., Sosnicki O., Benoit C., *SelfLocking MRF Latches and Dampers*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [28] Milecki A., *Investigation and control of magneto-rheological fluid dampers*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 2001, 379–391.
- [29] Kim D., Lee J., Cho M., Choi S., *An Experimental Study on the Ultra-precision Polishing of Quartz Crystal Using MR Fluids and Micro Abrasives*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [30] Jacobs S., Golini D., Hsu Y., Puchebner B., Strafford D., Kordonsky W., Prokhorov I., Fes E., Pietrowski D., *Magnetorheological Finishing: a Deterministic Process for Optics Manufacturing*, [w:] *International Conference on Optiical Fabrication and Testing*, 2576 1995, 372–382.
- [31] Kordonsky W., Golini D., *Progress Update in Magnetorheological Finishing*, [w:] *Proceedings of the 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids and, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications*, World Scientific 1997, 837–844.
- [32] Lewandowski D., *Właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja.*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska 2005.

- [33] Odenbach S., *Magnetics fluids*, Advances in Colloid and Interface Science, 46, 1993, 263–282.
- [34] Nethe A., Scholz T., H.D. S., *Improving the Efficiency of Electric Motors Using Ferrofluids*, Magnetohydrodynamics, 37(3), 2001, 312–317.
- [35] Wiślicki B., Lassota W., Holnicki-Szulc J., *Możliwości polepszenia żywotności węzłów łożyskowych za pomocą magnetoreologicznych*, Tribologia, 5, 1999, 701–709.
- [36] Lee J., Nam Y., Yamane R., Park M., *Position feedback control of a non-magnetic body levitated in magnetic fluid*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [37] Zeisberger M., Dutz S., Lehnert J., Muller R., *Measurement of the distribution parameters of size and magnetic properties of magnetic nanoparticles for medical applications*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [38] Rotariu O., Udrea L., Badescu V., Badescu R., Apreotesei G., *Magnetic capturing and guiding of magnetite-polyvinyl alcohol ferrofluids for targeted drug delivery*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [39] Flores G., Liu J., *Embolization of Blood Vessels as a Cancer Therapy Using Magnetorheological Fluids*, Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, 2001, 146–152.
- [40] Popplewell J., Rosensweig R., *Magnetorheological fluid composites*, Journal of Physics D: Applied Physics, 29, 9, 1996, 2297–2303.
- [41] Zrinyi M., Szabo D., Kilian H., *Kinetics of Shape Changes of Magnetic Field Sensitive Polymer Gels*, Polymer Gels and Networks, 6, 1999.
- [42] Skumiel A., Józefczak A., Żabowski M., *The Influence of of the Concentration of Ferroparticles in a Ferrofluid on its Magnetic and Acoustic Properties*, Journal of Physics D: Applied Physics, 36, 2003, 3120–3124.
- [43] Fuchs A., Xin M., Gordaninejad F., Wang X., Hitchcock G., Gecol H., Evrensel C., Korol G., *Polyurethane and Silicone Magnetorheological Polymeric Gels*, Journal of Applied Polymer Science, 92, 2004, 1176–1182.
- [44] Yuxian A., Montgomery T., *Actuating Properties of Soft Gels with Ordered Iron Particles: Basis for a Shear Actuator*, Smart Materials and Structures, 12(2), 2003, 157–163.
- [45] Fuchs A., Hu B., Gordaninejad F., Evrensel C., *Synthesis and Characterization of Magnetorheological Polyimide Gels*, Journal of Applied Polymer Science, 98, 2005, 2402–2413.
- [46] Hu B., Fuchs A., Huseyin S., Gordaninejad F., Evrensel C., *Supramolecular Magnetorheological Polymer Gels*, Journal of Applied Polymer Science, 100, 2006, 2464–2479.
- [47] Farshad M., LeRoux M., *Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels*, Polymer Testing, 24, 2005, 163–168.
- [48] Kaleta J., Lewandowski D., **Zajac P.**, *Wpływ sztywności matrycy na tłumienie w kompozycie magnetoreologicznym*, [w:] IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce/Cedzyna 2003.
- [49] Kaleta J., Kustroń P., **Zajac P.**, *Mathematical models of magnetorheological composite dampers-verification based on shear-mode damping device testing*, [w:] SMART'03 Workshop 2003.
- [50] Kaleta J., Lewandowski D., **Zajac P.**, *Cyclic properties of magnetorheological composite*, [w:] 20th Danubia-Adria Symposium On Experimental Methods In Solid Mechanics 2003.
- [51] Kaleta J., Lewandowski D., **Zajac P.**, Ziętek G., *Damping identification of*

- cyclic sheared magnetorheological composite*, [w:] *21st Danubia-Adria Symposium On Experimental Methods In Solid Mechanics* 2004.
- [52] Kaleta J., Lewandowski D., **Zajac P.**, *Tłumienie w wybranych kompozytach magnetoreologicznych w warunkach obciążeń cyklicznych*, [w:] *XX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska* 2004, 147–153.
- [53] Kaleta J., Lewandowski D., *Inelastic properties of magnetorheological composites: I. fabrication, experimental tests, cyclic shear properties*, *Smart Materials and Structures*, 16, 2007, 1948–1953.
- [54] Kaleta J., Lewandowski D., Ziętek G., *Inelastic properties of magnetorheological composites: II. model, identification of parameters*, *Smart Materials and Structures*, 16, 2007, 1954–1960.
- [55] Carlson J., Jolly M., *MR fluid, foam and elastomer devices*, *Mechatronics*, 10, 2000, 555–569.
- [56] Kaleta J., Kustroń P., Lewandowski D., *Tłumienie drgań w belce z wykorzystaniem układu adaptacyjnego z kompozytem magnetoreologicznym*, [w:] *Mechanika Ośrodków Niejednorodnych, Zielona Góra - Łagów* 2005.
- [57] Kaleta J., Lewandowski D., **Zajac P.**, Kustroń P., *Magnetorheological composites as semi-active elements of dampers*, *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.
- [58] Kustroń P., *Tłumienie drgań w konstrukcji mechanicznej z wykorzystaniem układu adaptacyjnego z cieczą magnetoreologiczną*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska 2004.
- [59] Lord Corporation, Materials Division, *MR Controllable Friction Damper RD-1097-01, Product Bulletin* 2003.
- [60] Carlson J., *Low-cost MR fluid sponge devices*, [w:] *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magnetorheological Suspensions* 1999, 621–628.
- [61] Carlson J., 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* 2001.
- [62] Deshmukh S., McKinley G., *Fluid-Filled Cellular Solids for Controlled*, US Patent 20040173422 2004.
- [63] Bose H., Roder R., *US Patent 7,608,197 B2. Magnetorheological Elastomers and use thereof*, 2009.
- [64] Kaleta J., **Zajac P.**, *Właściwości cykliczne anizotropowych i izotropowych kompozytów magnetoreologicznych z matrycą z elastomeru termoplastycznego*, [w:] *XI Krajowa Naukowo-Szkoleniowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce/Cedzyna* 2007.
- [65] Zhou G., Jiang Z., *Deformation in magnetorheological elastomer and elastomer-ferromagnet composite driven by a magnetic field*, *Smart Materials and Structures*, 13, 2004, 309–316.
- [66] Zhou G., Li J., *Dynamic behavior of a magnetorheological elastomer under uniaxial deformation: 1. experiment*, *Smart Materials and Structures*, 12, 2003, 859–872.
- [67] Schlotter W., Parachuri S., Erncarnacion P., Dufresne E., Dierker S., Clarke R., *Speckle Analysis of Relaxation Dynamics in Magnetorheological Elastomers*, rap. tech., The Advanced Photon Source User Activity Report, Argonne National Laboratory Report ANL-00/5 2001.
- [68] Sun T., Gong X., Jiang W., Li J., Xu Z., Li W.a., *Study on the damping properties of magnetorheological elastomers based on cis-polybutadiene rubber*, *Polymer Testing*, 27, 2008, 520–526.



- [69] Jolly M., Carlson J., Munoz B., Bullions T., *The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 7, 1996, 613–622.
- [70] Kallio M., Lindroos T., Aalto S., Jarvinen E., Karna T., Meinander T., *Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer*, Smart Materials and Structures, 16, 2007, 506–514.
- [71] Wang Y., Hu Y., Chen L., Gong X., Jiang W., Zhang P., Chen Z., *Effects of rubber/magnetic particle interactions on the performance of magnetorheological elastomers*, Polymer Testing, 25, 2006, 262–267.
- [72] Kallio M., *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers*, rozprawa doktorska, VTT, Finlandia 2005.
- [73] Rawa H., *Elektryczność i magnetyzm w technice*, PWN 2001.
- [74] Lokander M., Stenberg B., *Performance of isotropic magnetorheological rubber materials*, Polymer Testing, 22, 2003, 245–251.
- [75] Blom P., Kari L., *Amplitude and frequency dependence of magneto-sensitive rubber in a wide frequency range*, Polymer Testing, 24, 2005, 656–662.
- [76] Davis L., *Model of magnetorheological elastomers*, Journal of Applied Physics, 85, 6, 1999, 3348–3351.
- [77] Lokander M., Reitberger T., Stenberg B., *Oxidation of natural rubber-based magnetorheological elastomers*, Polymer Degradation and Stability, 86, 2004, 467–471.
- [78] Lokander M., Stenberg B., *Isotropic magnetorheological nitrile rubbers with large iron particles*, [w:] *Proceedings of the Eighth International Conference Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions* 2001.
- [79] Lokander M., Stenberg B., *Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials*, Polymer Testing, 22, 2003, 677–680.
- [80] Shen Y., Golnaraghi M., Heppler G., *Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 15, 2004, 27–35.
- [81] Farshad M., Benine A., *Magnetoactive elastomer composites*, Polymer Testing, 23, 2004, 347–353.
- [82] Farshad M., LeRoux M., *A new active noise abatement barrier system*, Polymer Testing, 23, 2004, 855–860.
- [83] Kallio M., Aalto S., Lindroos T., Jarvinen E., Karna T., Meinander T., *Preliminary test on a MRE device*, AMAS Workshop on smart materials and structures SMART’03, 2003, 353–360.
- [84] Zhou G., *Shear properties of a magnetorheological elastomer*, Smart Materials and Structures, 12, 2003, 139–146.
- [85] Kari L., Lokander M., Stenberg B., *Structure-borne sound properties of isotropic magneto-rheological rubber*, Kautschuk Gummi Kunststoffe, 55(12), 2002, 1–5.
- [86] Ginder J., Clark S., Schlotter W., Nichols M., *Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers*, International Journal of Modern Physics B, 16, 2002, 2412–2418.
- [87] Gong X., Zhang X., Zhang P., *Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers*, Polymer Testing, 24, 2005, 669–676.
- [88] Gong X., Zhang X., Zhang P., *Study of mechanical behavior and microstructure of magnetorheological elastomers*, International Journal of Modern Physics B, 19, 2005, 321–327.



- [89] Hu Y., Wang Y., Gong X., Gong X., Zhang X., Jiang W., Zhang P., Chen Z., *New magnetorheological elastomers based on polyurethane/si-rubber hybrid*, Polymer Testing, 24, 2005, 324–329.
- [90] Hu Y., Wang Y., Gong X., Gong X., Zhang X., Jiang W., Zhang P., Chen Z., *Magnetorheological elastomers based on polyurethane/si-rubber hybrid*, International Journal of Modern Physics B, 19, 2005, 52–58.
- [91] Awietjan S., *Manufacturing, structure and properties of magnetorheological elastomers*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2010.
- [92] Bose H., Roder R., *Magnetorheological Elastomers with High Variability of Their Mechanical Properties*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [93] Kamińska J., Pięłowski J., **Zajac P.**, *Magnetorheological properties of rubber compositions with carbonyl iron powders*, Konferencja Polymerwerkstoffe 2006, Halle/Saale, 2006.
- [94] Wang Y., Hu Y., Gong X., Jiang W., Zhang P., Chen Z., *Preparation and properties of magnetorheological elastomers based on silicon rubber/polystyrene blend matrix*, Journal of Applied Polymer Science, 103, 2007, 3143–3149.
- [95] Aktiengesellschaft B., *Carbonyl Iron Powders. A Versatile Metal Powder Specially from BASF*, Catalog & Product Specification 2001.
- [96] Bellan C., Bossis G., *Field dependence of viscoelastic properties of mr elastomers*, International Journal of Modern Physics B, 16, 2002, 2447–2453.
- [97] Chen L., Gong X., Li W., *Effect of carbon black on the mechanical performances of magnetorheological elastomers*, Polymer Testing, 27, 2008, 340–345.
- [98] Liao G., Gong X., Xuan S., *Influence of shear deformation on the normal force of magnetorheological elastomer*, Materials Letters, 106, 2013, 270–272.
- [99] Lokander M., *Performance of Magnetorheological Rubber Materials*, rozprawa doktorska, KTH, Sztokholm 2004.
- [100] Wang Y., Hu Y., Wang Y., Deng H., Gong X., Zhang P., Jiang W., Chen Z., *Magnetorheological elastomers based on isobutylene-isoprene rubber*, Polymer Engineering and Science, 46, 2006, 264–268.
- [101] Yang Z., Qin C., Rao Z., Ta N., Gong X., *Design and analyses of axial semi-active dynamic vibration absorbers based on magnetorheological elastomers*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014.
- [102] Lerner A.A., *The Design and Implementation of a Magnetorheological Silicone Composite State-Switched Absorber*, praca magisterska, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology 2005.
- [103] Zhang X., Peng S., Wen W., Li W., *Analysis and fabrication of patterned magnetorheological elastomers*, Smart Materials and Structures, 17, 2008, 1–5.
- [104] Stepanov G., Borin D., Odenbach S., *Magnetorheological effect of magneto-active elastomers containing large particles*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [105] Lokander M., Staby J., Stenberg B., *Magnetorheological rubber materials: The role of reinforcement*, manuskrypt.
- [106] Song H., Wereley N., Bell R., Planinsek J., Filer II J., *Field dependent response of magnetorheological elastomers utilizing spherical fe particles versus fe nanowires*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [107] Wu J.K., Gong X.L., Fan Y.C., Xia H.S., *Improving the magnetorheological*

- properties of polyurethane magnetorheological elastomer through plasticization*, Journal of Applied Polymer Science, 123, 2012, 2476–2484.
- [108] Zhang X., Li W., Gong X., *An effective permeability model to predict field-dependent modulus of magnetorheological elastomers*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 13, 2008, 1910–1916.
- [109] Li Y., Li J., Samali B., *On the magnetic field and temperature monitoring of a solenoid coil for a novel magnetorheological elastomer base isolator*, Journal of Physics: Conference Series, 412, 2013.
- [110] Żuchowska D., *Polimery konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 2000.
- [111] Deng H., Gong X., *Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 13, 2008, 1938–1947.
- [112] Popp K., Zhang X., Li W., Kosasih P., *MRE properties under shear and squeeze modes and applications*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [113] Yancheng L., Jianchun L., Tongfei T., Weihua L., *A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control*, Smart Material and Structures, 22, 2013.
- [114] Behrooz M., Wang X., Gordaninejad F., *Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastomer isolator*, Smart Material and Structures, 23, 2014.
- [115] Boczkowska A., Awietjan S., Wróblewski R., *Microstructure-property relationships of urethane magnetorheological elastomers*, Smart Materials and Structures, 16, 2007, 1924–1930.
- [116] Koo J., Khan F., Jang D., H.J. J., *Dynamic characterization and modeling of magnetorheological elastomers under compressive loadings*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [117] Schrittester B., Major Z., Filipcsei G., *Characterization of the dynamic mechanical behavior of magneto-elastomers*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
- [118] Guan X., Dong X., Ou J., *Magnetostrictive effect of magnetorheological elastomer*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320, 2008, 158–163.
- [119] Bica I., *Magnetorheological elastomer-based quadrupolar element of electric circuits*, Materials Science and Engineering B, 166, 2010, 94–98.
- [120] Bica I., Anitas E., Bunoiu M., Vatzulik B., Juganaru I., *Hybrid magnetorheological elastomer: Influence of magnetic field and compression pressure on its electrical conductivity*, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014.
- [121] Watson J., *US Patent 5,609,353. Method and apparatus for varying the stiffness of a suspension bushing, 1997.*
- [122] Stewart W., Ginder J., Ellie L., Nichols M., *US Patent 5,816,587. Method and apparatus for reducing brake shudder, 1998.*
- [123] Elie L., Ginder J., Mark J., Nichols M., Stewart W., *US Patent 5,974,856. Method for allowing rapid evaluation of chassis elastomeric devices in motor vehicles, 1999.*
- [124] Elie L., Ginder J., Mark J., Nichols M., *US Patent 5,814,999. Method and apparatus for measuring displacement and force, 1998.*
- [125] *Thyssenkrupp techforum* 2006.
- [126] Barvosa-Carter W., N.L. J., Browne A., *US Patent 7,140,478 B2. Reversibly expandable energy absorbing assembly utilizing actively controlled and*

- engineered materials for impact management and methods for operating the same*, 2006.
- [127] 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.
  - [128] Ottaviani R., Ulicny J., Golden M., *US Patent 6,877,193 B2. Magnetorheological nanocomposite elastomer for releasable attachment applications*, 2005.
  - [129] Ottaviani R., Ulicny J., Golden M., *US Patent 7,020,938 B2. Magnetorheological nanocomposite elastomer for releasable attachment applications*, 2006.
  - [130] Browne A., Johnson N., *US Patent 7,029,056 B2. Closure lockdown assemblies and methods of utilizing active materials*, 2006.
  - [131] Badolato A., Pawlowski R., *US Patent 6,623,364 B2. Tunable slip yoke damper assembly*, 2003.
  - [132] Lerner A., Cunefar K., *US Patent 7,102,474 B2. Adaptable vibration absorber employing a magnetorheological elastomer with a variable gap length and methods and systems therefor*, 2006.
  - [133] Hitchcock G., Gordaninejad F., Fuchs A., *US Patent 7,086,507 B2. Controllable magneto-rheological elastomer vibration isolator*, 2006.
  - [134] Reji J., Suresh G., Natarajan V., *India Patent Application 2251/del/2004. Low frequency underwater acoustic projector using a magnetorheological elastomer*.
  - [135] Brei D., Redmond J., Wilmot N.A. Browne A., Johnson N., Jones G., *US Patent 7,063,377 B2. Hood lift mechanisms utilizing active materials and methods of use*, 2006.
  - [136] Brei D., Redmond J., Wilmot N., Browne A., Johnson N., Jones G., *US patent application US 2006/0012191 A1. Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use*, 2006.
  - [137] Brei D., Redmond J., Wilmot N., Browne A., Johnson N., Jones G., *European Patent Application EP 1 617 022 A2. Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use*, 2006.
  - [138] Usman M., Sung S., Jang D., Jung H., Koo J., *Numerical Investigation of Smart Base Isolation System Employing MR Elastomer*, Journal of Physics: Conference Series, 149, 2009.
  - [139] Hasheminejad S., Shahanimotlagh M., *Magnetic-field-dependent sound transmission properties of magnetorheological elastomer-based adaptive panels*, Smart Materials and Structures, 19, 2010.
  - [140] Behrooz M., Wang X., Gordaninejad F., *Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system*, Smart Material and Structures, 23, 2014.
  - [141] Yancheng L., Li J., Li W., Samali B., *Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator*, Smart Material and Structures, 22, 2013.
  - [142] Jolly M.R., Carlson J.D., Munoz B.C., *A model of the behaviour of magnetorheological materials*, Smart Materials and Structures, 5, 1996, 607–614.
  - [143] Fang S., Gong X., Zhang X., Zhang P., *Effect of pre-configuration on performance of magnetorheological elastomers*, International Journal of Modern Physics B, 19, 2005, 134–139.
  - [144] Li W., Zhang X., *A study of the magnetorheological effect of bimodal particle*

- based magnetorheological elastomers, *Smart Materials and Structures*, 19, 2010.
- [145] Borcea L., Bruno O., *On the magneto-elastic properties of elastomer-ferromagnet composites*, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 49, 2001, 2877–2919.
- [146] Wilczyński K., *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 2001.
- [147] Królewicz M., *Właściwości magnetomechaniczne elastomerów magnetoreologicznych o strukturze izotropowej i anizotropowej*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska 2010.
- [148] Melenev P., Raikher Y., Rusakov V., Stepanov G., *Field-induced plasticity of soft magnetic elastomers*, *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.
- [149] **Zajac P.**, *Identyfikacja tłumienia układu adaptacyjnego z cieczą magnetoreologiczną*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska 2002.
- [150] **Zajac P.**, *Projekt zawieszenia wagonu kolejowego ze sterowanym tłumieniem*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska 2002.
- [151] Kaleta J., Kijak P., **Zajac P.**, *Badanie tłumienia w elastomerach magnetoreologicznych w następstwie cyklicznego ścinania*, [w:] *Mechanika ośrodków ciągłych*, Łagów 2005.
- [152] Kaleta J., Kijak P., **Zajac P.**, *Damping identification of magnetorheological elastomers*, [w:] *22nd Danubia-Adria Symposium On Experimental Methods In Solid Mechanics* 2005.
- [153] Saechling H., Żebrowski W., *Tworzywa sztuczne*, WNT 1978.
- [154] Sengers W., *Rheological properties of olefinic thermoplastic elastomer blends*, rozprawa doktorska, Technische Universiteit Delft 2005.
- [155] Veenstra H., Verkooijen P., van Lent J., van Dam J., de Boer A., Posthuma A., Nijhof H., *On the mechanical properties of co-continuous polymer blends: experimental and modelling*, *Polymer*, 41, 2000, 1817–1826.
- [156] Gasperowicz A., Kaleta J., **Zajac P.**, *Badanie własności cyklicznych izotropowych kompozytów magnetoreologicznych*, [w:] *XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy 2006.
- [157] McGearry R., *Mechanical packing of spherical particles*, *Journal of The American Ceramic Society*, 44, 1961, 513–523.
- [158] Gasperowicz A., Kaleta J., **Zajac P.**, Ziętek G., *Badanie i modelowanie izotropowych elastomerów magnetoreologicznych*, [w:] *22 Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej 2007, 25–30.
- [159] Kaleta J., **Zajac P.**, Ziętek G., *Modeling of magnetorheological elastomers properties*, [w:] *22nd Danubia-Adria Symposium On Experimental Methods In Solid Mechanics* 2006.
- [160] Hanson D., *A Mechanism for the Mullins Effect*, Theoretical Division Nuclear Weapons Program Highlights 2005-2006, Los Alamos National Laboratory, 2006, 38–39.
- [161] Coquelle E., Bossis G., *Mullins effect in elastomers filled with particles aligned by a magnetic field*, *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2006, 7659–7672.
- [162] Ogden R., *Mechanics of rubberlike solids*, Proceedings of the 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2004.
- [163] Amin A., Lion A., Sekita S., Okui Y., *Nonlinear dependence of viscosity in modeling the rate-dependent response of natural and heigh damping rub-*

- bers in compression and shear: *Experimental identification and numerical verification*, International Journal of Plasticity, 22, 2006, 1610–1657.
- [164] Kaleta J., *Doświadczalne podstawy formułowania zmęczeniowych hipotez energetycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1998.
- [165] Kaleta J., **Zajac P.**, *Właściwości mechaniczne izotropowych elastomerów magnetoreologicznych z termoplastyczną matrycą*, [w:] *IV Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Zniszczenia i Konstrukcji* 2007.
- [166] **Zajac P.**, Kaleta J., Lewandowski D., Gasperowicz A., *Isotropic magnetorheological elastomers with thermoplastic matrices: structure, damping properties and testing*, Smart Materials and Structures, 19/4, 2010.
- [167] 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.
- [168] 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*-ethyleneco- butylene-*b*-styrene) (sebs)*, Rheologica Acta, 51, 2011, 37–50.
- [169] 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.
- [170] Liao G.J., Gong X.L., Kang C.J., Xuan S.H., *The design of an active-adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer and its vibration attenuation performance*, Smart Materials and Structures, 20, 2011, 075015.
- [171] Wu J.K., Gong X.L., Fan Y.C., Xia H.S., *Anisotropic polyurethane magnetorheological elastomer prepared through in situ polycondensation under a magnetic field*, Smart Materials and Structures, 19, 2010, 105007.
- [172] 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.
- [173] Lubarda V.A., Benson D.J., Meyers M.A., *Strain-rate Effects in Rheological Models of Inelastic Response*, International Journal of Plasticity, 19, 2003, 1097–1118.
- [174] Kisiel I., *Zastosowanie modelu reologicznego ciała M/V w mechanice gruntów*, Ossolineum 1967.
- [175] Drescher A., *Analiza pewnego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego*, Rozprawy Inżynierskie, 15, 1967, 713–729.



## Summary

The aim of this work was to identify magnetomechanical properties of selected group of magnetorheological composites during cyclic shearing. Composites with elastomer matrix filled with iron particles were chosen for the research. This type of material is called magnetorheological elastomer.

Silicon matrix and thermoplastic polymer matrix were selected for preliminary research. Iron particles with sizes from  $3\ \mu m$  up to  $150\ \mu m$  were used. Manufacturing technology of magnetorheological elastomers was developed. The test stand dedicated for manufactured composites testing was build.

Rectangular samples were cyclically sheared in external magnetic field with different magnetic field strength values. After preliminary reaserch one type of the composite with highest magnetorheological effect and optimal mechanical properties was selected for further research.

For detailed research composite with thermoplastic polymer matrix was selected. The matrix was mixture of SEBS block copolymer, polypropylene and paraffin oil. It was filled with iron particles with the size up to  $60\ \mu m$ . Composite samples were sheared with different displacement amplitude and frequency in magnetic field with different magnetic field strength values.

In addition mathematical model of the composite was proposed. At first Kelvin–Voigt model was used, however it was inadequate. Therefore elastic-viscoelastic model was created. It described properties of the composite in magnetic field more exactly than Kelvin–Voigt model.



## List of figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | The scheme of magnetic particles behavior in magnetorheological fluid: (a) – without magnetic field, (b) – with magnetic field (direction of the vector $H$ along $Z$ axis) [6]. . . . .  | 13 |
| 2.2  | The scheme of MRF damper. 1 – housing, 2 – piston, 3 – coil, 4 – MRF, 5 – holes in piston enabling flow of MRF, 6 – gas accumulator.  | 14 |
| 2.3  | MRF damper used in Expeditionary Fighting Vehicle [19]. . . . .   | 15 |
| 2.4  | Basic operation modes for MR Fluids: (a) – shear-mode, (b) – squeeze-mode, (c) – valve-mode, where arrows show direction of magnetic field vector [28]. . . . .   | 16 |
| 2.5  | Ferrofluids in magnetic field [32]. . . . .   | 17 |
| 2.6  | Magnetic Fluid Composite that is a dispersion of polystyrene spheres in Ferrofluid: (a) – without magnetic field, (b) – with magnetic field [40].   | 18 |
| 2.7  | Structure of Magnetorheological Composite with porous matrix soaked with MRF: 1 – cell walls of matrix, 2 – MRF, 3 – air [53] . . .   | 19 |
| 2.8  | Damper with sponge soaked with Magnetorheological Fluid. . . . .  | 20 |
| 2.9  | Brake with sponge soaked with Magnetorheological Fluid. . . . .   | 20 |
| 3.1  | The distribution of particles for structured MRE viewed by SEM, (a) – [67], (b) – [68]. . . . .   | 22 |
| 3.2  | The distribution of particles for isotropic MRE viewed by SEM, (a) – [70], (b) – [68] . . . . .   | 23 |
| 3.3  | SEM micrographs of isotropic MRE with matrix made of silicone rubber and polystyrene: (a) – 0 % of polystyrene, (b) – 5 % of polystyrene, (c) – 10 % of polystyrene, (d) – 20 % of polystyrene [94].                            | 25 |
| 3.4  | SEM microstructure of isotropic MRE with different weight ratio of polyurethane and silicone rubber in matrix: (a) – 0/1, (b) – 1/1, (c) – 2/1, (d) – 1/0 [89]. . . . .   | 26 |
| 3.5  | Needle-shaped particles [99]. . . . .   | 26 |
| 3.6  | MRE containing 10 % (by weight) of spherical and nanowire iron particles [106]. . . . .   | 27 |
| 3.7  | MRE with different content of iron particles: (a) – 5 %, (b) – 15 %, (c) – 27 %, (d) – 35 % [100]. . . . .  | 28 |
| 3.8  | SEM microstructure of MRE without silan – (a) and with silan – (b) [71].  | 28 |
| 3.9  | SEM microstructure of anisotropic MRE containing 33 % of iron particles: (a) – without additional carbon black, (b) – with additional 4 % of carbon black, (c) – with additional 7 % of carbon black [97]. .                    | 29 |
| 3.10 | Microstructures of isotropic MRE samples with silicone rubber matrix, containing 60 % of iron particles with different content of silicone oil (weight percentage): (a) – 0 %, (b) – 10 %, (c) – 20 %, (d) – 30 % [87]. . . . . | 30 |
| 3.11 | SEM microstructure of isotropic MRE without silicon oil – (a) and with silicon oil – (b) [89]. . . . .  | 30 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.12 | Magnetic field induced shear modulus increment of anisotropic MRE without plasticizer – (a) and with 30 – wt – % plasticizer – (b) [107].  | 31 |
| 3.13 | New type of MRE with additional nano-size particles; (a) – process of fabrication, (b) – scheme of typical anisotropic MRE, (c) – scheme of new anisotropic MRE with additional nano-size particles [108]. . . . .                                       | 32 |
| 3.14 | SEM micrographs of MRE fabricated by different way of mixing materials: (a) – polyurethane, silicon rubber and iron particles mixed all together, (b) – at first mixed polyurethane with silicon rubber and than iron particles added [89]. . . . .      | 34 |
| 3.15 | Steps of patterned MRE fabrication [103]. . . . .  | 35 |
| 3.16 | The scheme of MRE specimens shearing. . . . .  | 36 |
| 3.17 | Hysteresis loops presenting force value vs. displacement at different current values at constant displacement amplitude and frequency for isotropic MRE [113]. . . . .   | 38 |
| 3.18 | Hysteresis loops presenting force value vs. displacement at different current values at constant displacement amplitude and frequency for anisotropic MRE [114]. . . . .   | 39 |
| 3.19 | The scheme of MRE specimens in compression. . . . .  | 40 |
| 3.20 | Storage modulus – (a) and loss modulus – (b) versus strain, for frequency 5 Hz [96]. . . . .   | 44 |
| 3.21 | Storage modulus – (a) and loss modulus – (b) for isotropic composites with particles of diameter around 5 $\mu m$ [92]. . . . .  | 44 |
| 3.22 | Storage modulus – (a) and loss modulus – (b) for isotropic composites with particles of diameter around 40 $\mu m$ [92]. . . . .   | 45 |
| 3.23 | The scheme of encapsulated payload module in launch tube with MRE vibration absorber: 1 – launch tube , 2 – MRE vibration absorber, 3 – encapsulated payload module. . . . .   | 47 |
| 3.24 | Car suspension with MRE: (a) – tube with MRE, where: (42) – inner cylinder, (44) – outer cylinder, (48) – MRE, (54) – coil, (b) – front suspension with visible tube with MRE (18) [121]. . . . .  | 48 |
| 3.25 | Steering column with adaptive crash system designed in ThyssenKrupp AG [125]. . . . .  | 50 |
| 3.26 | The scheme of impact energy absorbing system: 1 – base, 2 – elastic cover, 3 – MRE, 4 – coil [126]. . . . .  | 51 |
| 3.27 | Magnetorheological releasable attachment (a) – connected, (b) – disconnected when magnetic field is on [128,129]. . . . .  | 51 |
| 3.28 | Tunable slip yoke damper; (a) – slip yoke assembly (16) with damper assembly (22): 30 – outer housing, 32 – inner housing, 50 – MRE, (b) – view of the drivshaft (12) with slip yoke assembly (16) [131]. . .  | 52 |
| 3.29 | The scheme of tunable damper with MRE: 1 and 2 – Magnetorheological Elastomers, 3 and 4 – masses, 5 – vibrating element, H – magnetic field vector [132]. . . . .  | 53 |
| 3.30 | Cross section of Magnetorheological Damper: (a) – beam configuration, (b) – plate configuration, (c) – example of the system for two-directional vibrations damping; 1 – actuating layer, 2 – MRE, 3 – magnets, H – magnetic field vector [133]. . . . . | 54 |
| 3.31 | The scheme of magneto-active window: 1 – passive layer, 2 – active layer, 3 – MRE, 4 – electro-magnet, 5 – sealing, 6 – wall [82]. . . . .   | 55 |
| 3.32 | The scheme of elastomer-based adaptive panel for sound insulation [139].   | 56 |
| 3.33 | Results of FEM analysis as relation of G module change vs. particles volume fraction [76]. . . . .   | 57 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.34 | Chains of particles in magnetorheological elastomer [80]. . . . .   | 58 |
| 3.35 | (a) – Magnetorheological Elastomer with nano – size particles additive [108]. (b) – Shear model of particles chain [108]. . . . .   | 59 |
| 3.36 | Predicted field – dependent shear modulus for magnetorheological composites with and without nano – size particles additive [108]. . . . .  | 60 |
| 3.37 | The structure of anisotropic magnetorheological elastomer containing particles of different sizes [144]. . . . .  | 60 |
| 3.38 | Mechanical models [147]. . . . .  | 61 |
| 3.39 | Maxwell model [147]. . . . .  | 62 |
| 3.40 | MRE element model [116]. . . . .  | 62 |
| 3.41 | Scheme of mechanical model possessing the field – induced plasticity [148]. . . . .   | 63 |
| 4.1  | The scheme of fixing MRE samples with silicone matrix: 1 – MRE samples, 2 – plate, 3 – electro-magnet, F – force direction. . . . .   | 66 |
| 4.2  | Sample of MRE with silicone matrix used for stretching: (a) – cylindrical specimen, (b) – form for specimen manufacturing . . . . .   | 67 |
| 4.3  | The stand for cylindrical specimens of MRE with silicone matrix manufacturing: 1 – form for specimens with bigger diameter at both ends, 2 – glass form for specimens with constant diameter, 3 – coils, 4 – power supply, 5 – cooling system. . . . .  | 68 |
| 4.4  | The test stand for cylindrical specimens stretching. . . . .  | 68 |
| 4.5  | The scheme of SEBS manufacturing. . . . .   | 70 |
| 4.6  | SEM micrographs of SEBS/PP blends with different content of PP [155]. . . . .   | 71 |
| 4.7  | Iron particles from <i>Höganäs</i> AB; (a) – ASC 300 type, (b) – AT 40.29 type . . . . .  | 72 |
| 4.8  | Particles size distribution of ASC 300. Result from Mastersizer 2000 at Chemistry Department in Wroclaw University of Technology. . . . .   | 73 |
| 4.9  | Brabender used for mixing iron particles with elastomer in high temperature. . . . .  | 75 |
| 4.10 | Te scheme of the form used for MRE specimens manufacturing. . . . .   | 76 |
| 4.11 | Press used in MRE specimens manufacturing process: (a) – for high temperature pressing, (b) – for room temperature pressing. . . . .  | 77 |
| 4.12 | Te scheme of specimens prepared for testing 1 – laminate plates, 2 – specimens. . . . .   | 77 |
| 4.13 | Different types of plates used in MRE specimens investigation: (a) – steel plates, (b) – brass plates, (c) – glass fibre laminate plates. . . . .   | 78 |
| 4.14 | Magnetorheological Composite specimens between special plates with grips 1 – laminate plates, 2 – specimens, 3 – grips. . . . .   | 79 |
| 4.15 | Magnetic circuit; (a) – the scheme, (b) – general view: 1 – magnetic core, 2 – coils, 3 – laminate plates with MRE specimens, 4 – grip made of stainless steel, 5 – Hall probe, 6 – support of the test stand, $\Phi$ – magnetic flux in magnetic core gap. . . . .                                   | 80 |
| 4.16 | Steel grips of MTS testing machine; (a) – both grips with specimen between them, (b) – upper grip. . . . .  | 81 |
| 4.17 | The test stand; (a) – the scheme of the test stand, (b) – general view. 1 – specimens, 2 – MTS force sensor, 3 – additional PCB force sensor, 4 – spacing element made of non-magnetic material, 5 – moving piston, 6 – Hall probe, 7 – support of the test stand, H – magnetic field vector. . . . . | 82 |
| 4.18 | The scheme of the specimen shearing. . . . .  | 83 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.19 | Comparison of hysteresis loops obtained for pure elastomer <i>Téfabloc</i> <sup>®</sup> to elastomer samples filled with iron powders. . . . .  | 86  |
| 4.20 | Values of hysteresis loops areas vs. frequency for different strains, obtained from cyclic shearing of pure elastomer. . . . .  | 87  |
| 4.21 | Hysteresis loops for the material with CD for minimal and maximal values of magnetic field strength. . . . .  | 87  |
| 4.22 | Changes of shear stress amplitude (in percent) in magnetic field vs. amplitude of strain for frequency 1 Hz (selected specimens only). . . .  | 88  |
| 4.23 | Change of hysteresis loop area (in percent) in magnetic field vs. amplitude of strain for frequency 1 Hz (selected specimens only). . . .   | 89  |
| 5.1  | Plasti-Corder Lab-Station ( <a href="http://www.brabender.de">http://www.brabender.de</a> ). . . . .  | 91  |
| 5.2  | Photo of mixer chamber made by Plasti-Corder Lab-Station, where: 1 - inlet, 2 - chamber, 3 - rotors. . . . .  | 92  |
| 5.3  | Plastogram from Ed type sample manufacturing. 1 - adding polymer matrix, 2-3 - adding iron particles, 4 - adding paraffin oil, 5 – end of procedure, removing material from chamber. . . . .  | 92  |
| 5.4  | Sample removed from form and cut to appropriate dimensions. . . . .   | 93  |
| 5.5  | Picture of MRE type Ed structure (taken at Laboratorium Materiałów Zol-Żelowych i Nanotechnologii Politechniki Wrocławskiej). . . . .   | 94  |
| 5.6  | Hysteresis loops for specimen marked as Ed: (a) $\gamma_a=0,025$ and $f=1$ Hz, (b) $\gamma_a=0,025$ and $f=8$ Hz, (c) $\gamma_a=0,125$ and $f=1$ Hz, (d) $\gamma_a=0,125$ and $f=8$ Hz . . . . .  | 95  |
| 5.7  | Hysteresis loops areas vs. frequency for different strain amplitudes and for border values of magnetic field strength, $H_0=0$ kA/m, $H_1=130$ kA/m [166]. . . . .  | 96  |
| 5.8  | Change of hysteresis loop area (in percent) in magnetic field vs. frequency for different strain amplitudes - (a) and change of hysteresis loops vs. strain amplitude for different frequency values - (b) for MRE marked as E [166]. . . . . | 97  |
| 5.9  | Stress amplitude vs. frequency for different strain values and for border values of magnetic field strength [166]. . . . .  | 98  |
| 5.10 | TIRA test 2705 machine with MRE specimen attached during stretching test. . . . .   | 99  |
| 6.1  | Scheme of Kelvin-Voigt model . . . . .  | 102 |
| 6.2  | Hysteresis loop from K-V model with $G'$ i $G''$ parameters described . . . . .   | 105 |
| 6.3  | Graphic representation of Test-1 . . . . .  | 106 |
| 6.4  | Test results - stress value for A2 sample (Test-1) . . . . .  | 106 |
| 6.5  | Hysteresis loops from experiment for different strain amplitudes. Sample Ed2, $H=100$ kA/m. . . . .   | 107 |
| 6.6  | Identification results. Curves for K-V model for different strain amplitude values. . . . .   | 108 |
| 6.7  | Comparison between experimental results and results calculated from the model for selected value of strain amplitude. . . . .   | 108 |
| 6.8  | Identification results. $G$ i $\eta$ parameters values depending on magnetic field for different strain amplitude values. . . . .   | 109 |
| 6.9  | Identification results. $G$ i $\eta$ parameters values depending on strain amplitude for different magnetic field values. . . . .   | 110 |
| 6.10 | Set of hysteresis loops obtained from the model for constant values of parameters: $G = 1.73$ MPa and $\eta = 37.92$ kNs/m <sup>2</sup> . . . . .   | 111 |
| 6.11 | Graphic representation of Test-2. . . . .   | 111 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 6.12 | Identification results. $G$ and $\eta$ parameters values depending on magnetic field strength for constant strain amplitude $\gamma_o = 18.75$ . . . .   | 113 |
| 6.13 | Identification results. Parameters $G$ and $\eta$ values depending on magnetic field strength obtained at constant strain value. . . . .   | 114 |
| 6.14 | Graphic presentation of test programme. . . . .  | 115 |
| 6.15 | Identification results. Parameters $G$ and $\eta$ values depending on strain frequencies for different magnetic field strength values. . . . .   | 116 |
| 6.16 | Identification results. Parameters $G$ and $\eta$ values depending on magnetic field strength values for different strain frequencies. . . . .   | 117 |
| 6.17 | Identification results. Parameter $G''$ values depending on strain frequencies for different magnetic field strength values. . . . .   | 118 |
| 6.18 | Hysteresis loops obtained from experiment for different strain frequency values. Sample Ed5 in 100kA/m. . . . .  | 119 |
| 6.19 | Hysteresis loops calculated from the model for constant values of parameters: $G = 1.73$ MPa and $\eta = 37.92$ kNs/m <sup>2</sup> . . . . .   | 119 |
| 7.1  | The elastic-viscoplastic material model . . . . .  | 122 |
| 7.2  | The elastic-plastic material model with kinematic linear hardening – (a) and exemplary hysteresis loop with indicated characteristic points (b) . . . . .  | 124 |
| 7.3  | Hysteresis loop along with lines approximating loading and unloading curves. . . . .   | 125 |
| 7.4  | Example of $\zeta$ versus $G_2$ parameter graph. . . . .   | 126 |
| 7.5  | Identified model parameters as a function of magnetic field strength at frequency $f = 1Hz$ . . . . .  | 127 |
| 7.6  | Model parameters identification. Comparison between hysteresis loops from testing a) and from model b) for: $H = 50kA/m$ , $f = 1Hz$ . . . .   | 129 |
| 7.7  | Hysteresis loops from testing a) compared to hysteresis loops calculated from the model b) for increasing magnetic strength values. c) - comparison of both types of hysteresis loops for $H = 0kA/m$ , $\gamma_A = 18.75 * 10^{-3}$ , $f = 1Hz$ . . . . . | 130 |
| 7.8  | Model parameters values depending on frequency calculated at strain amplitude $\gamma_a = 18,75$ and for three magnetic field strength values. . .   | 131 |
| 7.9  | Identified model parameters. Comparison between hysteresis loop from testing and calculated from the model for: $H = 0 kA/m$ , $H = 100 kA/m$ , $\gamma_A = 25 * 10^{-3}$ – a) and $\gamma_A = 6.25 * 10^{-3}$ – b). . . . .                               | 133 |

## List of tables

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Main parameters of the <i>Téfabloc</i> <sup>®</sup> TO..222 30A. . . . .   | 70  |
| 4.2 | Chemical composition of carbonyl iron particles used in<br>Magnetorheological Elastomers [95]. . . . .                                   | 73  |
| 4.3 | Chemical composition of specimens. . . . .   | 75  |
| 4.4 | Parameters of additional force sensor (PCB Piezotronics 208C04). . .   | 82  |
| 4.5 | Magnetorheological Elastomer loading programm. . . . .   | 85  |
| 6.1 | Test-1 parameters for strain amplitude influence verification experiment   | 105 |
| 6.2 | Test-2 parameters for magnetic field influence investigation. . . . .  | 111 |
| 6.3 | Test-3 parameters for influence of strain rate investigation. . . . .  | 112 |
| 6.4 | Loss modulus and storage modulus values in literature . . . . .  | 120 |
| 7.1 | Parameters values of linear function $y = A + Bx$ approximating $G_1$ ,<br>$G_2$ and $\tau_{o2}$ versus magnetic field strength. . . . . | 128 |



## Podziękowania

Na koniec chciałbym podziękować wszystkim, dzięki którym mogła powstać ta praca.

Dziękuję:

- ⊗ Mojemu promotorowi, dr. hab. inż. Jerzemu Kalecie, prof. nadzw. PWr. za możliwość pracy z bardzo ciekawymi materiałami.
- ⊗ Dr. Danielowi Lewandowskiemu za bezcenną pomoc na wszystkich etapach pracy.
- ⊗ Dr. Grażynie Ziętek za pomoc w matematycznym opisie.
- ⊗ Dr. Aleksandrze Gasperowicz za pomoc w opracowaniu nowych materiałów.
- ⊗ Mojemu Tacie za motywację do skończenia rozpoczętej pracy.
- ⊗ Wszystkim koleżankom, kolegom i współpracownikom na PWr, którzy pomagali na różnych etapach powstawania tej pracy.

Badania częściowo sfinansowane zostały ze środków Wrocławskiego Centrum Badań EIT+ w ramach realizacji projektu „Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach” – NanoMat (POIG.01.01.02-02-002/08) finansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, Poddziałanie 1.1.2).

The research was partially supported by Wrocław Research Centre EIT+ within the project “The Application of Nanotechnology in Advanced Materials” – NanoMat (POIG.01.01.02-02-002/08) financed by the European Regional Development Fund (Innovative Economy Operational Programme, 1.1.2).

Dziękuję firmom BASF AG, *Höganäs* AB oraz CTS Cousin-Tessier za otrzymane materiały, dzięki którym możliwe było wytworzenie kompozytów magnetoreologicznych.