



Politechnika Wrocławska

Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej

WŁAŚCIWOŚCI TLUMIĄCE KOMPOZYTÓW
MAGNETOREOLOGICZNYCH. BADANIA,
MODELE, IDENTYFIKACJA

mgr inż. Daniel Lewandowski

promotor:

dr hab. inż. Jerzy Kaleta

Wrocław 2005

*Dla rodziców, dzięki którym pomocy
udało mi się tak łatwo przebyć tak
daleką drogę...*

Streszczenie

Głównym celem przyjętym w pracy była identyfikacja właściwości tłumiących wybranej klasy kompozytów magnetoreologicznych¹⁾ w warunkach cyklicznego ścinania. Obiektem badań był kompozyt, którego matrycę tworzyła elastyczna struktura porowata. Pory wypełniono cieczą magnetoreologiczną. Tak rozumiane kompozyty występują w anglojęzycznej literaturze przedmiotu pod nazwą *magnetorheological fluids impregnated solids* lub *magnetorheological foams*. Uzyskano w rezultacie materiał o cechach użytkowych (funkcjonalnych) zbliżonych do cieczy magnetoreologicznych, którego geometrię i wymiary można natomiast w miarę dowolnie kształtować (w przeciwieństwie do samej cieczy). Daje to szansę obniżenia kosztów i poszerzenia możliwości zastosowań tej klasy SMART materiałów.

Dokonano przeglądu materiałów magnetycznych z grupy SMART²⁾. Podjęto autorską próbę klasyfikacji materiałów SMM. Niewielka liczba pozycji literaturowych z zakresu kompozytów była powodem potraktowania cieczy magnetoreologicznych, najbardziej znanych obiektów tej klasy, jako swego rodzaju materiału odniesienia (referencyjnego). Dlatego też obszernie przytoczono prace z zakresu cieczy i zrealizowano szeroki program badań własnych z tego zakresu. Badania literaturowe i prace własne dotyczyły budowy cieczy MR, technologii wytwarzania, metod eksperymentalnych, modeli konstytutywnych, tzw. modeli strukturalnych dla tłumików z cieczami oraz zastosowań cieczy. Omówiono też ferrociecze i elastomery magnetoreologiczne. Na tej podstawie zrealizowano program badań z zakresu kompozytów.

Celem obszernego programu zasadniczych badań eksperymentalnych było wyznaczenie tłumienia w kompozytach. W tym celu wytworzono oryginalny kompozyt o powtarzalnych właściwościach. Skonstruowano stanowisko pomiarowe do badań w warunkach cyklicznego ścinania. Zbudowano system sterowania oraz akwizycji i przetwarzania sygnałów pomiarowych zarówno mechanicznych, jak i magnetycznych. Wykonano podstawową serię badań w warunkach sterowania naprężeniem. Ich celem było określenie wpływu parametrów mechanicznych (częstotliwość, amplituda wymuszenia) oraz magnetycznych (natężenie pola) na charakter i postać energii dyssypacji ΔW jako wielkości charakteryzującej właściwości tłumiące.

¹⁾ ang. *magnetorheological composites*

²⁾ ang. *SMM – SMART magnetic materials*

Modele znane z literatury przedmiotu dla cieczy MR okazały się nieprzydatne. Dlatego też zaproponowano własny, przyjmując, że materiał kompozytu jest ciałem sprężysto-lepkoplastycznym, a dokładniej ciałem lepkosprężystym do granicy plastyczności i lepkoplastycznym powyżej tej granicy. Zbadano możliwości modelu reologicznego, w którym cztery parametry uzależniono od natężenia pola magnetycznego. Wyprowadzono następnie zależności na energię rozproszoną, wydzielając człony związane odpowiednio z właściwościami lepkimi oraz plastycznymi. Symulacje numeryczne modelu pozwoliły na przewidywanie jego zachowania w warunkach granicznych.

Następnie określono procedurę identyfikacji parametrów oraz przeprowadzono kilkustopniową identyfikację właściwą. Za wielkość kryterialną przyjęto energię rozpraszaną w materiale, pole pętli histerezy ΔW . Identyfikację przeprowadzono w zakresie częstotliwości przyszłych zastosowań kompozytu, czyli dla $5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$. Wykazano, iż w tym obszarze model czteroparametrowy można uprościć, gdyż pominąć można wpływ członu zawierającego lepkość. W rezultacie udowodniono, iż trójparametrowy model (sprężysto-plastyczny z liniowym wzmocnieniem kinematycznym) może być efektywnie wykorzystany do sterowania właściwościami tłumiącymi kompozytu magnetoologicznego.

Dodatkowo przeprowadzono identyfikację pełnego modelu czteroparametrowego w przedziale częstotliwości $0,5 \leq f \leq 5 \text{ Hz}$, gdzie eksperymentalnie wykazano wpływ efektów lepkich. Otrzymane wyniki uznano za niezadowalające i sformułowano sugestie co do kierunku dalszych prac.

Rezultaty uzyskane w rozprawie zebrano w formie wniosków i uwag końcowych uporządkowanych w sześciu blokach tematycznych. Prace zakończono sugestiami co do przewidywanych obszarów badań i zastosowań w omawianym obszarze w najbliższych latach. Zasugerowano też kierunki dalszej aktywności własnej zespołu.

Spis treści

Streszczenie	2
Contents	7
1. Wprowadzenie i cel pracy	12
1.1. Materiały SMART	12
1.2. Materiały magnetoreologiczne	12
1.3. Klasyfikacja SMART magnetic materials	13
1.4. Kompozyty magnetoreologiczne. Cel pracy i działania o znaczeniu kluczowym	14
I. Materiały magnetoreologiczne	
2. Ciecze magnetoreologiczne	17
2.1. Wprowadzenie	18
2.1.1. Budowa, mechanizm działania i właściwości cieczy MR . . .	18
2.2. Modele konstytutywne cieczy MR	22
2.2.1. Model Binghama	22
2.2.2. Model Crossa	26
2.2.3. Modele Cassona i Herschela-Bulkleya	27
2.2.4. Model McKinleya	27
2.2.5. Modele mikrostrukturalne i symulacje numeryczne	28
2.3. Zastosowania cieczy magnetoreologicznych	29
2.3.1. Sposoby wykorzystania cieczy MR w urządzeniach	30
2.3.2. Liniowe tłumiki drgań	32
2.3.3. Sprzęgła, hamulce	35
2.3.4. Precyzyjna obróbka ubytkowa powierzchni za pomocą cieczy MR	36
2.3.5. Systemy dotykowe z cieczami MR	38
2.3.6. Struktury SMART z wykorzystaniem liniowych tłumików MR	39
2.4. Modele strukturalne tłumików z cieczami MR	41
2.4.1. Model Binghama dla tłumika z cieczą MR	41
2.4.2. Model Bouc-Wena	42
3. Ciecze ferro	44
3.1. Zastosowania cieczy ferro	44
3.1.1. Uszczelnienia magnetyczne	44
3.1.2. Medyczne zastosowania cieczy ferro	45
3.1.3. Ferrozele	47
4. Kompozyty i elastomery magnetoreologiczne	48
4.1. Budowa kompozytów MR i terminologia	48
4.2. Zastosowania kompozytów MR w tłumikach tarcowych	49
4.2.1. Model tłumika o zmiennym tarcu	49

4.3.	Kompozyty MR; badania na ściskanie	51
4.3.1.	Dwuwarstwowy model dla kompozytu z cieczą magnetoreologiczną	52
4.3.2.	Zastosowania kompozytów MR do absorpcji energii uderzeń	53
4.4.	Elastomery magnetoreologiczne	53
4.4.1.	Zastosowania elastomerów MR	55
II. Badania własne w zakresie cieczy MR		
5.	Badania układów z cieczą magnetoreologiczną	57
5.1.	Stanowisko badawcze	58
5.2.	Rezultaty badań eksperymentalnych	60
5.3.	Opis tłumika RD-1003-5 za pomocą modelu Bingham	63
5.4.	Opis tłumika RD-1003-5 za pomocą modelu Bouc-Wena	65
III. Kompozyty magnetoreologiczne		
6.	Badania eksperymentalne kompozytów magnetoreologicznych	70
6.1.	Materiał	70
6.2.	Próbki do badań	73
6.3.	Stanowisko badawcze, aparatura	74
6.4.	Eksperyment. Badania dla obciążeń cyklicznych	79
6.4.1.	Właściwości tłumiące materiału	81
6.4.2.	Wybrane problemy eksperymentalne	86
7.	Model materiału	88
7.1.	Pole pętli histerezy dla modelu przy sterowaniu odkształceniem	90
7.2.	Identyfikacja parametrów modelu	92
7.2.1.	Identyfikacja – etap I. Główny zakres częstotliwości	93
7.2.1.1.	Model ciała sprężysto-plastycznego z kinematycz- nym wzmocnieniem liniowym	93
7.2.1.2.	Procedura identyfikacji parametrów G_1 i τ_{o2}	95
7.2.1.3.	Wyznaczenie parametru G_2	96
7.2.2.	Identyfikacja – etap II. Zakres niskich częstotliwości, badania wstępne	101
7.2.2.1.	Numeryczne rozwiązanie modelu dla obciążeń cyklicznych	101
7.2.2.2.	Wyznaczenie parametru η	104
8.	Przykład zastosowania kompozytu magnetoreologicznego	108
8.1.	Prototypowa wersja tłumika z kompozytem MR	108
8.2.	Układ pomiarowy i testowy obiekt drgający	110
8.2.1.	Wybór miejsca zamocowania tłumika	111
8.3.	Analiza wpływu oddziaływania tłumika na drgania belki	112
8.3.1.	Tłumienie drgań swobodnych	112
8.3.2.	Wpływ tłumienia na charakterystyki amplitudowo- -częstotliwościowe	114
8.4.	Podsumowanie	116
9.	Wnioski i uwagi końcowe	118
Bibliografia		123
Przewidywane obszary badań i zastosowań. Wskazane kierunki aktywności naukowej zespołu		131

Summary	135
Резюме	137
Kurzfassung	139
List of figures	141
List of tables	145
Podziękowania	146

Contents

Contents	7
1 Introduction and aim of the work	12
1.1 SMART materials	12
1.2 Magnetorheological materials	12
1.3 Classification of SMART magnetic materials	13
1.4 Magnetorheological composites. Aim of the work and crucial activities	14
I Magnetorheological materials	
2 Magnetorheological fluids	17
2.1 Introduction	18
2.1.1 Composition, principle of operation and properties of magnetorheological fluids	18
2.2 Constitutive models of MRF	22
2.2.1 Bingham model	22
2.2.2 Cross model	26
2.2.3 Casson and Herschel-Bulkley models	27
2.2.4 McKinley model	27
2.2.5 Microstructural models and numerical simulations	28
2.3 Applications of magnetorheological fluids	29
2.3.1 Different working modes of magnetorheological fluids	30
2.3.2 Linear dampers	32
2.3.3 Clutches, brakes	35
2.3.4 Magnetorheological finishing	36
2.3.5 Haptic devices based on MRF	38
2.3.6 SMART structures with magnetorheological dampers	39
2.4 Structural models of magnetorheological dampers	41
2.4.1 Bingham model for magnetorheological damper	41
2.4.2 Bouc-Wen model	42
3 Ferrofluids	44
3.1 Applications of ferrofluids	44
3.1.1 Magnetic sealings	44
3.1.2 Medical applications of ferrofluids	45
3.1.3 Ferrogels	47
4 Magnetorheological composites and elastomers	48
4.1 Composition of magnetorheological composites and nomenclature	48
4.2 Applications of magnetorheological composites in variable friction dampers	49
4.2.1 Model of variable friction damper	49

4.3	Magnetorheological composites; testing in squeeze mode	51
4.3.1	‘Two-layer’ model of the magnetorheological composite . .	52
4.3.2	Applications of MRCs for energy absorbing devices	53
4.4	Magnetorheological elastomers	53
4.4.1	Applications of magnetorheological elastomers	55
II MRF’s test performed by the author		
5	Tests of devices with magnetorheological fluids	57
5.1	Test stand	58
5.2	Results	60
5.3	Application of the Bingham model for RD–1003–5 damper modelling	63
5.4	Application of the Bouc-Wen model for RD–1003–5 damper modelling	65
III Magnetorheological composites		
6	Investigations of magnetorheological composites	70
6.1	Material	70
6.2	Specimens	73
6.3	Test stand	74
6.4	Experiment. Tests for cyclic loads	79
6.4.1	Damping properties of magnetorheological composites . . .	81
6.4.2	Selected experimental problems	86
7	Model of the material	88
7.1	Hysteresis loop field for the strain–controlled model	90
7.2	Identification of model parameters	92
7.2.1	Identification first step. Main frequency range	93
7.2.1.1	The elastic-plastic material model with kinematic linear hardening	93
7.2.1.2	Identification procedure for parameters G_1 and τ_{o2}	95
7.2.1.3	Parameter G_2 evaluating	96
7.2.2	Identification second step. Low frequency range, preliminary tests	101
7.2.2.1	Numerical solutions for cyclic loads	101
7.2.2.2	η parameter calculating	104
8	Exemplary application of magnetorheological composites	108
8.1	Prototype damper with magnetorheological composite	108
8.2	Vibrating object and measurement system	110
8.2.1	Selection of the damper placement	111
8.3	Analysis of the damper influence on the beam vibration	112
8.3.1	Free vibrations damping	112
8.3.2	An influence of the damping on the amplitude-frequency characteristics	114
8.4	Summary	116
9	Conclusions and summary considerations	118
9	Forecasting areas of tests and applications. Indicated directions of continuations and development of the research team activity	131
9	Summary	135
9	Резюме	137

9	Kurzfassung	139
	List of figures	141
	List of tables	145

Wykaz ważniejszych oznaczeń, pojęć i skrótów¹⁾

τ	–	naprężenie ścinające
τ_a	–	amplituda sygnału naprężenia
τ_o, τ_{o2}	–	granica plastyczności, graniczne naprężenie ścinające, powyżej którego następuje płynięcie
γ	–	odkształcenie poprzeczne, kąt odkształcenia postaciowego
γ_a	–	amplituda sygnału odkształcenia
η	–	lepkość
η_p	–	lepkość pozorna
ρ	–	gęstość
H	–	natężenie pola magnetycznego
G	–	moduł sprężystości postaciowej, moduł Kirchhoffa
P	–	ciśnienie zewnętrzne
Q	–	natężenie przepływu
U_S	–	napięcie sterujące
I	–	natężenie prądu
ΔW	–	pole pętli histerezy
x	–	przemieszczenie
x_a	–	amplituda sygnału przemieszczenia
v	–	prędkość
f	–	częstotliwość
ω	–	częstość drgań
U_S	–	napięcie sygnału sterującego (do urządzenia Wonder Box)

¹⁾ W pracy wielokrotnie przytoczono równolegle 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.

F	– siła
$F_{\max}$	– maksymalna wartość siły
s_i	– odchylenie standardowe
$s_{\bar{i}}$	– niepewność standardowa, odchylenie standardowe średniej arytmetycznej
r	– współczynnik korelacji
MRF	– skrót od <i>ang. magneto–rheological fluids</i> , ciecze magnetoreologiczne, zwane także zawiesinami magnetoreologicznymi, od <i>ang. magneto–rheological suspensions</i>
MRC	– skrót od <i>ang. magneto–rheological composites</i> , kompozyty magnetoreologiczne
MRE	– skrót od <i>ang. magneto–rheological elastomers</i> , magnetoreologiczne elastomery, gumy
MR	– skrót od słowa magnetoreologiczne
SMART	– określenie grupy materiałów charakteryzujących się właściwościami adaptacyjnymi (alternatywnie również: aktywnymi, inteligentnymi)
SMM	– skrót od <i>ang. SMART magnetic materials</i> , podgrupa materiałów SMART związanych ze zmianą właściwości pod wpływem pola magnetycznego

„W ciągu ostatnich lat świat przechodził przez erę dwóch grup materiałów – tworzyw sztucznych i kompozytów. Pomędzy nimi wyłoniła się nowa era, era materiałów SMART.”¹⁾

1. Wprowadzenie i cel pracy

1.1. Materiały SMART

Terminem *SMART materials* określa się materiały, których specyficzne właściwości ulegają zmianie w następstwie przyłożonych z zewnątrz różnorodnych pól fizycznych. To charakterystyczne i dobrze rozpoznane określenie jest bardzo obszerne, a przez to dość ogólne. Dotyczy bowiem wielu materiałów takich jak ciecze, żele, ciała stałe stymulowane polem elektrycznym, magnetycznym, mechanicznym lub termicznym. Technologia wytwarzania i badania materiałów SMART rozwinęła się szczególnie w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat dzięki odkryciu nowych metod obserwacji, manipulacji i oddziaływań materii w skali mikro i nano.

1.2. Materiały magnetoreologiczne

Mnogość i zróżnicowanie materiałów SMART wymaga dziś już wyróżnienia podgrup (rozbudowanej klasyfikacji) i odpowiedniego nazewnictwa. Dobrze to ilustrują materiały magnetoreologiczne²⁾, których części dotyczy niniejsza praca, stanowiące podgrupę materiałów aktywowanych magnetycznie (czyli SMM³⁾).

Najbardziej znane i rozpowszechnione są ciecze, których właściwości zmieniają się pod wpływem pola magnetycznego. Możemy wyróżnić ciecze magnetoreologiczne MRF⁴⁾ oraz ferrociecze⁵⁾.

Zmiany naprężenia uplastyczniającego odpowiednio przygotowanej mieszaniny, pierwszej cieczy magnetoreologicznej, pod wpływem pola magnetycznego zaobserwowano już ponad 50 lat temu. W skład pierwszych cieczy

¹⁾ „The world has recently undergone two materials ages, the plastic age and the composite age. In the midst of these two ages a new era has developed. This is the SMART materials era.” [57]

²⁾ ang. MR – magneto-rheological

³⁾ ang. SMM – SMART magnetic materials

⁴⁾ ang. MRF – magneto-rheological fluids

⁵⁾ ang. ferrofluids

wchodziły drobne cząsteczki żelaza karbonylkowego o wielkości kilku mikrometrów zawieszone w niemagnetycznej cieczy. W odróżnieniu do cieczy magnetoreologicznych ferrociecze stanowią koloidalny roztwór drobnych cząstek o zdecydowanie mniejszych wymiarach, bo zaledwie od kilku do kilkunastu nanometrów. Nie posiadają one, także granicy plastyczności i wykazują jedynie zmiany lepkości pod wpływem pola magnetycznego.

W następstwie intensywnych prac badawczych prowadzonych w licznych zespołach z powodzeniem wykorzystano cieczy magnetyczne w komercyjnych urządzeniach. Stworzono także całą gamę modeli względnie dobrze opisujących zachowanie MRF w skali makro. Natomiast dużą trudność, ze względu na ograniczone możliwości obserwacji w skali mikro, stanowi lokalny opis zjawiska magnetoreologicznego. Badania eksperymentalne cieczy magnetycznych pozwoliły na rozwój całej podgrupy materiałów, który podział i opis przedstawiono w dalszej części pracy.

1.3. Klasyfikacja SMART magnetic materials

Mnogość materiałów, których właściwości stymulowane są polem magnetycznym, skłoniła autora do podjęcia próby ich klasyfikacji z jednoczesnym przytoczeniem prac, w których są one omawiane. Przegląd nie aspiruje do miana kompletnego, lecz ma jedynie ułatwić dalsze prace nad głównym tematem, którym są kompozyty magnetoreologiczne.

Ponieważ kryterium, według którego zostały zgrupowane materiały SMM, jest bardzo ogólne, grupa ta jest bardzo szeroka i zawiera różnorodne typy materiałów. Podstawową cechą, według której powstał ten podział, było określenie, czy wewnętrzna struktura magnetyczna, uporządkowanie i położenie magnetycznych cząstek materiału ulegają wyraźnej zmianie w czasie jego pracy, czy też są stałe. Wyróżniono zatem:

- materiały o zmiennej strukturze wewnętrznej, w tym:
 - ◊ cieczy magnetoreologiczne [9, 11, 18, 29, 77, 100, 116]
 - ◊ cieczy ferro [96],
 - ◊ kompozyty na bazie cieczy ferro [90],
 - ◊ żele magnetoreologiczne [75, 121],
 - ◊ smary magnetyczne [85],
 - ◊ kompozyty magnetoreologiczne (gąbki magnetoreologiczne), elastyczne materiały porowate wypełniane cieczami magnetycznymi [11, 16, 17],

- materiały o ustalonej strukturze wewnętrznej, w tym:
 - ◊ magnetoreologiczne elastomery i gumy [11, 62, 63, 77],
 - ◊ materiały o gigantycznej magnetostrykcji [6, 23],
 - ◊ magnetostrykcyjne elastomery (elastomery wypełnione magnetostrykcyjnymi proszkami) [28],
 - ◊ ferromagnetyczne materiały z pamięcią kształtu,
 - ◊ materiały magnetokalorymetyczne.

1.4. Kompozyty magnetoreologiczne. Cel pracy i działania o znaczeniu kluczowym

Za obiekt badań przyjęto wieloskładnikowy materiał nazwany kompozytem magnetoreologicznym lub oznaczony krótko jako MRC¹⁾. Termin ten oznaczał w pracy porowatą elastyczną strukturę nasyconą cieczą magnetoreologiczną.

Stworzono w ten sposób możliwość swobodnego kształtowania geometrii materiału, czego nie zapewnia sama ciecz magnetoreologiczna wymagająca zewnętrznych barier lub naczyń przeciwdziałających grawitacji. Kompozyt zapewnił również dużą dowolność i łatwość w jego zewnętrznym obciążaniu.

Dokładniej budowę kompozytów MR²⁾ oraz stosowaną do ich opisu terminologię omówiono w części 4. Z kolei w rozdziale 6.1 szczegółowo zaprezentowano technologię wytwarzania i budowę kompozytu poddanego badaniom.

Podejmując zagadnienie tłumienia w tej klasie kompozytów MRC, przeprowadzono analizę literatury przedmiotu w celu sprawdzenia stanu wiedzy na tym obszarze oraz aktualności naukowej i aplikacyjnej tematu, co stanowiłoby bazę do sformułowania tezy, celów oraz zadań szczegółowych.

Jedne z pierwszych informacji o właściwościach i zastosowaniach kompozytów magnetoreologicznych można odnaleźć w pracach [10, 11]. Zaprezentowane zostały tam prototypowe urządzenia – półaktywne tłumiki drgań, w których wykorzystano gąbki nasycone cieczą magnetoreologiczną. Zasada funkcjonowania tłumików polegała na uzyskaniu uzależnionej od wartości natężenia pola magnetycznego siły tarcia występującej pomiędzy wolną powierzchnią kompozytu zamocowanego na stałe do przesuwnej części tłumika a powierzchnią oporową nieruchomej jego części. Stąd wywodzi się nazwa jednego z zaprezentowanych w tym artykule urządzeń – tłumik o zmiennym

¹⁾ ang. *MRC – magneto-rheological composite*

²⁾ MR – zamiennie używany przez autora w pracy skrót pochodzący od słów magnetoreologiczne.

tarcia¹⁾. Niestety, zaprezentowany opis tłumika wykorzystującego kompozyt magnetoreologiczny ogranicza się jedynie do najprostszego modelu i charakterystyki urządzenia przydatnej jedynie do jego zastosowania. Pominięte zostały całkowicie informacje związane z charakterystyką samego materiału oraz uwzględniające stan jego odkształcenia. Innym obszarem badawczym są akustyczne i elektromagnetyczne własności gąbek nasycanych cieczami MR, czemu poświęcono pracę [98].

Z literatury przedmiotu autorowi znana jest jeszcze tylko jedna praca [17] poświęcona ściśle badaniom właściwości magnetomechanicznych kompozytów magnetoreologicznych, która porusza tę tematykę dogłębniej, także z uwzględnieniem aspektu charakterystyki i modelu materiału. Praca obejmuje obszar badania, modelowania i zastosowań kompozytów magnetoreologicznych w stanie ściskania. Można tam odnaleźć kompleksowe rezultaty badań różnego typu kompozytów magnetoreologicznych nazywanych *ang. field responsive fluid-impregnated cellular solids* oraz złożony model materiału uwzględniający wiele fizycznych parametrów matrycy (tzw. mikroparametry) oraz cieczy magnetoreologicznej. Bardzo interesująca wydaje się część pracy poświęcona zastosowaniu badanych kompozytów jako aktywnych materiałów tłumiących w przemyśle samochodowym.

Mając na uwadze powyższy stan wiedzy, przyjęto iż **głównym celem pracy** jest identyfikacja tłumienia w wybranych kompozytach magnetoreologicznych w warunkach cyklicznego obciążenia ścinającego.

Sformułowano jednocześnie tezę, że właściwości materiału obciążanego cyklicznie w warunkach ścinania można opisać w ogólności, używając do tego celu czteroparametrowego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego, którego parametry są funkcjami natężenia pola magnetycznego.

Za kluczowe uznano:

- opanowanie technologii wytwarzania kompozytów,
- opracowanie metody pomiarów własności tłumiących w warunkach zmiennych wartości parametrów mechanicznych i magnetycznych,
- opracowanie modelu konstytutywnego,
- identyfikację parametrów modelu,
- wytworzenie półaktywnego tłumika z kompozytem MR i pokazanie przykładu jego efektywnego zastosowania w tłumieniu drgań konstrukcji.

Zagadnienia te rozpatrywane będą sukcesywnie w pracy.

¹⁾ *ang. variable friction damper*

Część I

Materiały magnetoreologiczne

2. Ciecze magnetoreologiczne

Głównym składnikiem badanych kompozytów, decydującym o cechach SMART tej grupy materiałów, jest ciecz magnetoreologiczna. Ciecz ta jest obiektem badanym już od półwiecza, a literatura przedmiotu obejmuje liczne pozycje. Z zupełnie innym stanem wiedzy mamy do czynienia w przypadku kompozytów powstałych na bazie cieczy MR. Studia literaturowe podjęte przez autora pozwoliły na znalezienie jedynie kilku pozycji z tej tematyki. Brak jest prac przeglądowych z tego zakresu; nie ma żadnej monografii. W najnowszym kompendium z zakresu materiałów SMART [99] wspomina się jedynie o takiej klasie kompozytów, lecz bliżej ich nie omawia. Afiliacja autorów prac z zakresu kompozytów jest charakterystyczna – są to prawie wyłącznie prace z USA, z czego w jednym przypadku jest to renomowana firma LORD, a w drugim MIT¹⁾.

Nieznacznie większa jest liczba prac z zakresu elastomerów magnetoreologicznych – kilka pozycji, szczególnie o tych zawierających proszki z materiałów o gigantycznej magnetostrykcji.

Podjęcie zatem zagadnienia tłumienia w kompozytach magnetoreologicznych na bazie cieczy MR jest nadal przedsięwzięciem należącym do nielicznych. Brak materiałów porównawczych z zakresu kompozytów zmusił autora do gruntownego zapoznania się z dorobkiem publikacyjnym oraz podjęciem własnych badań z zakresu samych cieczy magnetoreologicznych. Ciecze MR przyjęto zatem jako swoisty materiał referencyjny. Dlatego też uznano za konieczne zapoznanie się z ich budową, technologią wytwarzania, metodami eksperymentalnymi, modelami konstytutywnymi, tzw. modelami strukturalnymi dla tłumików z cieczami oraz przykładami zastosowań cieczy. Opanowanie tak rozumianych podstaw dawało szansę możliwie kompetentnego podjęcia zagadnienia tłumienia w przypadku kompozytów.

Mając na uwadze powyższe, rozważono w tym rozdziale oraz w dalszych częściach pracy wymienione uprzednio aspekty związane z cieczami magnetoreologicznymi.

¹⁾ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

2.1. Wprowadzenie

Ciecze magnetoreologiczne są materiałem znanym już od ponad 50 lat. Ich odkrycie i pierwsze wykorzystanie przypisywane jest osobie Jacoba Rabinowa [93]. Charakteryzują się one zmianą właściwości fizycznych pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. W tak zwanym stanie „wyłączonym”¹⁾, przy braku oddziaływania z zewnątrz, ich charakter podobny jest do znanych materiałów, np. płynnych farb (lepkość pozostaje na poziomie $0,1 - 10 \text{ Pa s}$ [100]). Sytuacja zmienia się diametralnie w momencie, gdy pojawia się pole magnetyczne. W ciągu kilku milisekund wyraźnie widoczny staje się przyrost lepkości pozornej oraz występuje graniczna wartość naprężenia, poniżej której materiał zachowuje się sprężysto. Dla zewnętrznego obserwatora wygląda to tak, jakby nastąpiła zmiana cieczy w ciało stałe. Efekt ten jest niemal natychmiastowy i całkowicie odwracalny. Zależność lepkości od wartości natężenia pola magnetycznego pozwala na sterowanie właściwościami cieczy MR i to dzięki temu zalicza się je do grupy materiałów SMART.

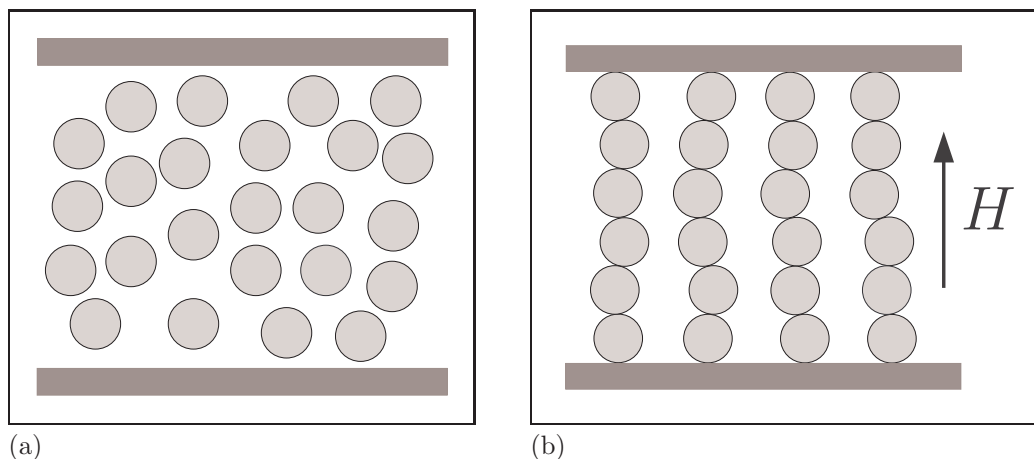
2.1.1. Budowa, mechanizm działania i właściwości cieczy MR

Budowa typowej cieczy MR od czasów jej wynalezienia nie uległa zasadniczym zmianom. Jest ona złożona z dwóch głównych składników: cząstek materiału magnetycznie miękkiego o kształcie zbliżonym do kulistego i średnicy $0,1 - 10 \mu\text{m}$ oraz cieczy nośnej o małej lepkości. Pierwsze ciecze MR, z jakich korzystał, Rabinow zawierały, w proporcjach wagowych 9 do 1, proszek żelaza karbonylowego oraz jako ciecz nośną – olej silikonowy, naftę lub ropę naftową [9]. Tak powstała mieszanina charakteryzuje się bardzo interesującymi właściwościami zależnymi od pola magnetycznego – zmianą lepkości pozornej oraz występowaniem granicy plastyczności. Wyjaśnienie tych zjawisk oparte jest na opisie wewnętrznych oddziaływań między cząstkami magnetycznymi.

Uprozczone wyobrażenie o tym, co może dziać się w cieczy MR, zaprezentowano na rysunku 2.1. W stanie wyłączonym (rysunek 2.1a) cząstki magnetyczne, przedstawione w postaci szarych kulek, mogą poruszać się dość swobodnie, będąc zawieszonymi w cieczy. Największy wpływ na ich zachowanie mają: lepkość cieczy nośnej, siły grawitacji oraz siły Van der Waalsa [100]. Umieszczenie cieczy MR w polu magnetycznym powoduje powstanie dipola

¹⁾ ang. *off-state*

w każdej magnetycznej cząstce, a następnie ich wzajemne przyciąganie się i łączenie. Efektem końcowym jest utworzenie łańcuchów cząstek wzdłuż linii sił pola magnetycznego (rys. 2.1b). Rozerwanie, zniszczenie tak usieciowanej struktury wymaga przyłożenia dodatkowych sił, które na zewnątrz w skali makro można obserwować jako wzrost lepkości pozornej.



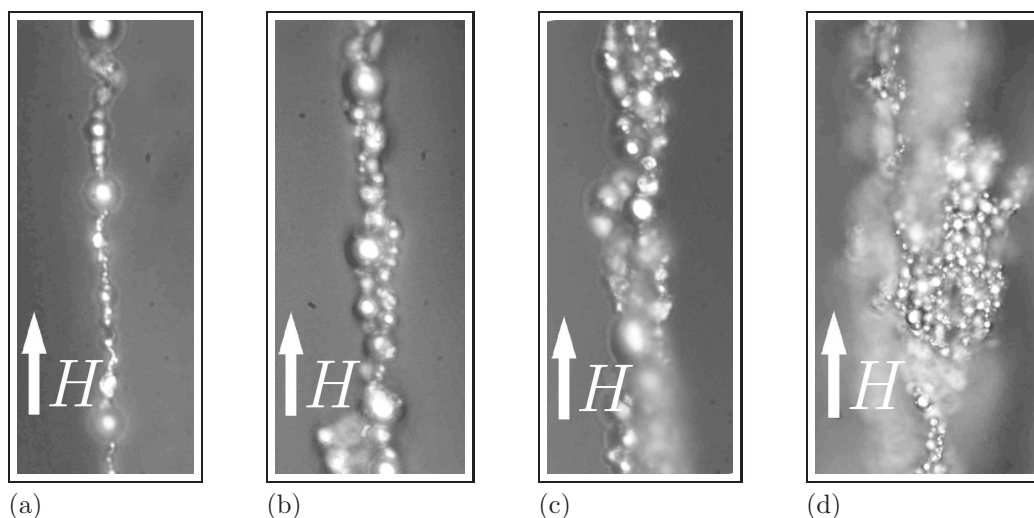
Rysunek 2.1. Schematyczne przedstawienie zachowania się magnetycznych cząstek cieczy magnetoreologicznej: (a) – bez pola magnetycznego oraz (b) – z polem (kierunek wektora H)

Proces wzajemnego łączenia i układania się cząstek magnetycznych jest odwracalny. Powrót do stanu wyjściowego wymaga zaniku zewnętrznego pola. Całkowite usunięcie oddziaływań między cząstkami wymaga wykorzystania do ich budowy materiału miękkiego magnetycznie, o małym polu koercji.

Opierając się na schemacie drobnych cząstek powiązanych w łańcuchy, można wytłumaczyć także dwustopniowe, nieliniowe zachowanie się cieczy MR w obecności pola magnetycznego. Zakłada się, iż istnieje pewna graniczna wartość naprężenia, poniżej której nie następuje rozrywanie łańcuchów. Usieciowana struktura będzie zachowywała się w tym zakresie jak ciało stałe. Jednak powyżej tej wartości, nazywanej granicą płynięcia lub plastyczności τ_o , nastąpi zniszczenie pierwotnie powstałych układów. Materiał zacznie płynąć, ale wciąż obecne zewnętrzne pole będzie wywoływało siły pomiędzy poruszającymi się cząsteczkami. Przemieszczenie cieczy będzie wymagało pokonania tych sił i będzie uzależnione od wartości natężenia pola.

Struktury łańcuchów pokazane na rysunku 2.1b są jedynie uproszczeniem tego, co naprawdę dzieje się w cieczy MR. W rzeczywistości wygląda to zdecydowanie bardziej skomplikowanie. Potwierdzeniem tego są zdjęcia uzyskane przez autora. Na rysunkach 2.2a–d zaprezentowane zostały rzeczywiste

struktury, jakie tworzą cząstki żelaza karbonylkowego o średnicy kilku μm , pod wpływem pola magnetycznego. Pokazane struktury różnią się budową



Rysunek 2.2. Struktury rzeczywiste, jakie tworzą cząsteczki żelaza karbonylkowego w cieczy MR pod wpływem pola magnetycznego. Zdjęcia wykonane przy powiększeniu x2000 na mikroskopie świetlnym [badania własne, niepublikowane]

jak i stopniem skomplikowania, od łańcuchów po duże skupiska (klastry). Uzależnione jest to od właściwości cząstek oraz ich procentowej zawartości w cieczy. Jako najważniejszy składnik cieczy MR, struktury te będą miały kluczowy wpływ na jej właściwości. Główne ich parametry to kształt, rozmiar, gęstość, nasycenie magnetyczne i pole koercji. Najczęściej stosowanym obecnie materiałem do wytwarzania magnetycznego składnika cieczy MR jest wysokiej czystości proszek żelaza, otrzymywany z rozkładu związku $Fe(CO)_5$, zwany żelazem karbonylkowym¹⁾ [3].

Wykorzystywane obecnie cieczy magnetoreologiczne, poza cieczą nośną i składnikiem magnetycznym, zawierają cały szereg dodatkowych substancji. Dodawane są np. środki powierzchniowo czynne, pokrywające cząstki magnetyczne w celu zapobieżenia ich aglomeracji, dodatki antykorozyjne oraz środki zapobiegające zjawisku sedymentacji. Wszystkie te składniki wraz z cieczą nośną decydują o łącznych właściwościach cieczy MR oraz jej ewentualnej przydatności dla określonych zastosowań.

Istnieje wiele rodzajów cieczy magnetoreologicznych różniących się budową i składem. Sporo rozwiązań chronionych jest też patentami (np. *US Patents*: 5505880, 5906767, 6203717, 6787058, 6824700), a kilka typów sprzedawanych jest komercyjnie, np.: MRF-132AD [68], MRF-336AG [72],

¹⁾ ang. CIP – carbonyl iron powder

MRF-241ES [67]. Producentem tych cieczy, a jednocześnie światowym potentatem w tej dziedzinie, jest amerykańska firma LORD.

Ciecze magnetoreologiczne przeznaczone do zastosowań profesjonalnych (komercyjne urządzenia i produkty) muszą charakteryzować się całym szeregiem określonych właściwości. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: małą lepkość przy braku pola magnetycznego, wysoką granicę plastyczności w warunkach oddziaływania pola magnetycznego (szczególnie dla obciążeń zmiennych), krótki czas reakcji, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur, zminimalizowany efekt sedymentacji, a w przypadku jego wystąpienia – łatwość rozmieszania i ponownego ujednorodnienia. W tabeli 2.1 zamieszczone zostały podstawowe własności spotykanych cieczy MR oraz ich składników.

Tabela 2.1. Najczęściej spotykane składniki i właściwości cieczy magnetoreologicznych stosowanych do budowy mechanicznych urządzeń, takich jak tłumiki drgań, sprzęgła [76]

Składnik cieczy MR	Rodzaj materiału
Cząstki magnetyczne	żelazo, ferryty, stop żelazo-kobalt
Ciecz nośna	oleje: mineralny, syntetyczny, półsyntetyczny, węglowodorowy, silikonowy oraz woda
Parametr	Wartość
Kształt i wielkość magnetycznych cząstek	zbliżony do kulistego, o średnicy $0,1 - 10 \mu m$
Zawartość cząstek w cieczy	$\approx 80 \%$ wagowo
Gęstość	$3 - 4 g/cm^3$
Temperatura pracy	od -40 do $+150 ^\circ C$ (zależna od cieczy nośnej)
Przewodność cieplna	$0,2 - 3,6 W/m^\circ C$
Lepkość przy braku pola	$0,1 - 10 Pa \cdot s$ (dla niskich prędkości ścinania)
Maksymalne pole magnetyczne	$250 kA/m$ (ograniczenie nasyceniem)
Maksymalne naprężenie, granica płynięcia	$50 - 250 kPa$
Maksymalna gęstość energii	$0,1 J/cm^3$
Czas reakcji	poniżej $10 ms$

Wśród materiałów z grupy SMART znane są także ciecze elektoreologiczne. Efekt zmiany lepkości i sposób ich funkcjonowania jest podobny do cieczy MR, z tą różnicą, iż polem aktywującym oddziaływania cząstek jest pole elektryczne. Ze względu na odmienne mechanizmy powstawania zjawiska, technologie otrzymywania cieczy i ich charakterystyki nie będą omawiane w niniejszej pracy.

2.2. Modele konstytutywne cieczy MR

Ciecze magnetoreologiczne ze względu na swoje specyficzne właściwości wymagają wprowadzenia nowej grupy modeli konstytutywnych. Szczególnie trudne wydaje się opisanie materiału, który w bardzo krótkim czasie może zamiennie wykazywać cechy ciała stałego oraz cieczy. Modele wykorzystywane do opisu uogólnionych cieczy niutonowskich nie są wystarczające, ponieważ nie potrafią odwzorować nieliniowych zależności wynikających z wpływu zewnętrznego pola magnetycznego.

2.2.1. Model Binghama

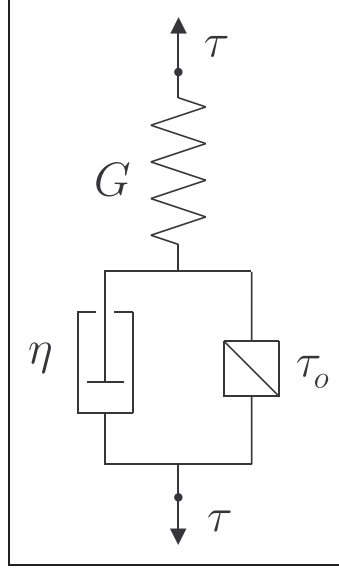
Najczęściej spotykanym w literaturze przedmiotu modelem do opisu właściwości cieczy i materiałów magnetoreologicznych jest model Binghama [11, 100]. Należy on do grupy modeli odcinkowo-liniowych powstałych z połączenia elementów sprężystych, lepkich oraz sztywno-plastycznych.

Model ciała Binghama, w swojej podstawowej formie [104] opisuje właściwości materiału sprężysto/lepkoplastycznego, którego charakterystykę podzielić można wyraźnie na dwa obszary rozdzielone granicą plastyczności τ_o . Odpowiednio równania dla tego modelu można zapisać następująco:

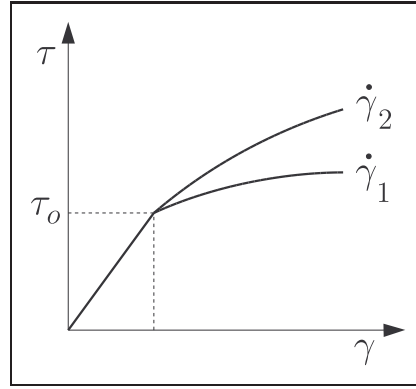
$$\tau = G\gamma \quad \text{dla} \quad \tau < \tau_o, \quad (2.1)$$

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_o \quad \text{dla} \quad \tau \geq \tau_o, \quad (2.2)$$

gdzie oznaczone zostały odpowiednio: G – moduł Kirchhoffa, τ – naprężenie, η – lepkość, γ – odkształcenie. Model reologiczny, stanowiący graficzną reprezentację równań (2.1) i (2.2), przedstawiono na rysunku 2.3. Granica plastyczności, oznaczona przez τ_o , określa punkt, powyżej którego w materiale zaczynają występować odkształcenia plastyczne oraz efekty lepkie. Jak pokazano na rysunku 2.4, zachowanie się materiału Binghama, dla dwóch różnych wartości prędkości ($\dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$) poniżej τ_o jest identyczne. Efekty lepkie występujące w materiale opisywane są – jak dla typowej cieczy Newtona –



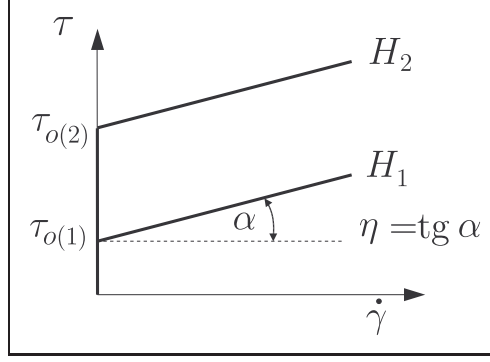
Rysunek 2.3. Model reologiczny dla ciała Bingham



Rysunek 2.4. Charakterystyka $\tau(\gamma)$ materiału Bingham dla dwóch prędkości odkształcania $\dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$

za pomocą parametru lepkości η widocznego na charakterystyce $\tau(\dot{\gamma})$ jako nachylenie górnej części przebiegu (rysunek 2.5).

W przypadku cieczy magnetoreologicznych τ_0 staje się funkcją oddziałującego na nią pola magnetycznego. Wpływ natężenia pola magnetycznego H na zmianę parametru τ_0 pokazano na rysunku 2.5. Dla wartości pola magnetycznego $H_2 > H_1$ następuje przesunięcie granicy plastyczności w górę, czyli $\tau_{o(2)} > \tau_{o(1)}$. Jak pokazują badania eksperymentalne [67, 68, 72, 100], zależność τ_0 od H dla dostępnych typów cieczy MR jest w pewnym zakresie liniowa. Załamanie charakterystyki pojawia się dopiero dla wartości pola magnetycznego ($H > 100 - 150 \text{ kA/m}$) i związanego z tym zjawiska nasycenia.

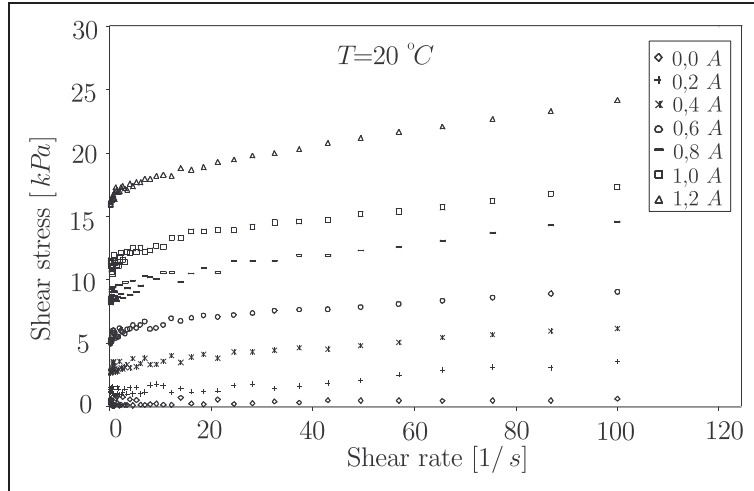


Rysunek 2.5. Charakterystyka $\tau(\dot{\gamma})$ materiału Binghama poszerzona o zależność $\tau_o(H)$ jak dla cieczy magnetoreologicznej. Pokazane dwa przebiegi dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego $H_2 > H_1$

Ponieważ ciecz magnetoreologiczna, po przyłożeniu pola magnetycznego, przestaje wykazywać cechy zbliżone do cieczy niutonskiej, do jej opisu wykorzystuje się parametr lepkości pozornej obliczanej następująco:

$$\eta_p = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (2.3)$$

Model Binghama w sposób uproszczony pozwala opisać podstawowe właściwości cieczy magnetoreologicznych. Dla jego porównania z rzeczywistością, na rysunku 2.6 zostały przedstawione eksperymentalne [114] charakterystyki cieczy magnetoreologicznej typu MRF-132LD [68]. Wyraźnie widoczna jest liniowa część charakterystyki, dobrze opisywana przez model Binghama.



Rysunek 2.6. Wykres eksperymentalnych zależności, dla cieczy MRF-132LD, naprężenia ścinającego (*ang. shear stress*) od szybkości ścinania (*ang. shear rate*) dla kolejnych narastających wartości natężenia prądu (w cewkach wytwarzających pole magnetyczne) [114]

Zachowanie cieczy magnetoreologicznych, jako skomplikowanych układów fizycznych, charakteryzuje się występowaniem różnego rodzaju nieliniowych

zjawisk. Model Binghama, będąc dużym uproszczeniem, nie jest w stanie ich wszystkich opisać. Najważniejsze różnice pomiędzy rzeczywistością a modelem dotyczą nieniutonowskich właściwości cieczy MR. Dodatkową komplikacją i utrudnieniem jest wpływ pola magnetycznego, które może powodować zmiany wielu parametrów modelu, także w sposób nieliniowy. Badania eksperymentalne cieczy [118] wykazują nieliniową zależność lepkości pozornej od natężenia pola magnetycznego i prędkości odkształcania.

W przypadku badań cyklicznych cieczy MR wyraźnie widoczne stają się ich lepkosprężyste właściwości poniżej granicy plastyczności τ_o . Model Binghama – w swej podstawowej wersji [104] – nie uwzględnia jednak tych zachowań. Moduł G we wzorze (2.1) przyjmuje stałą wartość określającą wyłącznie sprężyste właściwości materiału poniżej τ_o . Aby uwzględnić zmiany obserwowane w czasie badań, wprowadzono opis stosowany w liniowych ośrodkach lepkosprężystych, takich jak np. polimery [32,115]. Zamiennie stosuje się wówczas kinetyczny moduł materiałowy oznaczony jako G^* . Dla obciążeń o charakterze harmonicznym, gdy naprężenie możemy wyrazić jako $\tau = \tau_a \sin(\omega t)$ oraz odkształcenie $\gamma = \gamma_a \cos(\omega t - \delta)$, równanie (2.1) zostaje zmodyfikowane do postaci:

$$\tau = G^* \gamma , \quad (2.4)$$

gdzie G^* , jako liczba zespolona, zdefiniowana jest następująco:

$$G^* = G' + iG'' . \quad (2.5)$$

Składową rzeczywistą G' nazywa się modułem zachowawczym, składową urojoną G'' nazywa się z kolei modułem stratności. Obie wartości obliczane są w następujący sposób:

$$G' = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \cos \delta , \quad (2.6)$$

$$G'' = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \sin \delta . \quad (2.7)$$

W powyższych wzorach oznaczone zostały odpowiednio: τ_a – amplituda naprężenia, γ_a – amplituda odkształcenia oraz δ – przesunięcie kątowe pomiędzy sygnałami naprężenia i odkształcenia lub kąt strat. Jeżeli moduł G^* będzie reprezentował właściwości materiału idealnie sprężystego, to wartość δ będzie równała się zero. Odpowiednio dla materiału idealnie lepkiego $\delta = \pi/2$. Miarą zdolności materiału do dyssypacji energii (tłumienia) jest stosunek obu modułów zwany współczynnikiem tłumienia :

$$\text{tg } \delta = \frac{G''}{G'} . \quad (2.8)$$

W przypadku niektórych materiałów, także cieczy magnetoreologicznych, otrzymane z badań cyklicznych przebiegi naprężenia i odkształcenia tracą charakter „czystej”¹⁾ funkcji sinusoidalnej. Związane jest to z utratą przez materiał liniowych właściwości lepkosprężystych. Pojawiające się zniekształcenia uniemożliwiają wyznaczenie w prosty sposób wartości kąta przesunięcia między sygnałami δ . Z tego powodu stosuje się metodę filtracji sygnałów opartą na analizie Fouriera [18]. Celem jej jest pozostawienie z sygnału rzeczywistego jedynie wiodącej składowej harmonicznej. Dopiero na podstawie w ten sposób przetworzonych przebiegów wyznaczone zostają wartości δ , G' oraz G'' . O złożoności i skomplikowanym charakterze cieczy MR może świadczyć to, iż moduł G^* , jak zdefiniowany powyżej, może być funkcją pola magnetycznego, prędkości odkształcania i temperatury [14, 83, 114].

Model Bingham, w swojej podstawowej formie, mimo ograniczeń wskazanych powyżej, jest z powodzeniem wykorzystywany do projektowania urządzeń z cieczami magnetoreologicznymi [64]. Łatwość interpretacji i przyjęte uproszczenia pozwalają na wygodny opis zjawiska magnetoreologicznego. Interpretacja w układzie siła–przesunięcie ($F - x$) w tłumiku z cieczą MR może służyć do opisu jego charakterystyki [106]. Modele strukturalne stosowane do opisu urządzeń z cieczami MR zostaną zaprezentowane kolejno w rozdziale 2.4.1.

2.2.2. Model Crossa

Zaletą modelu Bingham jest prostota i łatwość opisu. Jednak jego zgodność z rzeczywistością ogranicza się tylko dla pewnego obszaru, co trzeba brać pod uwagę podczas jego stosowania. Nie jest on poprawny i nie odzwierciedla dobrze zachowania się cieczy magnetoreologicznych w przypadku prędkości odkształcania poniżej 10 s^{-1} , jak to można zauważyć na rysunku 2.6. Dla niskich wartości $\dot{\gamma}$ charakterystyka przestaje być liniowa, a punkt granicy plastyczności wręcz zanika. Uwzględnienie tego zjawiska wymaga zastosowania odrębnego modelu.

Przykład tego typu opisu można odnaleźć w pracy [14]. Dla niewielkich prędkości odkształcania wprowadzony został model Crossa, zdefiniowany w sposób następujący:

$$\tau = \left[\eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \lambda \dot{\gamma}} \right] \dot{\gamma}, \quad (2.9)$$

¹⁾ Pojawienie się wyższych składowych harmonicznych.

gdzie odpowiednio zostały oznaczone: η_0 – lepkość dla małych i η_∞ – lepkość dla dużych prędkości odkształcania.

2.2.3. Modele Cassona i Herschela-Bulkleya

Wśród nieliniowych efektów, jakie obserwuje się w cieczach MR, ważną rolę odgrywa między innymi spadek lepkości cieczy wraz ze wzrostem szybkości ścinania¹⁾. Jest to zjawisko, które w pewnych przypadkach, dla wąskiego zakresu prędkości, może zostać pominięte. Model Bingham’a jest wtedy wystarczającym przybliżeniem opisu i zastosowań cieczy magnetoreologicznych [64]. Jednak w przypadkach przepływu cieczy z dużymi prędkościami przez otwory o niewielkich rozmiarach [20] wymagana jest bardziej dokładna znajomość zachodzących zjawisk.

W literaturze zjawisko spadku lepkości cieczy wraz ze wzrostem szybkości ścinania dla cieczy magnetoreologicznych jest opisywane z wykorzystaniem modeli takich jak Cassona oraz Herschela-Bulkleya [14,59,112]. Są one podobne do modelu Bingham’a, z tym, że – w odróżnieniu od niego – uwzględniają szereg nieniutonowskich właściwości. Biorą one pod uwagę zmiany kształtu przebiegu funkcji naprężenia od prędkości ścinania.

Model Cassona stosowany był pierwotnie do opisu reologicznych właściwości krwi, która traktowana jako zawiesina komórek ciała stałego, może przez analogię być porównywana do cieczy magnetoreologicznej. Wzór opisujący model Cassona przedstawia się następująco:

$$\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_o^{\frac{1}{2}} + (\eta\dot{\gamma})^{\frac{1}{2}}. \quad (2.10)$$

Dla modelu Herschela-Bulkleya równanie opisujące występuje w postaci:

$$\tau = \tau_o + (C\dot{\gamma})^p, \quad (2.11)$$

gdzie p oznacza dodatni współczynnik, a C nazywane jest parametrem zgodności²⁾, podobnym do parametru lepkości [14].

2.2.4. Model McKinleya

Interesujący model opisu cieczy magnetoreologicznych – dla cyklicznych odkształceń ścinających o dużych amplitudach³⁾ – zaprezentowano w pracy [18]. Autorzy, negując możliwość opisu lepkośćprężystych właściwości badanych cieczy MR dla odkształceń cyklicznych z pomocą znanych modeli,

¹⁾ *ang. shear thinning*

²⁾ *ang. consistency*

³⁾ *ang. LAOS – large amplitude oscillatory shear*

bazujących na uogólnionych cieczach niutonowskich, przedstawili własne rozwiązanie. Zaproponowano nieliniowy, sprężysto-lepkoplastyczny model konstytutywny, którego równanie płynięcia przedstawia się w następujący sposób:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{t_1 G} [\tau - G\Delta(t)] , \quad (2.12)$$

gdzie t_1 – czas relaksacji. W równaniu tym występuje dodatkowy parametr wewnętrzny $\Delta(t)$, który według autorów może być wyznaczony na podstawie analizy kinetyki procesu. Jego równanie ewolucji przedstawia się następująco:

$$\dot{\Delta} = \dot{\gamma} \left[1 - \frac{G\tau}{\tau_o^2} \Delta(t) \right] , \quad (2.13)$$

gdzie τ_o – granica plastyczności wyznaczona z wstępnych badań. Zaproponowany model dość dobrze odzwierciedla wyniki eksperymentalne, jakkolwiek autorzy nie podają zależności jego parametrów od pola magnetycznego oraz interpretacji fizycznej parametru wewnętrznego Δ .

2.2.5. Modele mikrostrukturalne i symulacje numeryczne

Opis cieczy magnetoreologicznych za pomocą modeli przedstawionych w poprzednich rozdziałach (Binghama, Cassona, McKinleya, Herschela-Bulkleya) nie uwzględnia parametrów związanych z budową wewnętrzną. Współczynniki występujące w tych równaniach nie mają interpretacji fizycznej i konkretnego odniesienia do oddziaływań w skali mikro. Tego typu podejście spotykane jest często dla ośrodków, których budowa w skali mikro jest bardzo skomplikowana, np. polimerów [115].

W przypadku cieczy MR znane są główne właściwości fizyczne jej poszczególnych składników oraz sposób i proporcje ich połączenia. Stwarza to możliwości budowy modeli, których równania wyprowadzane są z poziomu oddziaływań między poszczególnymi cząstkami cieczy. Rozwiązanie tych zagadnień dokonywane jest z wykorzystaniem technik symulacji komputerowych. Mimo zaawansowanej techniki obliczeniowej do rozwiązania układu wymagane jest przyjęcie pewnych założeń i uproszczeń, np. ze względu na ilość cząsteczek, których liczba w 1 milimetrze sześciennym typowej¹⁾ cieczy magnetoreologicznej może sięgać $\sim 12 * 10^6$.

Symulacje komputerowe uwzględniające w obliczeniach różnorodne rzeczywiste oddziaływania np. siły dipolowe, opór lepkości oraz siły Browna pozwalają na pokazanie zachowania się zbioru cząstek magnetycznych w cieczy

¹⁾ Ciecz o zawartości 80% objętości cząstek o średnicy $5 \mu m$.

nośnej i ich ułożenie w struktury pod wpływem pola magnetycznego [31]. Informacje o przebiegu procesu przemieszczania się cząstek i końcowy rezultat w postaci łańcuchów, skupisk lub klastrów mogą być pomocne do określenia – ważnych przy konstruowaniu urządzeń z cieczami MR – parametrów, jak np. czasu reakcji cieczy lub ich magnetycznej przenikalności [74, 109].

Dużym utrudnieniem przy wykonywaniu symulacji na modelach mikroskopowych jest dobór odpowiednich warunków początkowych i parametrów fizycznych. W cieczy MR, bez pola magnetycznego, ułożenie cząsteczek magnetycznych zaraz po mechanicznym wymieszaniu jest chaotyczne i dość jednorodne. Nie zawsze jednak taki stan jest zachowany, a powstanie określonej struktury wewnętrznej zależy bardzo mocno od tego właśnie warunku początkowego. Istnienie takiego efektu potwierdzają badania eksperymentalne amerykańskiej agencji kosmicznej NASA prowadzone w ramach projektu InSPACE¹⁾. Wykazały one, iż oddziałując na ciecz MR polem magnetycznym w postaci prostokątnych impulsów o określonej szerokości i częstotliwości, można osiągnąć zupełnie inne ułożenie cząstek magnetycznych niż dla stałego pola.

Symulacje w oparciu o modele mikrostruktury nie ograniczają się wyłącznie do określenia kształtów i budowy struktury wewnętrznej, ale są też źródłem informacji o globalnych parametrach cieczy, np. podczas stałego co do wartości naprężenia ścinającego [35]. Oczywisty wpływ poszczególnych parametrów fizycznych, np. wielkości i ilości cząstek magnetycznej fazy na właściwości cieczy, jest widoczny w rezultatach symulacji i porównywalny z danymi eksperymentalnymi [54].

2.3. Zastosowania cieczy magnetoreologicznych

Dzięki swoim unikatowym właściwościom ciecze magnetoreologiczne znalazły liczne zastosowania. W urządzeniach mechanicznych służą do kontrolowanego rozpraszania energii lub jej przekazywania. Ten obszar zastosowań został w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat najbardziej rozwinięty i po części skomercjalizowany. Największą grupę urządzeń z cieczami MR stanowią sterowane tłumiki drgań, pochłaniacze energii uderzeń, urządzenia mocujące oraz urządzenia odpowiedzialne za przekazywanie momentu obrotowego (sprzęgła). Ciecze magnetoreologiczne wykorzystuje się również jako precyzyjne narzędzia skrawające lub elementy aktywne w systemach dotykowych.

¹⁾ ang. *InSPACE – Investigating the structure of paramagnetic aggregates from colloidal emulsions*

Zastosowania w urządzeniach mechanicznych nie są jedynymi. Ciecze MR przydatne są także w innych dziedzinach nauki, takich jak np. medycyna, gdzie są wykorzystywane jako sterowane nośniki leków w organizmie lub materiały w terapiach onkologicznych.

2.3.1. Sposoby wykorzystania cieczy MR w urządzeniach

Wśród urządzeń mechanicznych wykorzystujących ciecze magnetoreologiczne możemy wyróżnić kilka rodzajów, jednak większość z nich opiera się na podobnej zasadzie działania. Siła, jaka powstaje na wyjściu z urządzenia i przeciwdziała zewnętrznemu obciążeniu, jest zależna głównie od wartości naprężenia uplastyczniającego – aktualnej granicy plastyczności τ_o oraz prędkości odkształcania $\dot{\gamma}$ (model Binghama (2.2)). Ponieważ τ_o zależy od natężenia pola magnetycznego, to właśnie za jego pośrednictwem odbywa się sterowanie urządzeniem. Wytwarzanie pola magnetycznego, ze względu na potrzebę jego ciągłej zmiany, realizowane jest nie za pomocą magnesów stałych, ale przez odpowiednie układy cewek i magnetowodów. Jego wartość jest bezpośrednio zależna od natężenia prądu płynącego w obwodzie cewek. Z tego powodu często układy elektryczne traktuje się jako zewnętrzne sterowanie urządzenia.

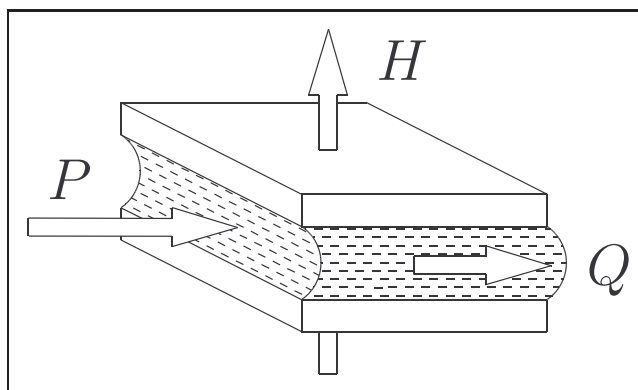
Istnieją trzy podstawowe konfiguracje, w których ciecz magnetoreologiczna funkcjonuje w urządzeniach. Charakteryzują się one sposobem przemieszczania się cieczy względem wektora pola magnetycznego oraz tym jak powstające w cieczy naprężenie można zamienić na zewnętrzną siłę.

Pierwszy ze sposobów wykorzystania cieczy nazywany jest „przepływowym” bądź „zaworowym”¹⁾. Został on schematycznie pokazany na rysunku 2.7. Zasada jego działania podobna jest do zaworu, w którym dławiony jest przepływ. Ciecz magnetoreologiczna pod wpływem ciśnienia P przepływa pomiędzy wzajemnie nieruchomymi powierzchniami określającymi geometrię szczeliny, prostopadle do której skierowany jest wektor pola magnetycznego H . Natężenie przepływu cieczy Q jest zależne od takich zmiennych, jak lepkość, H , P oraz od geometrii szczeliny. Urządzeniami, w których najczęściej spotykamy tryb zaworowy, są tłumiki drgań, pochłaniacze energii uderzeń [81] itp.

Kolejny sposób funkcjonowania cieczy nazywa się trybem „ścianania”²⁾ bądź „sprzęgłowym”. Schematycznie zasadę jego działania przedstawia rysu-

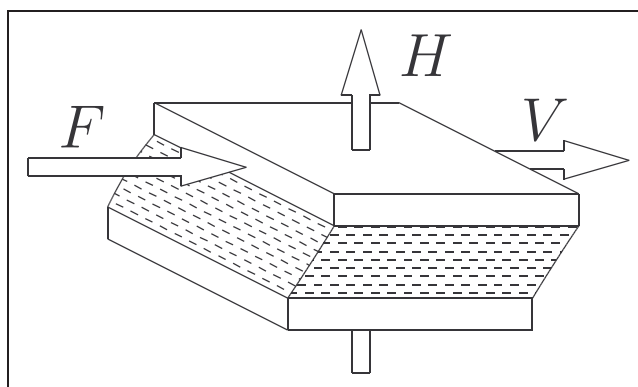
¹⁾ ang. *valve-mode*

²⁾ ang. *shear-mode*



Rysunek 2.7. Wykorzystanie cieczy magnetoreologicznej w trybie „zaworowym”

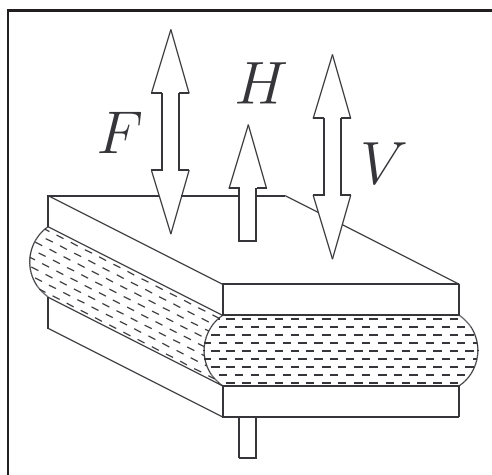
nek 2.8. Ciecz znajduje się pomiędzy dwoma wzajemnie równoległe przesuwanymi się z prędkością V powierzchniami, do których prostopadle skierowane jest pole magnetyczne H . Zmiana wielkości takich jak: H , V , lepkość cieczy czy geometria szczeliny powoduje zmianę siły F potrzebnej do przesunięcia powierzchni. Urządzeniami, w których najczęściej spotykamy tryb ścinania, są sprzęgła, hamulce i niektóre typy tłumików drgań.



Rysunek 2.8. Wykorzystanie cieczy magnetoreologicznej w trybie „ścinalania”

Najbardziej spotykaną konfiguracją, w jakiej funkcjonować może ciecz magnetoreologiczna, jest tryb „ściskania”¹⁾. Schematycznie zasadę jego działania przedstawiono na rysunku 2.9. W tym przypadku ciecz magnetoreologiczna, podobnie jak w poprzednich układach, znajduje się pomiędzy dwoma równoległe ustawionymi do siebie powierzchniami. Różnica w działaniu polega na wzajemnym ruchu powierzchni, które mogą się zbliżać lub oddalać od siebie, powodując ściskanie znajdującej się między nimi cieczy. W tym przypadku wektory siły zewnętrznej F i prędkości V są równoległe do oddziałującego pola magnetycznego H . Problemem w przypadku trybu ściskania jest ciągła

¹⁾ ang. *squeeze-mode*



Rysunek 2.9. Wykorzystanie cieczy magnetoreologicznej w trybie „ściskania”

zmiana odległości pomiędzy powierzchniami. Ma to bezpośredni wpływ na natężenie pola magnetycznego H , które staje się zależne od prądu zasilającego cewki oraz szerokości szczeliny. Taka skomplikowana zależność jest dodatkowym utrudnieniem w przypadku sterowania urządzeniem.

Zaprezentowane powyżej konfiguracje najczęściej wykorzystywane są odrębnie, ale możliwe są także ich kombinacje w ramach jednego urządzenia. Tak jak w przypadku trybu ściskania przy dużych wartościach przemieszczenia ciecz magnetoreologiczna będzie wyciskana z przestrzeni między powierzchniami, a przepływając między nimi będzie funkcjonowała już jak dla trybu zaworowego.

2.3.2. Liniowe tłumiki drgań

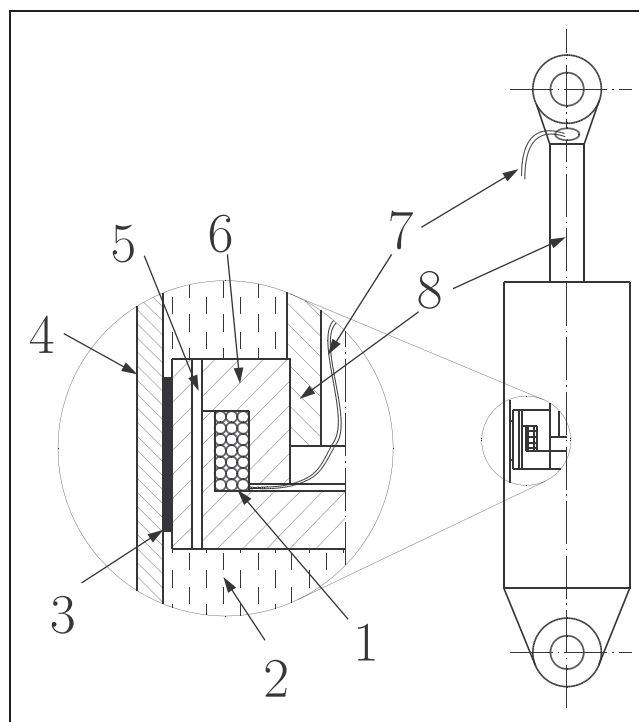
Najbardziej znanymi i rozpowszechnionymi urządzeniami z cieczami MR są sterowane, półaktywne¹⁾, liniowe tłumiki drgań. W odróżnieniu od powszechnie stosowanych tego typu urządzeń, np. samochodowych amortyzatorów, różnią się możliwością wytwarzania zmiennych sił. Dzięki tej właściwości takie tłumiki umieszczone w pętli sprzężenia zwrotnego pozwalają na adaptacyjne sterowanie tłumieniem w drgającej konstrukcji, tak aby zminimalizować lub ograniczyć jej drgania.

Odrębnego wytłumaczenia wymaga użyte powyżej określenie „półaktywne”. Spotykane jest ono często w literaturze i oznacza że, w przeciwieństwie do w pełni aktywnych urządzeń, takich jak np. elektromagnetyczne wzbudniki, nie potrafią one generować sił w układzie. Potrafią natomiast wytwarzać,

¹⁾ ang. *semi-active*

zmienną w zależności od nastawy, bierną siłę tłumienia, która przeciwdziała przemieszczaniu się układu.

Schemat budowy liniowego tłumika z cieczą MR pokazano na rysunku 2.10. Wzorowany on jest na konstrukcji komercyjnego urządzenia firmy LORD RD-1005-3.



Rysunek 2.10. Schemat typowego liniowego tłumika z cieczą magnetoreologiczną [71]. W powiększeniu pokazany przekrój tłoka z układem zadawania pola magnetycznego. Odpowiednio oznaczone zostały: 1 – cewka, 2 – ciecz magnetoreologiczna, 3 – uszczelnienie tłok–cylinder, 4 – cylinder, 5 – szczelina pierścieniowa, 6 – tłok, 7 – przewody doprowadzające prąd do cewki, 8 – tłoczysko

Najczęściej tłumiki z cieczą magnetoreologiczną przypominają budową swe olejowe odpowiedniki (amortyzatory). Różnice polegają na typie cieczy oraz sposobie wykorzystania jej właściwości do powstania siły tłumiącej. Jak pokazano na rysunku 2.10, konstrukcję komory roboczej, którą wypełnia ciecz magnetoreologiczna, tworzą: cylindryczna obudowa, tłoczysko, tłok oraz uszczelnienia. Zasada działania polega na dławieniu przepływu cieczy przez wąską, wykonaną w tłoku szczelinę pierścieniową o powierzchni kilku milimetrów kwadratowych, wewnątrz której za pomocą cewki wytwarzane jest pole magnetyczne. Ciecz MR w tym przypadku funkcjonuje w trybie zaworowym, jak opisano to poprzednio. Siła, jaka potrzebna jest do przemieszczenia tłoka uzależniona jest od sił oporu przepływu cieczy, a więc pośrednio od wielko-

ści geometrycznych szczeliny oraz natężenia pola magnetycznego, za którego zmianę odpowiada umieszczona wewnątrz cewka. Sygnał elektryczny w postaci natężenia prądu doprowadzony jest z zewnątrz za pomocą przewodów wyprowadzonych przez tłoczysko. Dodatkowo w dolnej części komory roboczej umieszczony jest akumulator gazowy, kompensujący zmiany objętości powstające w czasie przemieszczania się tłoczyska oraz zmian temperatury.

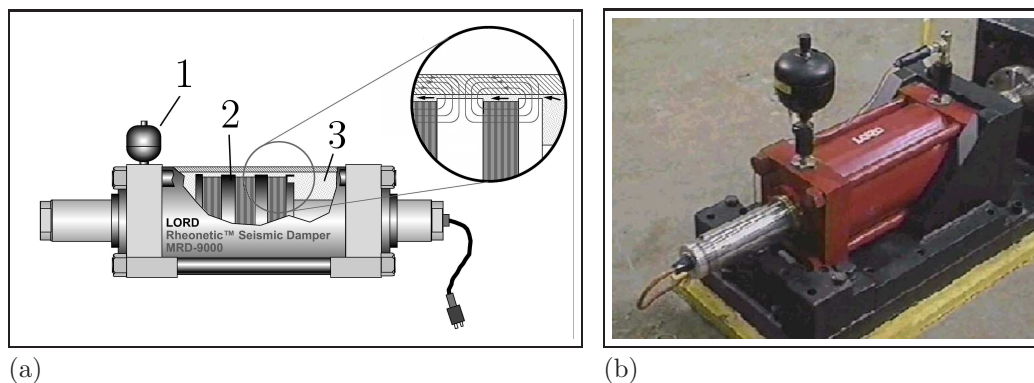
Aktualnie głównym obszarem zastosowań i komercjalizacji tłumików z cieczami MR jest przemysł samochodowy. Wykorzystywane są one jako sterowane amortyzatory w zawieszeniach samochodów osobowych [89], ciężarowych [103], motocykli [24, 30] czy też w siedziskach [95]. Ukierunkowanie wykorzystania technologii cieczy MR w stronę przemysłu motoryzacyjnego spowodowane jest chęcią szybkiego jej rozpowszechnienia, a przez to obniżenia ceny. Od kilku lat istnieją rozwiązania komercyjne takich firm, jak Delphi [2], Carrera czy LORD [66]. Można także zakupić samochody z seryjnie zainstalowanymi tego typu sterowanymi amortyzatorami, jak np. Cadillac Seville STS 2002.

Zainteresowanie tematyką jest na tyle duże, iż wiele ośrodków naukowych i rozwojowo-badawczych stara się stworzyć własne konstrukcje [34, 80, 91] z wykorzystaniem komercyjnie dostępnych cieczy MR. Przykładów zastosowania sterowanych tłumików jest bardzo wiele. Przytoczone zostaną tutaj tylko, zdaniem autora, najważniejsze i najbardziej reprezentatywne.

Tłumiki z cieczami MR mogą służyć do tłumienia drgań budynków wywołanych trzęsieniami ziemi [119]. Oczywiście wymaga, to urządzenia przystosowanego do pracy w zupełnie innym zakresie sił niż np. zawieszenia samochodów. Na rysunku 2.11 pokazano skonstruowany w firmie LORD tłumik [36], który może uzyskiwać siły od 20 do 180 kN .

Zakres możliwych do uzyskania sił w tłumikach z cieczami MR jest bardzo szeroki. W zależności od zastosowania możliwe jest dobranie lub zaprojektowanie odpowiedniego urządzenia. I tak dla porównania, w przypadku tłumika RD-1005-3 stosowanego do zawieszeń siedzisk samochodów ciężarowych zakres możliwych do uzyskania sił mieści się w przedziale od 0,3 do 2 kN .

Jednym z najważniejszych parametrów, jakie muszą być uwzględnione przy zastosowaniu tłumika, jest nie tylko wartość siły, ale i czas w jakim może zostać ona uzyskana. Stała czasowa ma kluczowe znaczenie w procesie sterowania tłumikiem i wpływania za jego pomocą na zachowanie się konstrukcji. Dla tłumika RD-1005-3 producent podaje, iż czas na osiągnięcie 90% maksymalnej wartości siły podczas skokowej zmiany prądu w cewkach



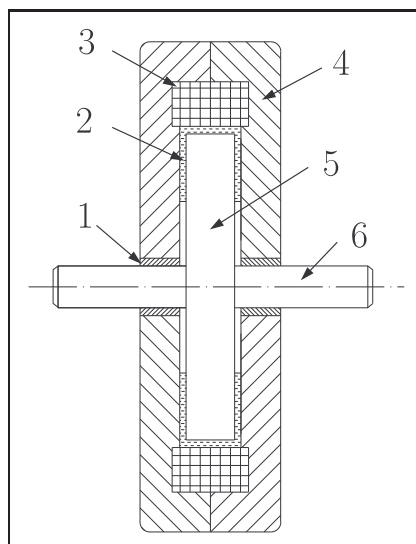
Rysunek 2.11. Tłumik MRD–9000 do tłumienia drgań budowli: (a) – schemat wraz z oznaczonymi odpowiednio: 1 – akumulator, 2 – trzystopniowy tłok, 3 – ciecz MR, (b) – widok ogólny [69]

od 0 do 1 A jest poniżej 25 ms. Natomiast dla modelu MRD–9000 czas ten jest poniżej 60 ms. Wartość tego parametru ma duże znaczenie w zastosowaniach tłumików jako aktywnych pochłaniaczy energii uderzeń [79, 86]. Oczywiście, im mniejsza jego wartość, tym lepsza; szczególnie dlatego, iż na czas reakcji całej struktury, w której działa tłumik, mają wpływ także inne elementy. Na powstanie opóźnienia na przykład wpływa nie tylko sama ciecz, ale też układ kształtowania pola magnetycznego, jak i numerycznego przetwarzania sygnałów.

2.3.3. Sprzęgła, hamulce

Osobną grupę zastosowań cieczy magnetoreologicznych stanowią urządzenia służące przekazywaniu lub wytracaniu momentu obrotowego. Wśród nich za najważniejsze można uznać sprzęgła i hamulce. Jako przykład tego typu konstrukcji zaprezentowano na rysunku 2.12 schemat hamulca z cieczą MR. Zasada działania tego typu urządzenia polega na wytwarzaniu zmiennej siły oporu między obudową a obracającą się tarczą. Siła ta jest uzależniona od aktualnych parametrów cieczy magnetoreologicznej umieszczonej w szczelinie pomiędzy wirującymi elementami. Sterowanie odbywa się za pomocą cewki i podawanego na jej uzwojenie prądu. Ma on bezpośredni wpływ na wartość natężenia pola magnetycznego, które oddziałuje na ciecz MR i jej właściwości, głównie naprężenie τ_o . W przypadku, gdy obudowa urządzenia ma możliwość obrotu i przekazywania dalej momentu obrotowego, można mówić o konstrukcji sprzęgła z cieczą MR [58]. W przypadku hamulca jaki i sprzęgła ciecz funkcjonuje w trybie ścinania.

Dostępne typy tłumików i sprzęgieł należą wciąż do prototypowych. Pro-



Rysunek 2.12. Schemat obrotowego hamulca z cieczą magnetoreologiczną. Odpowiednio oznaczone zostały: 1 – uszczelnienie, 2 – szczelina wraz z cieczą magnetoreologiczną, 3 – cewka, 4 – obudowa, 5 – tarcza, 6 – wał

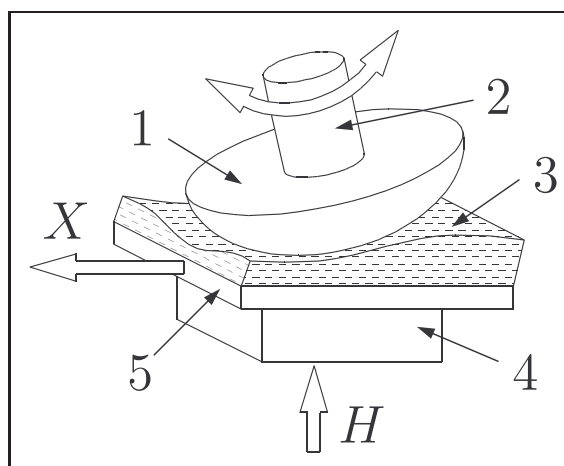
blemem, jaki napotykają konstruktorzy tych urządzeń, jest eliminacja ciepła pojawiającego się w czasie pracy. Niestety, znane i dostępne komercyjnie ciecz magnetoreologiczne niezbyt dobrze znoszą temperatury powyżej $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [72], co wpływa negatywnie na ich charakterystyki. Z tego powodu hamulce i sprzęgła z cieczami MR są predysponowane raczej do krótkotrwałej kontroli wartości przekazywanego momentu niż do ciągłego procesu dyssypacji energii.

2.3.4. Precyzyjna obróbka ubytkowa powierzchni za pomocą cieczy MR

W przypadku obróbki ubytkowej zasadnicze znaczenie dla dokładności otrzymywanej powierzchni mają parametry narzędzia skrawającego. Zazwyczaj są one stałe podczas całego procesu lub ulegają pogorszeniu, na przykład wskutek zużycia się lub zniszczenia kształtu krawędzi skrawającej (jej stępienia). Najlepszym rozwiązaniem wobec tego byłoby posiadanie narzędzia, które będzie mogło w sposób ciągły zmieniać swoje parametry i na bieżąco, w zależności od nierówności powierzchni, dopasowywać swoje właściwości skrawające.

Usuwanie drobnych nierówności i zaburzeń kształtu powierzchni wielkości mikrometrów ma szczególnie znaczenie przy wykonywaniu precyzyjnych elementów optycznych. Ponieważ dotychczas stosowane metody obróbki wykończającej powierzchni były w tej dziedzinie niewystarczające i nieefektywne, naukowcy, poszukując nowoczesnych rozwiązań, sięgnęli po materiały

SMART. Bardzo dobrym rozwiązaniem okazało się zastosowanie cieczy magnetoreologicznych [33]. To właśnie możliwość kontrolowanej, ciągłej zmiany parametrów cieczy za pomocą pola magnetycznego pozwoliło na wykorzystanie jej jako narzędzia do precyzyjnej obróbki powierzchni. Techniczną realizację tego procesu pokazano na rysunku 2.13.



Rysunek 2.13. Schematyczne przedstawienie procesu precyzyjnej obróbki ubytkowej powierzchni z wykorzystaniem cieczy magnetoreologicznych. Oznaczono odpowiednio: 1 – soczewka poddawana obróbce, 2 – zewnętrzne mocowanie pozwalające na swobodne operowanie elementem, 3 – ciecz MR, 4 – nabiegownik doprowadzający pole magnetyczne H oraz 5 – powierzchnia, wraz z którą przemieszczana jest ciecz MR

Stymulując ciecz MR polem magnetycznym, regulując przesuw podłoża i nacisk na nie, można na bieżąco wpływać na parametry procesu usuwania materiału. Dodatkowo, znając mapę zniekształcenia powierzchni oraz dysponując możliwością precyzyjnego ustawienia obrabianego elementu, możliwe jest niwelowanie nierówności na poziomie poniżej mikrometra i uzyskiwanie mikrochropowatości około 10 Å rms^1 [55]. Metoda ta będąca przedmiotem wielu prac wypiera inne sposoby obróbki w tym zakresie.

Skład cieczy używanej w tego typu technologii jest zróżnicowany. Standardowa zawiesina żelaza karbonyłkowego w wodzie nadaje się do obróbki szklanych soczewek. Jednak w celu zwiększenia efektywności procesu dodaje się różnego rodzaju komponenty mające dobre właściwości ściernie, jak np. CeO_2 , Al_2O_3 [33].

¹⁾ *ang. rms – root mean square*, średnie kwadratowe odchylenie

2.3.5. Systemy dotykowe z cieczami MR

Systemy dotykowe¹⁾ są to układy generujące siłę pozwalającą użytkownikowi na dotknięcie i poczucie jedno-, dwu- lub trójwymiarowych obiektów, o których informacja przekazywana jest jedynie na drodze wirtualnej, a także manipulowanie nimi [107]. Przykładem tego typu urządzeń są rozpowszechnione w ostatnich latach manipulatory do gier komputerowych wyposażone w system zwrotnego sygnału. Wśród nich znajdują się różnego rodzaju joysticki, myszki, kierownice oraz konsole²⁾. Służą one do realistycznego odzwierciedlenia przebiegu gry. W momencie, gdy na wirtualny obiekt, którym poruszamy, zaczynają oddziaływać dodatkowe siły np. napotkanie przeszkody, automatycznie zwiększają się opory ruchu drążka manipulatora (np. symulator jazdy samochodem: jazda w śniegu → opory ruchów kierownicy). Realizacja mechaniczna zwrotnego sygnału siły odbywa się – w dotychczas stosowanych rozwiązaniach – najczęściej za pomocą układów elektromagnetycznych.

Sygnał, który przetwarza interfejs dotykowy, może pochodzić nie tylko z komputera – gdzie jego przebieg jest symulowany, ale także z obiektów rzeczywistych. Pozwala to na przenoszenie drogą elektroniczną cyfrowo zapisanej informacji do użytkownika, który nie może aktualnie znajdować się w tym samym miejscu, co dany obiekt. Przykładem może być operacja chirurgiczna na odległość [78]. Dzięki systemowi dotykowemu możliwe jest bezpośrednie przekazywanie pomiędzy pacjentem a lekarzem całej gamy informacji, umożliwiających prowadzenie zdalnego zabiegu.

Ideę systemu dotykowego łatwo jest zrealizować w oparciu o cieczę MR, wykorzystując je na przykład do budowy aktywnego elementu stwarzającego przy przemieszczaniu manipulatora opór (np. jako hamulec, rysunek 2.12) proporcjonalny do obciążenia, jakie wytwarza rzeczywisty, sterowany obiekt. W stosunku do stosowanych aktualnie elektromechanicznych rozwiązań urządzenia z cieczami MR charakteryzują się zdecydowanie mniejszymi rozmiarami, niższą ceną oraz zwartą budową. Przykładem tego typu systemów może

¹⁾ *ang. haptic interfaces* (pojęcie *interface* często tłumaczone jest za pomocą słowa interfejs, które pochodzi z informatycznego słownika i opisuje część oprogramowania pozwalającą użytkownikowi na komunikowanie się z głównym programem poprzez wyświetlanie informacji lub możliwość wprowadzenia danych)

²⁾ Przykłady dostępnych na rynku manipulatorów: Logitech® Wingman Force Feedback Mouse, AVB® Force Feedback Steering Wheel.

być dotykowe urządzenie sprzężenia zwrotnego TDF¹⁾ produkowane przez firmę LORD pod nazwą *ang. the rheonetic steering feedback system*. Stosowane jest ono w podnośnikach widłowych w celu przekazywania do operatora pojazdu informacji o sile, jaka potrzebna jest do skręcenia koła manewrowego.

Swoboda przyjmowania kształtów przez ciecz MR pod wpływem nierównomiernie rozłożonego pola magnetycznego daje jej przewagę nad tradycyjnymi układami mechanicznych receptorów. Dzięki tej zdolności możliwe stało się zbudowanie systemu dotykowego, który potrafi odwzorować kształty i podatność prostych obiektów geometrycznych w dwóch i trzech wymiarach. Zamysłem autorów pracy [4] było stworzenie ekranu dotykowego, za pomocą którego możliwe byłoby przekazywanie informacji o skomplikowanych obiektach, np. organach ludzkich poddawanych zabiegom chirurgicznym na odległość. W początkowej wersji urządzenia udało się uzyskać kształt prostopadłościanu, o podstawie trójkąta i prostokąta, możliwy do rozpoznania za pomocą dotyku dłonią. Kolejnym krokiem do otrzymania bardziej skomplikowanych kształtów jest wykonanie układu kształtowanie rozłożenia intensywności pola magnetycznego w przestrzeni, o zwiększonej w stosunku do prototypu precyzji.

2.3.6. Struktury SMART z wykorzystaniem liniowych tłumików MR

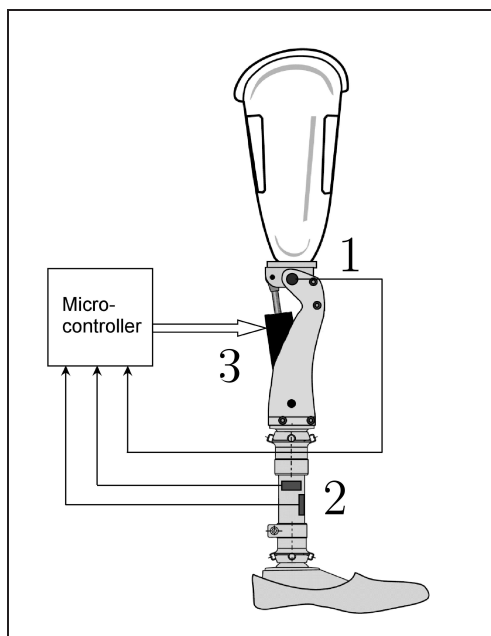
Obserwując przyrodę możemy dostrzec, że każdy organizm żywy jest wyposażony w mechanizm dostosowujący go do zmiennych warunków otaczającego środowiska. Jest to mechanizm nazywany aktywnym lub adaptacyjnym. Od momentu powstania pierwszych maszyn człowiek stara się naśladować naturę. Możliwości powstania urządzeń funkcjonujących w taki sposób pojawiły się wraz z odkryciem takich materiałów, jak ciecze magnetoreologiczne.

Główną zaletą urządzeń z cieczami MR – w stosunku do standardowych rozwiązań – jest możliwość bieżącej zmiany ich charakterystyk. Dla tłumika jest to możliwość ciągłej zmiany siły, z jaką przeciwdziała przemieszczaniu się elementów konstrukcji. Dzięki takim właściwościom możliwe jest zbudowanie struktury działającej adaptacyjnie, innymi słowy – struktury SMART. Do zrealizowania układu działającego aktywnie poza elementem wykonawczym, np. w postaci tłumika z cieczą MR, potrzebny jest jeszcze ośrodek podejmujący decyzje. W przypadku człowieka taką funkcję spełnia mózg, natomiast dla maszyny decyzję będzie podejmował programowalny sterownik lub komputer z zaimplementowanym algorytmem.

¹⁾ *ang. TDF – tactile feedback device*

Doskonałym przykładem konstrukcji SMART jest aktywna proteza. Utrata części ciała, np. nogi, wymaga jej zastąpienia przez odpowiedni układ mechaniczny. Ze względu na budowę człowieka i jego zmienny sposób poruszania się proteza musi współdziałać z istniejącą częścią ciała (drugą nogą) i dorównywać jej funkcjonalnością. Wymaga to zbudowania mechanizmu działającego aktywnie, adaptującego się do tego, co w danej chwili wykonuje człowiek.

Badania nad eksperymentalną konstrukcją aktywnej protezy nogi, która spełniałaby powyższe założenia, od kilku lat prowadzi firma LORD oraz Biderman MOTOTECH [12]. Schemat protezy pokazany został na rysunku 2.14. Najważniejszym elementem w części mechanicznej jest przegub za-



Rysunek 2.14. Adaptacyjna proteza nogi typu SMART MAGNETIX. Oznaczono odpowiednio: 1 – czujniki kąta zgięcia i prędkości jego zmiany w kolanie, 2 – czujniki siły i momentu, 3 – tłumik z cieczą magnetoreologiczną [12]

stępujący kolano. Ponieważ siły w nim występujące nie są stałe, lecz uzależnione od tego, co wykonuje w danej chwili człowiek, potrzebny był element umożliwiający sterowanie nimi. W tym celu wykorzystano liniowy tłumik z cieczą magnetoreologiczną, podobny do modelu RD-1003-5. Druga część protezy odpowiedzialna jest za sterowanie tłumikiem. W jej skład wchodzi czujniki rejestrujące co dzieje się z protezą (kąąt zgięcia i prędkość jego zmiany, siłę nacisku i moment skręcający) oraz układ sterowania. Pod tym ostatnim pojęciem rozumiany jest mikrokomputer odpowiedzialny za zbieranie i analizę danych z czujników oraz wysyłający na podstawie wcześniej wprowadzonego

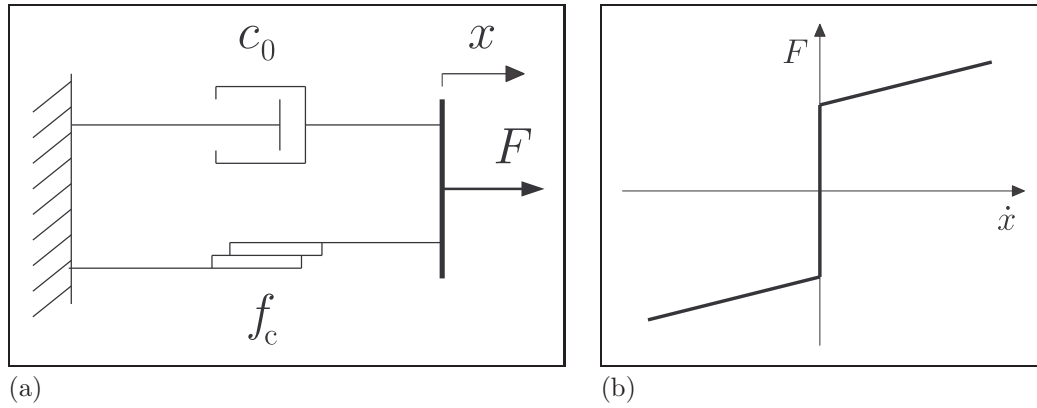
dzionego algorytmu sygnał sterujący do tłumika MR. Dzięki temu powstaje pełny układ ze sprzężeniem zwrotnym, adaptujący się do zmiennych warunków pracy.

2.4. Modele strukturalne tłumików z cieczami MR

Jak to przedstawiono poprzednio, ciecze MR nadają się doskonale do budowy tłumików stosowanych w układach aktywnego tłumienia. Wykorzystanie w pełni zalet tego typu tłumika wymaga opracowania prawidłowego algorytmu jego sterowania. Niezbędna jest do tego znajomość modelu urządzenia. Jego budowa w oparciu o model konstytutywny cieczy jest bardzo trudnym zadaniem. Zdecydowanie łatwiejszym i najczęściej stosowanym podejściem jest opis fenomenologiczny. Scharakteryzowanie urządzenia grupą współczynników oraz powiązanie sygnałów wejściowych z wyjściowymi pozwala na stworzenie modelu, który może być wykorzystany do sterowania.

2.4.1. Model Bingham dla tłumika z cieczą MR

Jak pokazano w publikacjach [7, 97, 106], wzorując się na modelu ciała Bingham można opisać działanie urządzenia, jakim jest liniowy tłumik z cieczą MR. Schemat strukturalny dla takiego modelu został pokazany na rysunku 2.15a. Siła, jaką może wytworzyć tłumik, zależy od parametru c_0 re-



Rysunek 2.15. Model strukturalny Bingham dla tłumika z cieczą MR (a) oraz przykładowa charakterystyka we współrzędnych siła tłumienia F , prędkość przemieszczenia tłoka $\dot{x}$ (b)

prezentującego właściwości lepkie oraz f_c charakteryzującego tarcie coulombowskie. Jej wartość obliczyć można następująco:

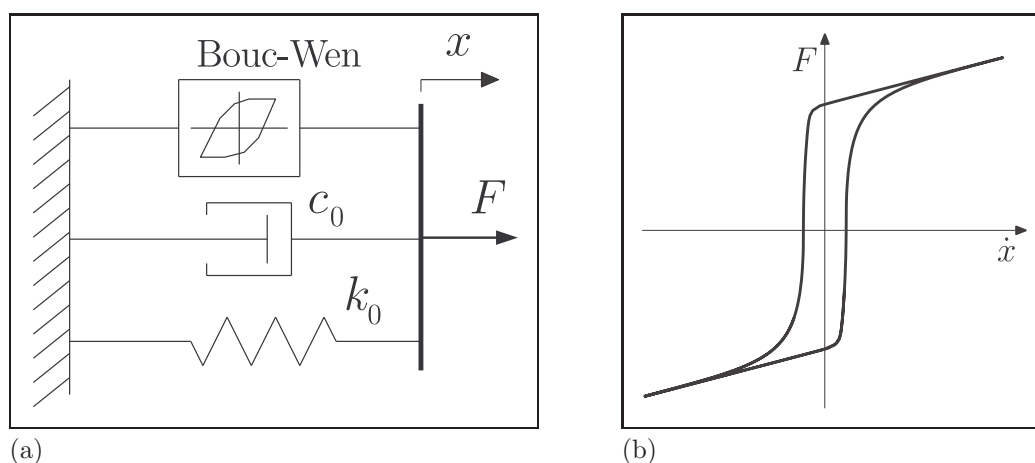
$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0, \quad (2.14)$$

gdzie parametr f_0 jest stałą wartością siły występującą w tłumikach jednostronnego działania, spowodowaną ciśnieniem w akumulatorze i różnicą powierzchni czynnej i biernej tłoka. Przykładowa charakterystyka tłumika we współrzędnych $F - \dot{x}$ pokazana została na rysunku 2.15b.

Model ten jest bardzo prosty i – jak będzie to pokazane w jednym z następnych rozdziałów prezentującym badania tłumika – dobrze odzwierciedla charakterystykę rzeczywistego urządzenia jedynie dla wyższych wartości prędkości. Brak jest też jednoznacznie określonej zależności parametrów modelu od wartości sterującej, jaką jest natężenie prądu wytwarzającego pole magnetyczne.

2.4.2. Model Bouc-Wena

Poszukiwanie opisu możliwie jak najdokładniej odzwierciedlającego charakterystyki tłumików z cieczami MR doprowadziło do opracowania modelu Bouc-Wena [106]. Jego strukturalny schemat oraz przykładowa charakterystyka przedstawione zostały na rysunku 2.16a i b.



Rysunek 2.16. Model strukturalny Bouc-Wena – (a) oraz przykładowa charakterystyka we współrzędnych siła tłumienia F , prędkość przemieszczenia tłoka $\dot{x}$ – (b)

Równania tego modelu są bardziej skomplikowane niż modelu Binghama; zawierają szereg parametrów, za pomocą których możliwe jest wpływanie na przebieg charakterystyki. Siła, jaką może wygenerować tłumik, jest zdefiniowana następująco:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad , \quad (2.15)$$

gdzie zmienna z , odpowiedzialna za tworzenie się pętli histerezy wyraża się jako:

$$z = -\kappa z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + \delta \dot{x} , \quad (2.16)$$

gdzie κ , β , α , δ oraz n są współczynnikami kształtu charakterystyki. Przykładową pętlę we współrzędnych $F - \dot{x}$, otrzymaną dla modelu Bouc-Wena pokazano na rysunku 2.16b. Wyraźnie widoczna jest histereza oraz nielinio-wości przebiegu. Dzięki temu model ten zdecydowanie lepiej opisuje charakterystyki rzeczywistego tłumika.

W literaturze przedmiotu można spotkać także inne modele tłumików z cieczami magnetoreologicznymi (i elektoreologicznymi). Różnią się one sposobem zapisu i dokładnością odwzorowania. Wśród najważniejszych można wymienić modele: zmodyfikowany Bouc-Wena, Gamota-Flisko, Li, Spencera, BingMax, Powella oraz grupę modeli parametrycznych [7, 97, 106].

3. Ciecze ferro

Ciecze ferro, nazywane również cieczami magnetycznymi lub ferrocieczami¹⁾, należą do grupy materiałów aktywowanych magnetycznie. Podobnie jak opisane wcześniej ciecze MR, zmieniają niektóre swoje właściwości fizyczne pod wpływem pola magnetycznego. Różnią się jednak na tyle znacząco, iż stanowią obiekt badań odrębnej dziedziny nauki, zwanej ferrohydrodynamiką [96].

Ciecze ferro są zawiesiną koloidalną magnetycznie aktywnych cząstek w niemagnetycznej cieczy. Średnia wielkość tych cząstek to 10 nm. Ich zawartość w cieczy nośnej, którą mogą być różnego rodzaju oleje, nafta lub woda, wynosi od 7 do 10%. Tak małe rozmiary cząsteczek powodują, iż występujące w cieczy termiczne fluktuacje oraz ruchy Browna stają się przyczyną ciągłego mieszania się i eliminacji zjawiska sedymentacji. Wymagane jest jedynie pokrywanie magnetycznych cząstek środkiem powierzchniowo czynnym w celu przeciwdziałania siłom Van der Walsa. Materiałem wykorzystywanym do produkcji cząstek są magnetyt, tlenki kobaltu lub inne ferromagnetyczne tlenki [87].

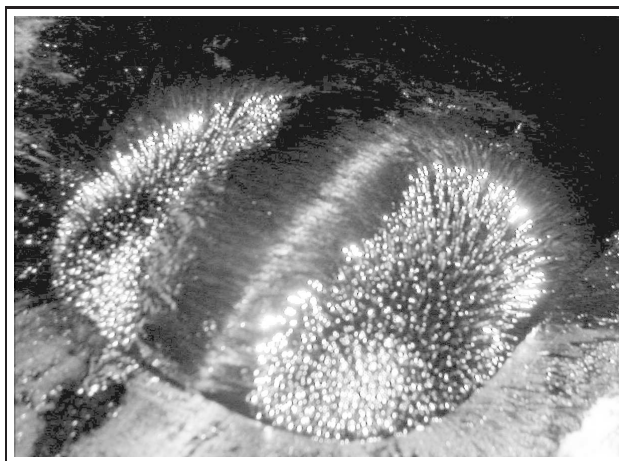
Najbardziej charakterystyczną właściwością cieczy ferro jest zmiana lepkości pod wpływem pola magnetycznego. Natomiast – odwrotnie niż w cieczach magnetoreologicznych – nie wykazują one granicy plastyczności. Charakterystycznym efektem wizualnym, który nie występuje tak intensywnie w cieczach MR, jest tzw. „język”, jaki tworzy swobodna powierzchnia cieczy ferro w obecności silnego pola magnetycznego. Efekt ten pokazany został na rysunku 3.1.

3.1. Zastosowania cieczy ferro

3.1.1. Uszczelnienia magnetyczne

Pierwsze zastosowania cieczy ferro wiążą się z budową uszczelnień wirujących dysków. Zasada działania tego typu uszczelnienia pokazana została

¹⁾ *ang. magnetics fluids, ferrofluids*



Rysunek 3.1. Charakterystyczne zachowanie się cieczy ferro pod wpływem silnego pola magnetycznego. Na brzegach widoczne „szpilki” ułożone zgodnie z liniami sił pola magnetycznego. Zdjęcie udostępnione dzięki uprzejmości dr A. Vogta (Wydział Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego)

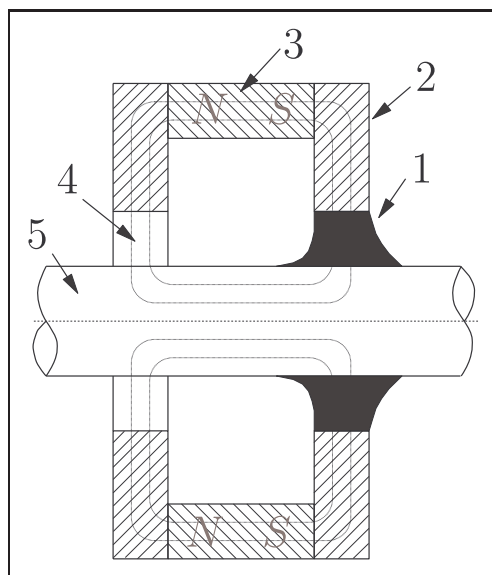
na rysunku 3.2. Odpowiednio skonstruowana obudowa z magnesem stałym zapewnia powstanie obwodu pola magnetycznego, którego strumień przechodzi przez szczelinę, w której znajduje się ciecz ferro. Powstaje w tym miejscu zapora tworząca uszczelnienie. Jego zaletą jest całkowite oddzielenie przestrzeni i nieuleganie zniszczeniu pomimo ciągłego ścinania w czasie wzajemnego obracania się elementów. Wyjaśnienie działania tego typu uszczelnienia związane jest oddziaływaniem pomiędzy cząsteczkami, które mimo ciągłego rozrywania wewnętrznych wiązań dążą do odtworzenia struktury, jaką narzuca im pole magnetyczne.

Bariera powstała z cieczy ferro z powodzeniem wykorzystywana jest do budowy obrotowych przepustów w urządzeniach z próżnią. Technika wykonania tego typu uszczelnień została na tyle dobrze opanowana, że od kilku lat istnieją komercyjne rozwiązania, np. z firmy FerroTec¹⁾. Wartości przenoszonych ciśnień są uzależnione od szerokości szczeliny, pola magnetycznego i prędkości obrotowej. Jednostopniowe uszczelnienie może przenieść ciśnienie około 200 *mbar*. Możliwe jest natomiast zwiększenie tej wartości przez utworzenie kaskady uszczelnień. Oferowane przez firmę FerroTec rozwiązania mogą przenosić ciśnienia dla wysokiej próżni 10^{-9} *mbar* [25].

3.1.2. Medyczne zastosowania cieczy ferro

Nadzwyczaj interesującym obszarem zastosowaniem cieczy ferro jest medycyna. Możliwość wpływania i kierowania ruchem cząstek materiału pod

¹⁾ Dawniej znana pod nazwą *Ferrofluidics Corporation*.



Rysunek 3.2. Schemat magnetycznego uszczelnienia obrotowego elementu z wykorzystaniem cieczy ferro. Odpowiednio oznaczone zostały: 1 – ciecz ferro tworząca uszczelnienie, 2 – obudowa, nieruchomy element, 3 – magnes stały, 4 – przebieg linii strumienia magnetycznego w szczelinie, 5 – obracający się wał

wpływem pola magnetycznego podsunęła pomysł, by wykorzystać je jako zdalnie sterowane tzw. transportery. Do odpowiednio przygotowanych części magnetycznych można doczepić np. leki i wraz z nimi przemieszczać je w organizmie. Cały proces wygląda następująco: transportery razem z dołączoną zawartością wprowadzone zostają do organizmu pacjenta. Tutaj, kierowane polem magnetycznym podawanym z zewnątrz, przemieszczane są do miejsca przeznaczenia. Pozostają w nim przez czas, który został przewidziany na oddziaływanie leku. Dalej następuje droga powrotna i usunięcie z organizmu transporterów. Zalety tej metody w stosunku do tradycyjnych sposobów są bardzo duże. Możliwość bezpośredniego dostarczenia lekarstwa pozwala na ochronę innych części organizmu, mocno obciążonych w terapiach konwencjonalnych (np. nerki, wątroba). Dawka może być zmniejszona do minimum, a zwiększona może być intensywność oddziaływania. Sposób wprowadzenia i wyprowadzenia leków ma charakter nieinwazyjny i nie prowadzi do uszkodzeń mechanicznych tkanek. Metoda ta od kilkunastu lat jest przedmiotem intensywnych badań [1,27]. Celem ich jest jej udoskonalenie i przystosowanie do leczenia nowotworów. Walka z rakiem, rozumianym jako zespół komórek, które nie reagują na polecenia organizmu, polega najczęściej na jego usunięciu. Istnieje wiele sposobów wykorzystywanych do tego celu, np. bezpośrednia interwencja chirurgiczna, chemioterapia. Transport leków za pomocą magne-

tycznych nośników mógłby okazać się cennym rozszerzeniem i uzupełnieniem tych metod.

Cząsteczki magnetyczne w organizmie mogą być także wykorzystane w inny sposób do „zabicia” nowotworu [26,102]. Doprowadzone do miejsca, w którym znajdują się komórki nowotworowe, mogłyby pod wpływem zewnętrznego pola utworzyć barierę oddzielającą je od „zasilania” w tlen i pożywienie. Spowodowałoby to miejscowe obumarcie niepożądanych komórek. Następnie magnetyczne cząstki zostałyby wyprowadzone na zewnątrz organizmu, bez dalszej szkody dla niego.

Wśród zastosowań cieczy ferro znajduje się jeszcze wiele rozwiązań, na które przyznano ponad 1500 patentów [87]. Do najbardziej interesujących można zaliczyć: poprawienie charakterystyk głośników, silników elektrycznych [84], miejscowe smarowanie przekładni zębatych, współpracujących elementów [85] oraz węzłów łożyskowych [117].

3.1.3. Ferrozele

Ferrozele są materiałami powstałymi z połączenia struktury łańcuchowej żelu związku nieorganicznego lub organicznego z koloidalnymi cząstkami cieczy ferro [122]. Dzięki temu uzyskuje się sprzężenie magneto-mechaniczne i możliwość wpływania na charakterystyki całego materiału, np. poprzez zmianę zewnętrznego pola. Właściwości fizykochemiczne takiego materiału są, podobnie jak samej cieczy, bardzo interesujące. W centrum zainteresowania znajdują się jego właściwości mechaniczne jak i akustyczne badane z wykorzystaniem fal ultradźwiękowych [38,105].

4. Kompozyty i elastomery magnetoreologiczne

4.1. Budowa kompozytów MR i terminologia

Ciecz MR w warunkach grawitacji wymaga zewnętrznych barier lub naczyń, które utrzymuje ją w określonym miejscu z zachowaniem geometrii. Niedogodność tę można pokonać na kilka sposobów. Pierwszy z nich polega na zastąpieniu cieczy nośnej materiałem o zdecydowanie większej lepkości (np. żel lub smar [75, 94]), co zostało omówione uprzednio. Powstaje w ten sposób materiał o, podobnie jak ciecz MR, zmiennej strukturze wewnętrznej ale z możliwością łatwiejszego utrzymania w jednym miejscu. Wadą tego rozwiązania jest zbyt duża lepkość w stanie wyłączonym – bez pola magnetycznego, która może być przeszkodą w niektórych zastosowaniach.

Efekt kształtowania zewnętrznych wymiarów można uzyskać także poprzez nasycenie cieczą MR materiału porowatego. W ten sposób materiał o otwartej strukturze komórkowej (siatkowej) tworzy matrycę utrzymującą ciecz magnetoreologiczną w granicach wyznaczonych swoimi rozmiarami, pozwalając jednocześnie na dość swobodne oddziaływanie wewnątrz. Pod pojęciem siatkowej struktury rozumiany jest materiał składający się głównie z wewnętrznych przestrzeni, otwartych porów, które są między sobą połączone. Matrycę nośną kompozytu magnetoreologicznego może stanowić gąbka, tkanina, filc lub inny elastyczny materiał porowaty [11]. Poprzez nasycenie matrycy otrzymujemy materiał charakteryzujący się, podobnie jak ciecz MR, zależnością mechanicznych parametrów od pola magnetycznego.

Tak ukształtowany nowy typ materiału nie posiada jednej sformalizowanej nazwy. W literaturze przedmiotu odnaleźć możemy takie określenia, jak: materiały porowate nasycane cieczami wrażliwymi na pola¹⁾ [17], gąbki magnetoreologiczne²⁾ [11] lub magnetycznie wrażliwe gąbki³⁾ [92].

¹⁾ *ang. field-responsive fluid-impregnated cellular solids*

²⁾ *ang. magnetorheological foams*

³⁾ *ang. magnetically responsive foam*

W przypadku polskiego określenia, ze względu na występowanie złożonej struktury matrycy i wypełnienia zasadne wydaje się nazywanie go kompozytem magnetoreologicznym, w skrócie MRC¹⁾, co stosowano dalej w pracy.

4.2. Zastosowania kompozytów MR w tłumikach tarcowych

Kompozyty MR należą do materiałów, które mimo zupełnie innej budowy często traktowane są jako jeden z działów nauki o cieczach MR. Rosnące zainteresowanie tymi materiałami i próby ich szerokiego zastosowania, szczególnie w obszarze aktywnych tłumień, powoduje, iż są one coraz dokładniej poznawane i opisywane.

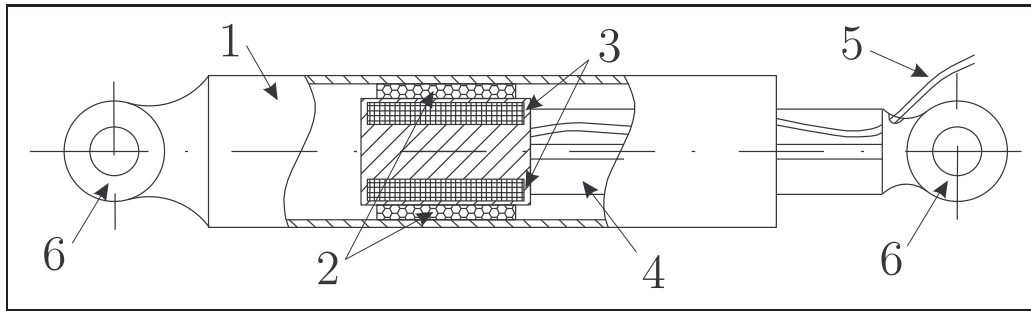
Wśród ubogiej literatury dotyczącej kompozytów magnetoreologicznych pierwsze informacje o ich właściwościach i zastosowaniach można odnaleźć w pracach [10, 11]. Pierwsza z nich posiada charakter przeglądowy i zawiera opis właściwości i zastosowania najważniejszych materiałów z grupy SMART aktywowanych magnetycznie, w tym także gąbek nasycanych cieczami MR (kompozytów magnetoreologicznych). Podane w niej informacje o wadach i zaletach oraz praktyczne wzory umożliwiają ocenę przydatności i bezpośrednie inżynierskie zastosowania materiałów bez poruszania kwestii właściwości magnetomechanicznych samego materiału. W obu pracach można odnaleźć opis prototypowego urządzenia – półaktywnego tłumika drgań, w którym wykorzystano gąbki nasycone cieczą magnetoreologiczną. Zasada jego funkcjonowania polega na uzyskaniu uzależnionej od wartości natężenia pola magnetycznego siły tarcia występującej pomiędzy wolną powierzchnią kompozytu zamocowanego na stałe do przesuwnej części a powierzchnią nieruchomej części. Stąd wywodzi się jego nazwa – tłumik o zmiennym tarcu²⁾. Opisane urządzenie jest obecnie dostępne jako komercyjny produkt w firmie LORD [70]. Jego schemat konstrukcyjny został pokazany na rysunku 4.1.

4.2.1. Model tłumika o zmiennym tarcu

Dokładna znajomość parametrów tłumika jest niezbędnym warunkiem jego prawidłowego wykorzystania. Charakterystyka magnetomechaniczna tłumika, jego model są wymagane do zastosowania urządzenia na przykład w układzie aktywnego tłumienia drgań ze sterowaniem w pętli sprzężenia zwrotnego.

¹⁾ ang. MRC – *magneto-rheological composite*

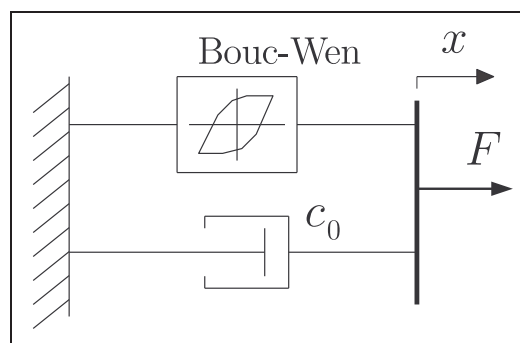
²⁾ ang. *variable friction damper*



Rysunek 4.1. Tłumik tarciový firmy LORD. Elementy składowe: 1 – obudowa, 2 – kompozyt magnetoreologiczny, 3 – cewka, 4 – tłoczek, 5 – przewody doprowadzające sygnał prądowy do cewki, 6 – uchwyty mocujące

Tematyka prac [13] oraz [120] obejmuje analityczne i eksperymentalne sprawdzenie efektywności działania półaktywnych systemów tłumienia w konstrukcjach budowlanych drgań, wywołanych czynnikami pochodzenia naturalnego, jak np. trzęsienie ziemi lub silne podmuchy wiatrów. Interesujące z punktu wykorzystania materiałów **SMART** jest to, iż do budowy mechanicznej części systemu tłumienia drgań wykorzystane zostały tłumiki z kompozytami magnetoreologicznymi o zasadzie działania identycznej do tłumika tarciovýgo zaprezentowanego w poprzednim rozdziale.

Wykonanie systemu sprzężenia zwrotnego do eliminacji drgań w konstrukcji (np. dla modelu budynku [120]) wymagało szczegółowego opisu charakterystyk poszczególnych elementów. Niezbędne stało się więc znalezienie odpowiedniego modelu tłumika oraz zidentyfikowanie jego parametrów. Autorzy obu prac, bazując na znanym modelu Bouc-Wena (rozdział 2.4.2), zaproponowali jego modyfikację w celu opisanie wykorzystywanych tłumików tarciových. Model strukturalny przyjętego rozwiązania przedstawiony został na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2. Strukturalny model wykorzystany do opisu tłumików tarciových z kompozytem magnetoreologicznym

Siłę powstającą w tłumiku można wyznaczyć następująco:

$$F = c_0 \dot{x} + \alpha z, \quad (4.1)$$

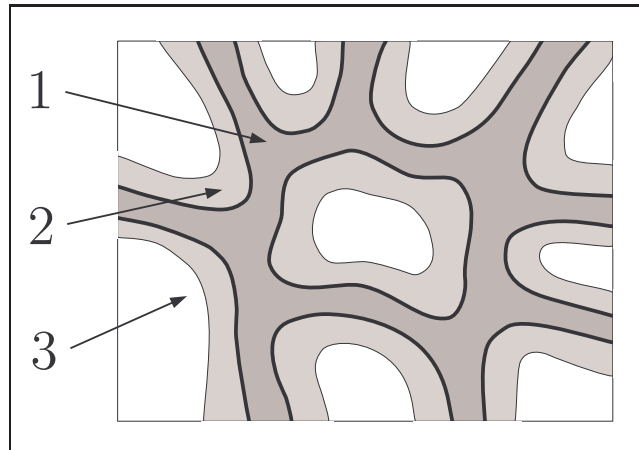
gdzie α oznacza współczynnik kształtu charakterystyki, z obliczane jest dokładnie tak samo, jak we wzorze (2.16). Dodatkowo autorzy omawianej pracy zamieścili rozszerzenie modelu tłumika o równania uwzględniające dynamiczne parametry wykorzystywanego urządzenia wraz układem zasilania, ponieważ bardzo ważnym dla sterowania tłumikiem elementem jest uwzględnienie powstających opóźnień w odpowiedzi na zadany sygnał wejściowy.

Eksperymentalnie przeprowadzone badania pokazały, że prawidłowo zbudowany model tłumika oraz odpowiednio dobrana strategia sterowania mogą znacząco zmniejszyć amplitudę drgań wywołanych np. trzęsieniem ziemi. Do zbadania wpływu sposobu sterowania tłumikami na efektywność tłumienia drgań konstrukcji zostało wybranych i porównanych osiem różnorodnych algorytmów. Najlepszy z nich pozwolił na zredukowanie o kilkadziesiąt procent – w porównaniu do pasywnych systemów tłumienia – maksymalnego przyspieszenia występującego w badanym układzie.

4.3. Kompozyty MR; badania na ściskanie

Kompozyty magnetoreologiczne mogą być wykorzystywane na kilka sposobów. Pierwszy z nich, tzw. tarciový, zaprezentowany został w poprzednim rozdziale. Jakkolwiek znalazł on swoje zastosowanie, to nie jest on przydatny do wyznaczenia właściwości samego materiału. Całkowicie odrębne podejście zaprezentowane jest w pracy [17]. Możemy tam odnaleźć wyniki badań eksperymentalnych oraz próbę modelowania samego materiału kompozytu w stanie ściskania.

Ściskanie w przypadku cieczy MR jest rzadko wykorzystywane. Spowodowane jest to trudnością w utrzymaniu cieczy między współpracującymi powierzchniami, jej nieściśliwością oraz niewielkimi w porównaniu do liniowych tłumików przemieszczeniami. W przypadku kompozytów MR nie ma tego typu problemów lub są one mniejsze. Porowaty materiał matrycy kompozytu wypełniony jest cieczą tylko do pewnego stopnia. Pozostałą jego część stanowi powietrze (rysunek 4.3). Powoduje to, iż ciecz może dość swobodnie się przemieszczać i przy większych odkształceniach zajmować miejsce uchodzącego powietrza.



Rysunek 4.3. Schemat wewnętrznej struktury kompozytu magnetoreologicznego. Matryca materiału utworzona jest przez zbiór otwartych, połączonych ze sobą komórek matrycy, których ścianki – 1 pokryte są warstwą cieczy magnetoreologicznej – 2. Pozostałą objętość kompozytu wypełnia powietrze – 3

4.3.1. Dwuwarstwowy model dla kompozytu z cieczą magnetoreologiczną

Autorzy pracy [17], dążąc do optymalizacji zachowania się badanych kompozytów MR ze względu na ilość pochłanianej energii w zależności od natężenia pola magnetycznego i wewnętrznej struktury materiału, zaproponowali własny model materiału. Został on wyprowadzony w oparciu o badania mechaniczne materiału w stanie ściskania oraz obserwacje mikroskopowe.

Model ten nazwany został dwuwarstwowym¹⁾ i bazuje na obserwacji wewnętrznej struktury kompozytu. Ciecz magnetoreologiczna, którą nasycona została matryca, pokrywając wewnętrzne ścianki komórek tworzy dwie warstwy. Pozostała część przestrzeni jest wypełniana przez powietrze. Schematycznie rozłożenie cieczy MR wewnątrz matrycy zostało pokazane na rysunku 4.3. Występowanie w strukturze kompozytu układu dwuwarstwowego implikuje dodatkowy mechanizm zmiany właściwości mechanicznych pod wpływem pola magnetycznego. Lepkość pozorna materiału wzrasta nie tylko na skutek występowania granicy plastyczności w cieczy MR, lecz także w procesie wzmacniania ścianek i krawędzi komórek matrycy pokrytych aktywną warstwą.

¹⁾ ang. 'two-layer' model

4.3.2. Zastosowania kompozytów MR do absorpcji energii uderzeń

Badanie materiału kompozytów dla stanu ścinania [17] prowadzone były z myślą o przyszłych zastosowaniach. Wśród potencjalnych celów przeznaczenia znajdują się różnego rodzaju pochłaniacze energii uderzeń, takie jak np. elementy wnętrza pojazdów, zagłówki, oparcia. Istniejące rozwiązania w tej dziedzinie oferują stałe dla wszystkich warunków użytkowania parametry mechaniczne. Oznacza to, iż np. parametry zagłówek foteli w samochodzie są dobierane tak, aby zapewnić komfort w czasie normalnej jazdy, jak i jednocześnie bezpieczeństwo w momencie gwałtownego uderzenia. Powstaje w tym momencie sprzeczność celów zwana w literaturze przedmiotu konfliktem sztywności. Rozwiązanie tego problemu upatruje się w wykorzystaniu kompozytów magnetoreologicznych, których właściwościami można sterować za pomocą zmiany natężenia pola magnetycznego. Niektóre propozycje rozwiązań urządzeń do tłumienia energii uderzeń z kompozytami MR zostały nawet już opatentowane [19].

Interesującym, jakkolwiek bardzo wybiegającym w przyszłość przykładem, jest próba zastosowania kompozytów MR do budowy aktywnej kamizelki kuloodpornej. Dużą wadą dotychczasowych rozwiązań w tej dziedzinie jest krępowanie ruchów osoby noszącej kamizelkę. Podobnie jak w przypadku zagłówek, istnieje tu konflikt pomiędzy bezpieczeństwem, które zapewnia sztywny i wytrzymały pancerz, a możliwością swobodnego poruszania się. Badanie w tym obszarze prowadzone są przez ISN¹⁾ w projekcie pod tytułem *Dynamic Armor*. Aktywna kamizelka, zbudowana na bazie kompozytu MR, funkcjonować miałaby dwustanowo. Zmiana jej parametrów, czyli usztywnienie i stworzenie ochronnego pancerza, następowałoby jedynie w momencie pojawienia się zagrożenia, a poza tym okresem miałaby umożliwiać swobodne poruszanie się.

4.4. Elastomery magnetoreologiczne

Elastomery magnetoreologiczne²⁾ są materiałami należącymi do grupy SMART i, podobnie jak ciecze i kompozyty MR, charakteryzują się zmianą pewnych fizycznych parametrów pod wpływem pola magnetycznego. Wyróż-

¹⁾ ISN – Institute of Soldier Nanotechnology, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

²⁾ ang. MRE – magneto-rheological elastomers

nia je jednak zupełnie inna budowa i sposób funkcjonowania. W przypadku cieczy MR drobne cząstki magnetyczne mają swobodę ruchu i mogą się przemieszczać w cieczy nośnej w zależności od sił jakie na nie oddziałują. Elastomery MR są natomiast ciałami stałymi powstałymi z połączenia dwóch składników. Pierwszym z nich, podobnie jak w cieczy MR, jest magnetycznie aktywny element w postaci drobnych cząstek o średnicy od kilku do kilkudziesięciu, a nawet kilkuset mikrometrów [61]. Drugim zaś, nazywanym także matrycą, jest ośrodek, w którym rozproszone i zawieszone są magnetyczne cząstki. Zazwyczaj rolę tę spełnia jakieś tworzywo sztuczne, najczęściej elastomer. Oba elementy są połączone i związane ze sobą na stałe. Cząsteczki posiadają niewielkie możliwości przemieszczania się. Oddziaływanie między cząsteczkami pod wpływem pola magnetycznego może doprowadzać do sprężystego odkształcenia ośrodka, który je otacza. Rozmieszczenie cząstek w matrycy może mieć charakter chaotyczny lub uporządkowany. W drugim przypadku, w procesie zestalania się matrycy (wiązania polimeru) wykorzystuje się zewnętrzne pole magnetyczne, które powoduje powstanie struktury podobnej jak w cieczy MR (rysunek 2.1b). Tak spolaryzowany i ukształtowany kompozyt nabiera anizotropowych właściwości mechanicznych, magnetycznych, elektrycznych i termicznych [11].

Elastomery MR z powodu swojej wewnętrznej struktury pracują w innym zakresie niż ciecz MR, czyli poniżej granicy płynięcia. Podstawowym stanem odkształcenia jest dla nich ścinanie, a głównym parametrem zależnym od pola magnetycznego – sztywność. Badania obejmują zarówno statyczne, jak i dynamiczne zmiany parametrów elastomeru w funkcji natężenia pola magnetycznego H . Statyczne badania eksperymentalne wykazują wzrost od 8 do 28% modułu G [101]. Efekt zmiany właściwości magnetomechanicznych tego typu materiału jest uzależniony głównie od aktywnego składnika magnetycznego, a więc rodzaju, ilości cząstek magnetycznych oraz sposobu ich rozłożenia.

W ostatnich kilku latach pojawiła się nowa generacja elastomerów magnetoreologicznych, w których jako medium magnetyczne zastosowano proszki z materiałów o gigantycznej magnetostrykcji, znanych w literaturze przedmiotu pod skrótem GMM¹⁾. Głównym ich reprezentantem jest grupa terfenoli o składzie chemicznym $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ i, najpowszechniej dziś stosowany, Terfenol-D ($Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9}$) produkowany przez firmę ETREMA. Współczynnik magnetostrykcji i odwrotnej magnetostrykcji Terfenolu-D, różniący

¹⁾ ang. *gigant magnetostrictive materials*

się o dwa rzędy od parametrów obu efektów krzyżowych dla niklu, stwarza szczególnie dogodne możliwości konstruowania i zastosowań kompozytów i elastomerów magnetoreologicznych, zarówno w stanie tzw. spolaryzowanym magnetycznie, jak i przy chaotycznym rozmieszczeniu proszku. Przegląd stanu wiedzy z zakresu GMM, jak i kompozytów z ich udziałem znaleźć można w pracach obcych [23,99], jak i własnych zespołu wrocławskiego [5,6].

4.4.1. Zastosowania elastomerów MR

Elastomery wypełniane metalicznymi proszkami jako materiały pasywne są znane od ponad 20 lat. Początkowo wykorzystywane były głównie jako elastyczne taśmy przewodzące elektrycznie lub magnetycznie, czujniki oraz elastyczne magnesy trwałe [37]. Wraz z poszukiwaniem nowych rodzajów materiałów SMART zauważono, iż stymulowane polem magnetycznym mogą być obiecującym rozwiązaniem w układach do tłumienia drgań.

Przykłady zastosowań elastomerów magnetoreologicznych można odnaleźć w przemyśle samochodowym. Są one wykorzystywane w systemach aktywnego tłumienia drgań. Firma FORD opatentowała łączniki z elastomerami MR, których główną cechą jest możliwość zmiany sztywności. W konstrukcji samochodu są one wykonane w postaci tulei mocowanej w zawieszeniu silnika [113] lub wahacza [108]. Sygnały elektryczne stymulujące pole magnetyczne sterują właściwościami materiału, który jest częścią układu mającego za zadanie zmniejszenie przenoszenia drgań pochodzących z silnika lub hamulców na karoserię.

Część II

Badania własne w zakresie cieczy MR

5. Badania układów z cieczą magnetoreologiczną

Tak jak to zaznaczono uprzednio (rozdział 2), badania zasadnicze z zakresu kompozytów magnetoreologicznych musiały być poprzedzone badaniami własnymi cieczy MR. Uznano bowiem, że tylko w ten sposób można opanować warsztat metodologiczny z zakresu wytwarzania materiałów magnetoreologicznych, eksperymentu, modelowania i identyfikacji oraz wykorzystać go następnie w badaniach głównych. Przyjęto ponadto, iż tak zdobyte doświadczenie, przy nadzwyczaj skąpej literaturze przedmiotu z zakresu kompozytów magnetoreologicznych, jest jedynym sposobem na rzetelne podjęcie tematu.

Procedurze badawczej i eksperymentalnej poddany został komercyjny, liniowy tłumik z cieczą magnetoreologiczną RD-1005-3 firmy Lord Corporation [71]. Został on wybrany na obiekt badań z kilku powodów. Jako jedno z nielicznych jest urządzeniem komercyjnym i produkowanym na masową skalę, co oznacza gwarancję producenta stabilności jego parametrów, w odróżnieniu od jednostek prototypowych. Jednocześnie tłumik liniowy jest jednym z najczęściej konstruowanych i stosowanych urządzeń wykorzystujących ciecz MR, a wybrany model można traktować jako reprezentanta szerokiej grupy konstrukcji. Wykorzystanie możliwości sterowanego tłumika z cieczą MR wymaga posiadania zidentyfikowanego modelu opisującego jego własności tłumiące. To z kolei implikuje pomiaru charakterystyk magnetomechanicznych w warunkach cyklicznych obciążeń mechanicznych, co zaprezentowano w tej części pracy.

Zasadę działania oraz schemat wewnętrznej budowy badanego tłumika zaprezentowano w jednym z poprzednich rozdziałów 2.3.2 (rysunek 2.10). Natomiast jego podstawowe parametry (według danych producenta) zestawiono w tabeli 5.1.

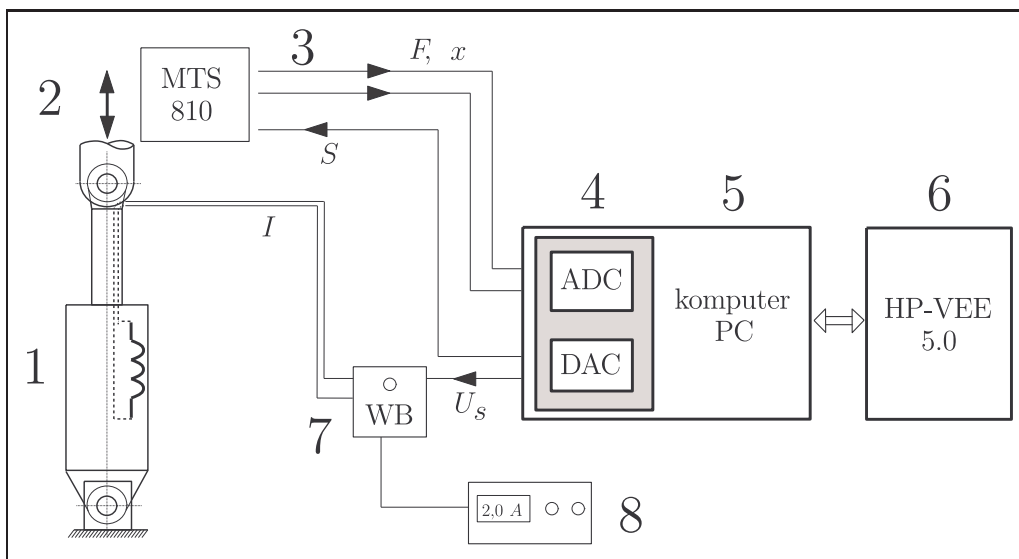
Tabela 5.1. Podstawowe dane tłumika RD-1005-3 podane przez producenta [71]

Parametr, cecha	Wartość
Siła tłumienia: dla $v = 0,05 \text{ m/s}$ oraz $I = 1 \text{ A}$ dla $v = 0,2 \text{ m/s}$ oraz $I = 0 \text{ A}$	$> 2224 \text{ N}$ $< 667 \text{ N}$
Żywotność (dla ustalonych parametrów)	$= 2 * 10^6$ cykli ($x_a = 13 \text{ mm}$; $f = 2 \text{ Hz}$; $I = 0 - 0,8 \text{ A}$)
Maksymalna temperatura pracy	$71 \text{ }^\circ\text{C}$
Czas reakcji (potrzebny do uzyskania 90% maksymalnej wartości siły przy zmianie natężenia prądu od 0 do 1 A i prędkości $0,05 \text{ m/s}$)	$< 25 \text{ ms}$
Długość: – maksymalna (tłok wysunięty) – minimalna (tłok schowany)	208 mm 155 mm
Zasilanie cewki: – natężenie prądu (wartość chwilowa) – natężenie prądu (praca ciągła) – napięcie zasilania	maksymalnie 2 A 1 A 12 V

5.1. Stanowisko badawcze

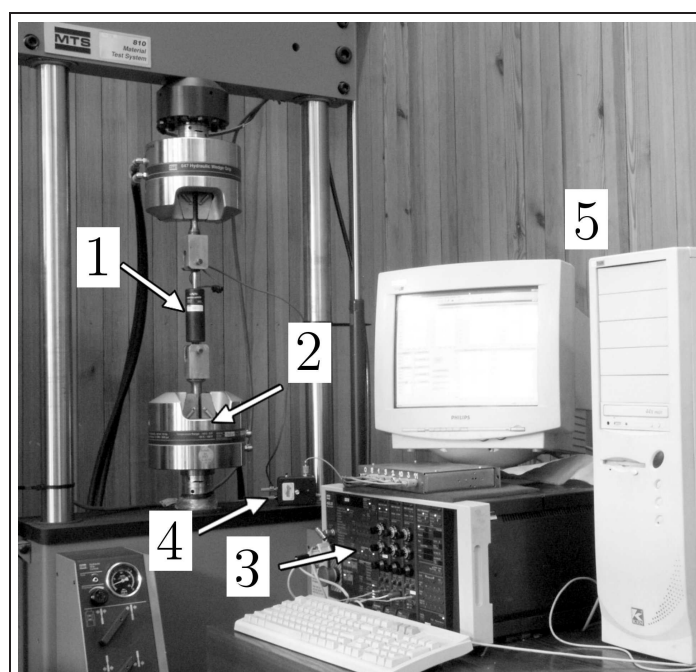
Przy projektowaniu i budowie stanowiska przyjęto, iż powinno ono umożliwiać testowanie szerokiej palety tłumików o dużym zakresie obciążeń przy sterowaniu zarówno siłą, przemieszczeniem tłoka, jak i natężeniem pola magnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości.

Na rysunku 5.1 pokazano schemat zbudowanego przez autora w Laboratorium Dynamiki Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej stanowiska do testowania tłumików z cieczami MR [110]. Składa się ono z trzech głównych elementów, a mianowicie: układu zadawania obciążenia mechanicznego, układu sterowania polem magnetycznym oraz układu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych. Obciążenia mechaniczne zadawano wykorzystując standardowy pulsator hydrauliczny MTS 810 wraz ze specjalnymi



Rysunek 5.1. Schemat stanowiska do badania tłumików z cieczami MR: 1 – badany obiekt, tłumik RD-1005-3, 2 – element wykonawczy i 3 – układ sterowania pulsatora hydraulicznego MTS 810, 4 – system akwizycji i przetwarzania danych, 5 – komputer pomiarowy PC, 6 – oprogramowanie do akwizycji i obróbki danych pomiarowych, 7 – sterowany zasilacz impulsowy Wonder Box, 8 – dodatkowy zewnętrzny zasilacz

uchwytyami przenoszącymi siłę na tłumik przy jednoczesnym wyeliminowaniu luzów montażowych.



Rysunek 5.2. Widok ogólny stanowiska do badania tłumików z cieczami MR: 1 – badany tłumik RD-1005-3, 2 – pulsator hydrauliczny MTS 810 wraz z układem sterowania – 3, 4 – urządzenie Wonder Box, 5 – komputer pomiarowy PC z systemem akwizycji danych pomiarowych

W celu zmiany natężenia pola magnetycznego wytwarzanego w cewce umieszczonej wewnątrz tłoka tłumika wykorzystano sterowany zasilacz impulsowy RD-3002-1 (Wonder Box Rheonetic Device Controller [65]). Urządzenie to umożliwiało zasilanie cewki sygnałem prądowym o modulowanej szerokości impulsów podawanych z częstotliwością 30 kHz w tzw. technice PWM¹⁾. Za pomocą sygnału napięciowego U_S podawanego z komputera sterowano zmianą szerokości impulsu i tzw. stopniem wypełnienia sygnału prądowego, co dawało zmianę natężenia pola magnetycznego oddziałującego na ciecz MR w szczelinie tłoka.

Przebieg obciążenia tłumika był generowany numerycznie w komputerze, a następnie wysyłany jako sygnał $S(t)$ przez układ przetworników do pulsatora. Taki sposób umożliwiał realizację programowalnych sygnałów o dowolnych przebiegach. Rejestrowano pierwotne sygnały: siły $F(t)$, przemieszczenia tłoka $x(t)$. Do akwizycji i bieżącego przetwarzania danych użyto karty pomiarowej firmy DATA Translation DT-3001 oraz programu stworzonego przez autora pracy przy pomocy pakietu HP-VEE 5.0.

5.2. Rezultaty badań eksperymentalnych

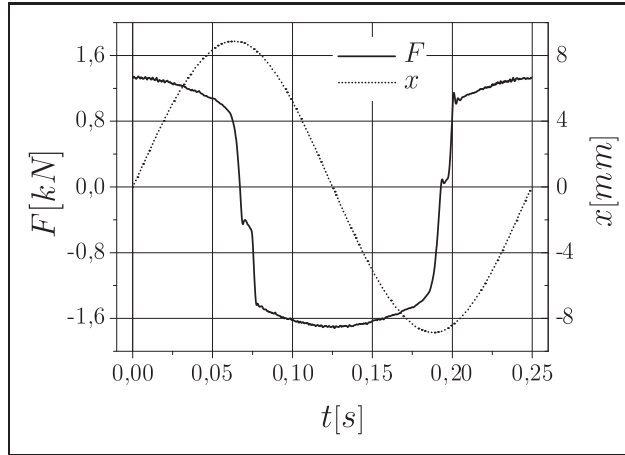
Program badań uwzględniał wpływ przemieszczenia tłoka $x(t)$, jego prędkości $v(t)$ oraz natężenia pola magnetycznego H na zachowanie tłumika w warunkach obciążeń cyklicznych [41]. Sygnałem wejściowym, wymuszającym było przemieszczenie tłoka o charakterze funkcji harmonicznego $x(t) = x_a \sin(2\pi ft)$. Jako odpowiedź traktowano przebieg sygnału siły F .

Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów F i x dla ustalonej wartości $U_S = 3\text{ V}$ pokazane zostały na rysunku 5.3. Natomiast zależności $F(x)$ oraz $F(v)$ w postaci pętli histerezy pokazane zostały na rysunku 5.4a i b.

Pole pętli na rysunku 5.4a odzwierciedla właściwości tłumiące, a dokładniej energię rozpraszaną przez tłumik. Przyjmuje się, iż energia mechaniczna przekazywana np. z drgającej konstrukcji w większości zamieniana jest w tłumiku na ciepło odprowadzane do otoczenia. Do obliczenia eksperymentalnie otrzymanych pól pętli histerezy wykorzystano algorytm opierający się na metodzie rozkładu sygnału na składowe harmoniczne przedstawiony w pracy [39].

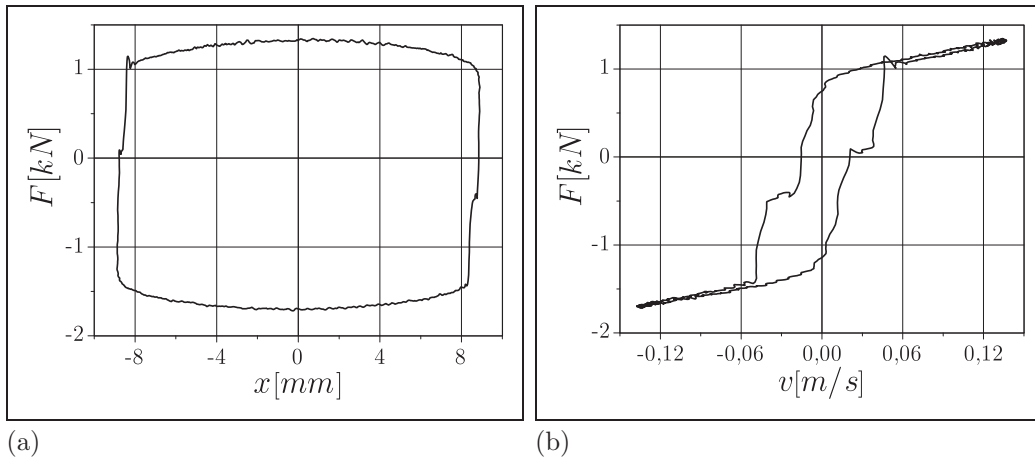
Na kolejnym wykresie, przedstawiającym zależność $F(v)$ (rysunek 5.4b), widać jak bardzo nieliniowy charakter posiada badany tłumik. Dokładnie

¹⁾ ang. PWM – pulse-width modulation



Rysunek 5.3. Przykładowe przebiegi siły $F(t)$ oraz przemieszczenia $x(t)$ dla badanego tłumika RD-1003-5. Wartość napięcia sterującego $U_S = 3 \text{ V}$, częstotliwość wymuszenia $f = 2,5 \text{ Hz}$

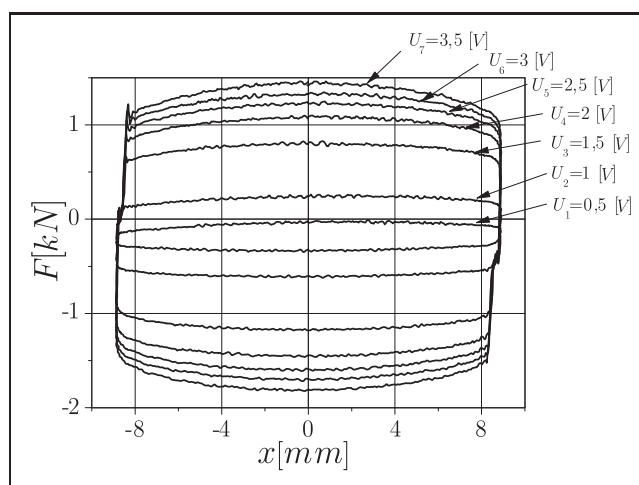
widoczne są dwa obszary. W przedziale od $-0,05$ do $+0,05 \text{ m/s}$ występuje wyraźna pętla histerezy, będąca niekorzystnym zjawiskiem, która zanika dla wyższych wartości prędkości.



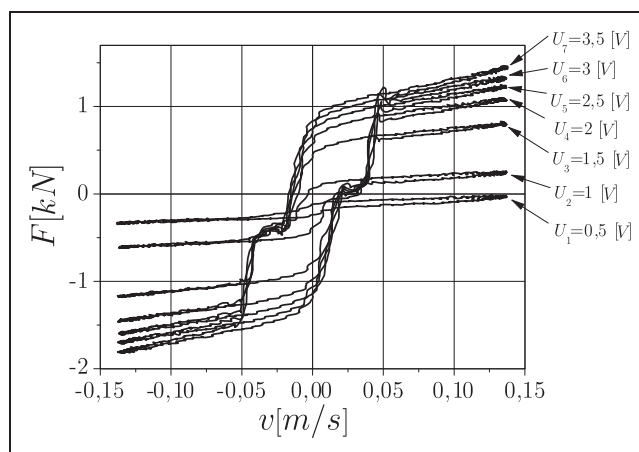
Rysunek 5.4. Pętle histerezy dla wybranych przebiegów we współrzędnych $F - x$ oraz $F - v$ dla wartości napięcia sterującego $U_S = 3 \text{ V}$, wymuszenia o amplitudzie $x_a = 9 \text{ mm}$ i $f = 2,5 \text{ Hz}$

Pod wpływem pola magnetycznego ciecz magnetoreologiczna zmienia swoje parametry. Wzrasta lepkość pozorna oraz granica plastyczności. Ma to bezpośredni wpływ na charakterystykę urządzenia jakim jest tłumik. By utrzymać tę samą amplitudę przemieszczenia, wymagane jest przyłożenie zdecydowanie większej siły. Jest to wyraźnie widoczne na rysunku 5.5, gdzie przedstawione zostały zbiorcze charakterystyki $F(x)$ i $F(v)$ wykonane przy kolejnych wzrastających wartościach U_S . Ukazane na rysunkach 5.5a i b pętle

histerezy zostały uzyskane przy sterowaniu sygnałem wymuszenia o ustalonej amplitudzie $x_a = 9 \text{ mm}$ i częstotliwości $f = 2,5 \text{ Hz}$.



(a)

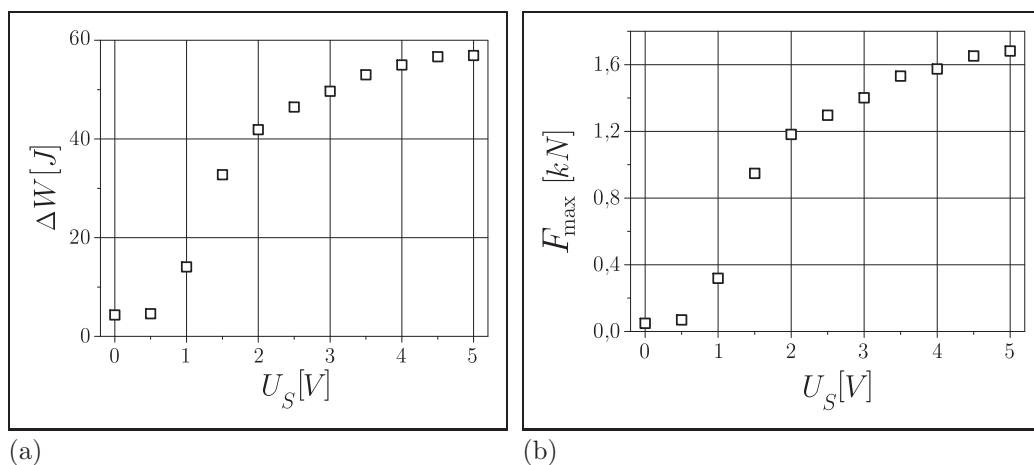


(b)

Rysunek 5.5. Pętle histerezy we współrzędnych $F - x$ oraz $F - v$ dla kolejnych narastających wartości napięcia sterującego U_S przy wymuszeniu o stałej amplitudzie przemieszczenia $x_a = 9 \text{ mm}$ i $f = 2,5 \text{ Hz}$

Kolejne pętle histerezy powiększają się oraz zmieniają swój kształt wraz z polem magnetycznym. Wielkość pola pętli we współrzędnych $F - x$, oznaczonej ΔW w zależności od U_S , została przedstawiona na rysunku 5.6a. Jak widać, jest ona nieliniowa. W najniższym zakresie napięcia sterującego U_S pole ma stałą wartość, co spowodowane jest charakterystyką zasilacza Wonder Box, generującego sygnał prądowy dopiero powyżej $U_S = 0,5 \text{ V}$. Istotne zmiany ΔW , rzędu 75% zakresu, są widoczne dla wartości U_S do 2 V . Powyżej charakterystyka zaczyna osiągać stan nasycenia. Podobnie wygląda charakterystyka drugiego – bardzo ważnego dla zastosowań tłumików parametru –

maksymalnej siły $F_{\max}$. Jej zależność od napięcia sterującego U_S pokazano na rysunku 5.6b.

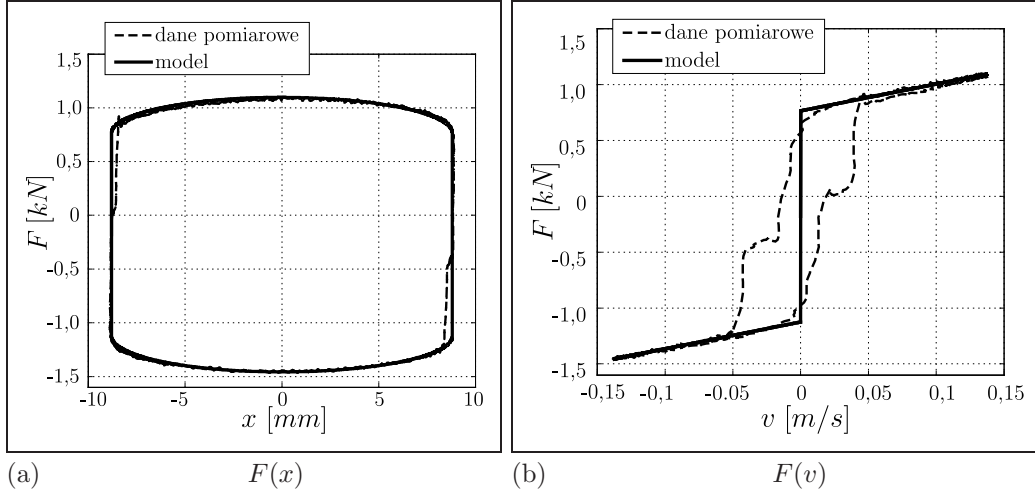


Rysunek 5.6. Zależność pola pętli histerezy ΔW we współrzędnych $F - x$ od napięcia sterującego U_S – (a) oraz zależność siły maksymalnej $F_{\max}$ od napięcia sterującego U_S – (b) dla wymuszenia przemieszczeniem o amplitudzie $x_a = 9 \text{ mm}$ oraz $f = 2,5 \text{ Hz}$

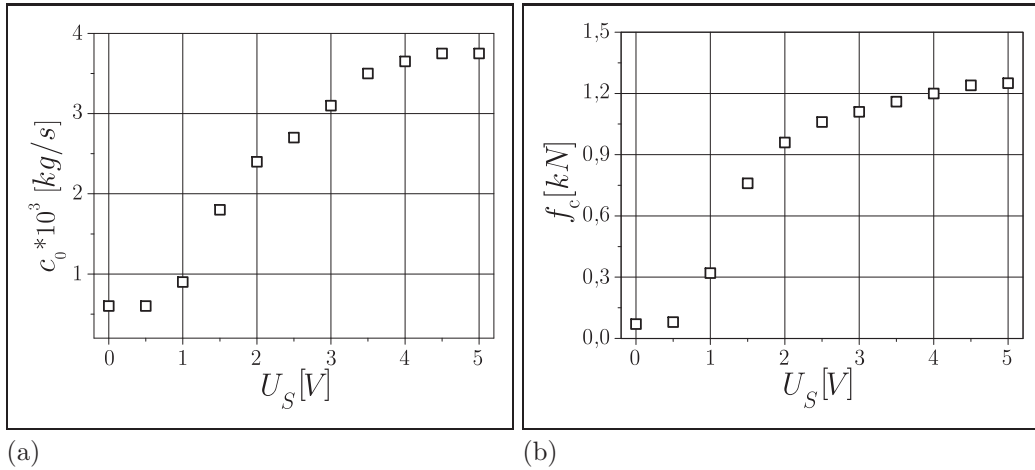
5.3. Opis tłumika RD–1003–5 za pomocą modelu Bingham

Bazując na danych eksperymentalnych opisanych w poprzednim rozdziale dokonano weryfikacji przydatności modelu Bingham (rozdział 2.4.1) do opisu tłumika RD–1003–5. Model numeryczny został stworzony z wykorzystaniem pakietu MATLAB/SIMULINK. Identyfikacji dokonano na podstawie porównania poszczególnych przebiegów rzeczywistych oraz otrzymanych na drodze symulacji. Poprawność odwzorowania charakterystyki badanego tłumika za pomocą modelu Bingham można ocenić na podstawie przykładowych pętli zaprezentowanych na rysunku 5.7. Pętle histerezy w układzie współrzędnych $F - x$ otrzymane z modelu dość dobrze odzwierciedlają rzeczywiste dane pomiarowe. Zupełnie inaczej wygląda to w układzie współrzędnych $F - v$. Tutaj model Bingham nie odwzorowuje pętli histerezy, dobrze opisuje jedynie działanie tłumika w górnym zakresie prędkości, powyżej $0,04 \text{ m/s}$.

Analizując kolejno poszczególne pętle histerezy we współrzędnych $F - x$ i $F - v$ wyznaczono wartości współczynników c_0 , f_c oraz f_0 w funkcji napięcia sterującego U_S . Wyniki poszczególnych aproksymacji, zebrane w postaci jednego wykresu, pokazane zostały na rysunku 5.8. Parametr c_0 w modelu



Rysunek 5.7. Porównanie wyników eksperymentalnych z modelem Bingham. Dane rzeczywiste uzyskane dla $U_S = 2 \text{ V}$ przy wymuszeniu o amplitudzie $x_a = 9 \text{ mm}$ i częstotliwości $f = 2,5 \text{ Hz}$. Parametry dla modelu Bingham $c_0 = 2400 \text{ kg/s}$, $f_c = 945 \text{ N}$ oraz $f_0 = -180 \text{ N}$



Rysunek 5.8. Wartości współczynników modelu Bingham w zależności od napięcia sterującego U_S

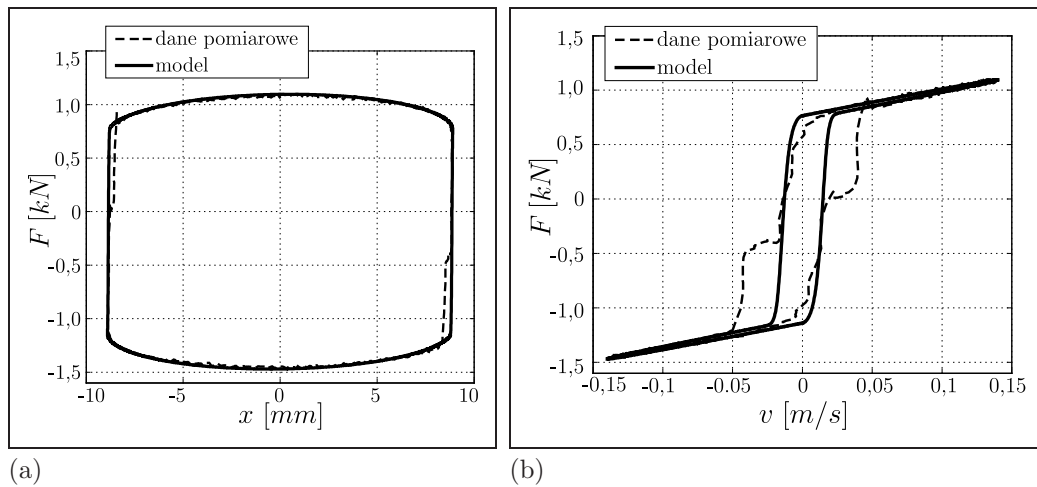
Bingham (patrz wzór (2.14)) opisuje właściwości lepkie i odpowiada za pochylenie zależności $F - v$ dla wyższych prędkości. Jego zmiany pod wpływem pola magnetycznego są bardzo wyraźne, podobnie jak parametru f_c , który odzwierciedla granicę plastyczności. Wartość parametru f_0 była stała dla wszystkich punktów pomiarowych i wynosiła -180 N .

Wyznaczenie zależności poszczególnych parametrów od wartości U_S pozwoliło na modyfikację modelu Bingham tak, by możliwe było opisanie tłumika z cieczą magnetoreologiczną.

5.4. Opis tłumika RD-1003-5 za pomocą modelu Bouc-Wena

Kolejnym modelem, który wykorzystano do opisanie charakterystyk badanego tłumika z cieczą MR, był podstawowy model Bouc-Wena¹⁾. Jego równania oraz schemat strukturalny zostały dokładnie przedstawione w rozdziale 2.4.2.

Podobnie jak poprzednio, numeryczny model został wykonany przy pomocy pakietu MATLAB/SIMULINK. Identyfikacji poszczególnych parametrów modelu dokonano bazując na danych eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale 5.2. Porównanie poszczególnych przebiegów rzeczywistych oraz otrzymanych na drodze symulacji pozwoliło na określenie wartości poszczególnych współczynników. Poprawność odwzorowania za pomocą modelu Bouc-Wena można ocenić na podstawie przykładowych pętli zaprezentowanych na rysunku 5.7.



Rysunek 5.9. Porównanie wyników eksperymentalnych z modelem Bouc-Wena we współrzędnych $F - x$ (a) oraz $F - v$ (b). Dane rzeczywiste uzyskano dla $U_S = 2 V$ przy wymuszeniu o amplitudzie $x_a = 9 mm$ i częstotliwości $f = 2,5 Hz$. Przyjęte parametry dla modelu Bouc-Wena: $\alpha = 10,6 N/m$, $c_0 = 2500 Ns/m$, $\kappa = 50 m^{-2}$ oraz pozostałe jak w tabeli 5.2

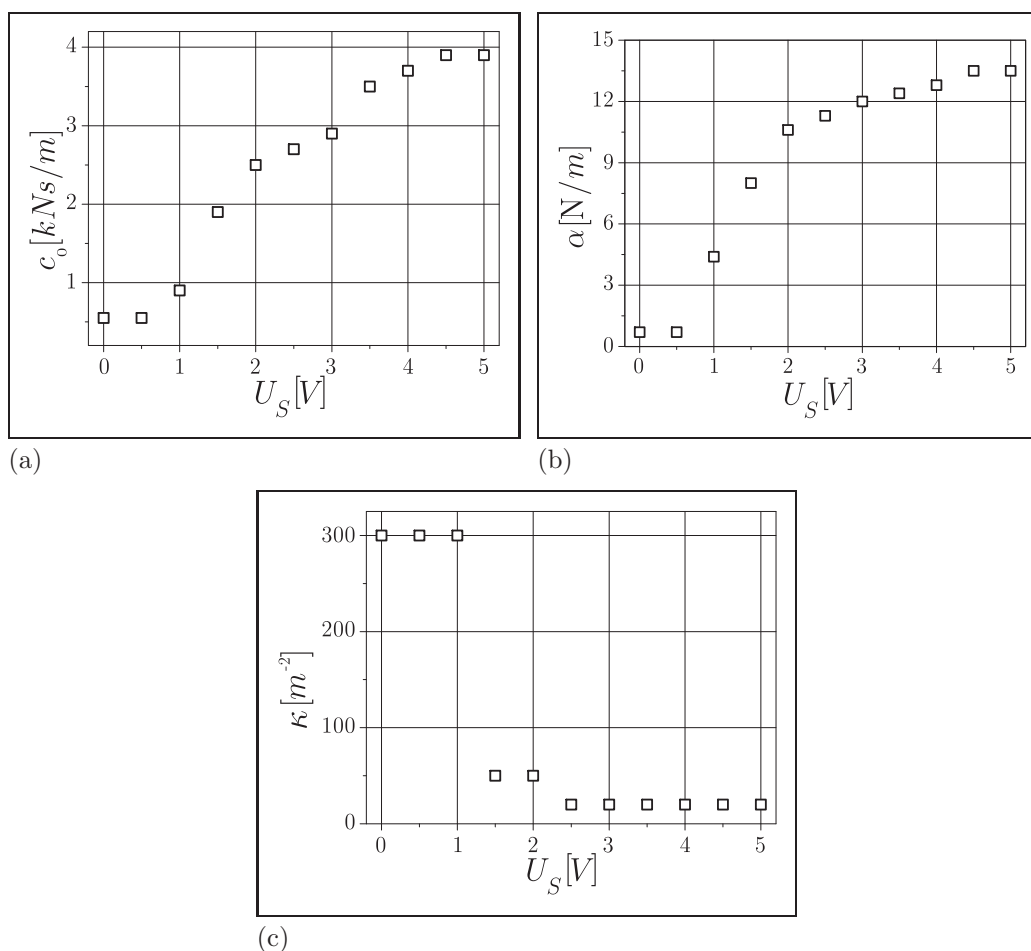
Większość parametrów otrzymanych z procesu identyfikacji przyjmuje stałą wartość, niezależną od pola magnetycznego. Wszystkie wyznaczone współczynniki przestawiono w tabeli 5.2. Jedynie parametry c_0 , α oraz κ

¹⁾ Istnieje także bardziej rozbudowana wersja tego modelu [106].

wykazują wyraźną zależność od napięcia sterującego U_S , którą w postaci wykresów pokazano na rysunkach 5.10a–c.

Tabela 5.2. Współczynniki do modelu Bouc-Wena

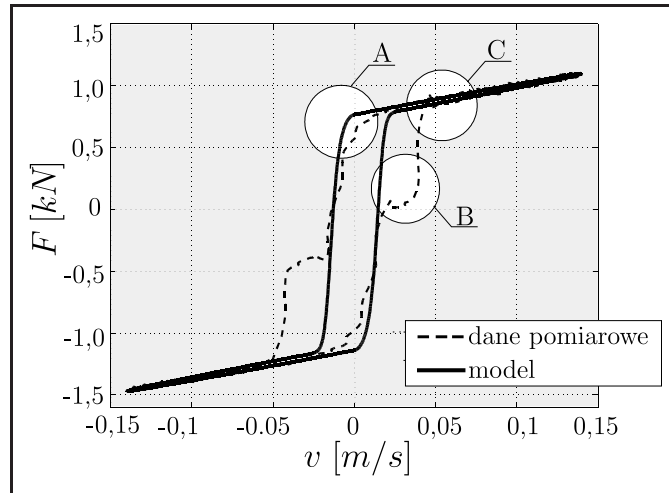
x_0	k_0	α	β	δ	c_0	n	κ
m	kN/m	N/m	m^{-2}	$[-]$	kNs/m	$[-]$	m^{-2}
0,085	2,2	0,7 – 13,5	330	$3 \cdot 10^6$	0,55 – 3,9	2	300 – 20



Rysunek 5.10. Wartości współczynników modelu Bingham w zależności od napięcia sterującego U_S

Model Bouc-Wena, jak widać na rysunku 5.9, oferuje bardziej dokładny opis rzeczywistych przebiegów. W porównaniu do modelu Bingham, potrafi w sposób bardziej szczegółowy odwzorować pętle histerezy w układzie współrzędnych $F - v$. Nie jest to jednak w pełni idealne przybliżenie; występujące uproszczenia nie pozwoliły na opis wszystkich zjawisk występujących w rzeczywistym obiekcie. Na rysunku 5.11 pokazane zostały pętle histerezy –

modelowa i rzeczywista – w układzie $F-v$ oraz punkty, w których zaznaczono występujące między nimi istotne rozbieżności. Jako szczegól A oznaczono miejsce przy zmianie znaku prędkości, w którym model nie odzwierciedla prawidłowo zakrzywienia. Miejsce C na wykresie 5.11 pokazuje górną część pętli histerezy, w której występuje niesymetryczność (różnica szerokości dla ujemnej i dodatniej siły przy $|v| > 2,5 \text{ mm/s}$). Niestety, model Bouc-Wena jest w pełni symetryczny i nie ma możliwości uwzględnienia tego efektu.



Rysunek 5.11. Porównanie wyników eksperymentalnych z modelem Bouc-Wena. Wyróżnione trzy miejsca A, B, C, gdzie występują największe zaobserwowane rozbieżności

Elementem, którego nie udało się opisać modelem Bouc-Wena, oraz który powodował największe zniekształcenie przebiegów rzeczywistych, był uskok oznaczony jako B. W literaturze przedmiotu dla podobnych badań nie zanotowano tego typu anomalii, a odnalezienie powodu ich powstawania zajęło sporo czasu. Początkowo podejrzewano błąd w mocowaniu tłumika do maszyny MTS 810. Przeprowadzone obserwacje wyeliminowały istnienie mechanicznych luzów w uchwytach. Sprawdzenie wnętrza urządzenia nie było możliwe bez zniszczenia obudowy. Kolejne, trafne – jak się okazało – podejrzenia o niesprawność, kierowane były w stronę wewnętrznego zbiornika utrzymującego ciśnienie 20 *bar* lub cieczy magnetoreologicznej, w której mogło znajdować się powietrze. Potwierdzeniem tych przypuszczeń okazały się badania opisane w pracy [119], gdzie w jednym z rozdziałów sprawdzany był wpływ ciśnienia w akumulatorze na charakterystyki tłumika. Uskoki zarejestrowane przy obniżonym ciśnieniu na przebiegach są bardzo podobne do otrzymanych w badaniach własnych, zaprezentowanych w tej pracy.

Częściowe rozwiązanie problemów, które wynikły podczas opisu badanego tłumika za pomocą modeli Bingham i Bouc-Wena, oferują inne modele, np. tzw. „tangensowy” [52] lub rozszerzony model Bouc-Wena [45, 106]. Drugi z nich jest bardziej rozbudowaną podstawową wersją i umożliwia dokładniejsze odzwierciedlenie pewnych szczególnych punktów (np. A na rysunku 5.11). Jednak jego wadą jest duży stopień uszczegółowienia i ilość współczynników, co może stwarzać problemy w procesie identyfikacji lub dalszego zastosowania. Model tangensowy natomiast oferuje podobny efekt z wykorzystaniem mniejszej liczby współczynników.

Rezultaty badań opisanych w rozdziale 5 oraz doświadczenie zdobyte przy ich uzyskaniu pozwoliły na podjęcie zasadniczego zagadnienia, jakim były pomiary i identyfikacja własności tłumiących w kompozytach magnetoreologicznych. Zagadnienia te sukcesywnie przedstawiano w dalszej części pracy.

Część III

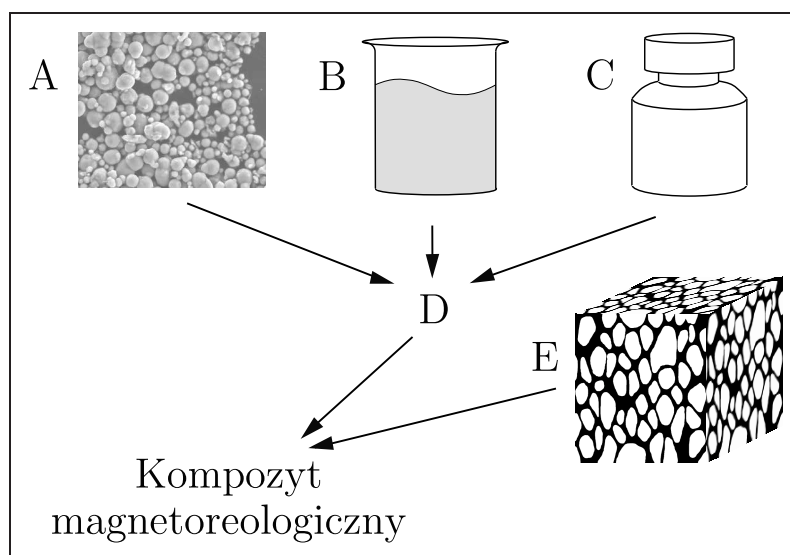
Kompozyty magnetoreologiczne

6. Badania eksperymentalne kompozytów magnetoreologicznych

6.1. Materiał

Kompozyt magnetoreologiczny wykorzystany do badań został wykonany samodzielnie przez autora. Półprodukty potrzebne do jego wytworzenia, takie jak ferromagnetyczny proszek żelaza, ciecz nośna, dodatki oraz materiał matrycy, zostały zakupione w firmach specjalizujących się w ich produkcji. Genezę powstania materiałów magnetoreologicznych, znane z literatury rozwiązania oraz ich zastosowania opisano szerzej w rozdziale 4.

Kompozyt magnetoreologiczny został wykonany jako połączenie dwóch podstawowych elementów, czyli cieczy magnetoreologicznej oraz materiału porowatego. Schemat procedury wykonywania kompozytów zaprezentowany zostały na rysunku 6.1. Pierwszym etapem w całym procesie było otrzymania



Rysunek 6.1. Schemat procesu wykonywania kompozytów magnetoreologicznych. Pierwszy etap: budowa cieczy magnetoreologicznej D z połączenia proszku żelaza karbonylkowego A, cieczy nośnej B i dodatków C. Etap drugi: utworzenie kompozytu poprzez nasylenie otrzymaną cieczą materiału porowatego E

nie cieczy magnetoreologicznej. W jej skład wchodził proszek materiału magnetycznie aktywnego, ciecz nośna oraz ewentualnie dodatki zapobiegające aglomeracji i sedymentacji. Przygotowaną w ten sposób mieszaninę nasycano materiałem porowaty (matrycę).

Ciecz magnetoreologiczna wykorzystana w badaniach została sporządzona według receptury podobnej do pierwszych cieczy stosowanych przez J. Rabinow [9]. Podstawą, magnetycznie aktywnym składnikiem wypełniającym ciecz, był proszek żelaza karbonylkowego, typu CC, produkowany przez firmę BASF. Specyfikację proszku, otrzymaną od producenta, podano w tabeli 6.1. Zgodnie z opisem, średnica cząstek wykorzystanego typu proszku wynosiła $\sim 5 \mu m$, natomiast gęstość nasypowa $\rho_n = 3,9 - 4,1 \text{ g/cm}^3$. Wykorzystany typ proszku, wśród wielu rodzajów oferowanych przez firmę BASF, jest jednym z kilku przeznaczonych do budowy cieczy magnetoreologicznych. Posiada on dodatkowo zewnętrzne pokrycie warstwą SiO_2 oraz charakteryzuje się ulepszonymi właściwościami związanymi z przepływem. Jako ciecz nośną

Tabela 6.1. Skład chemiczny proszku żelaza karbonylkowego, typu CC, wykorzystanego do wytworzenia cieczy i kompozytów magnetoreologicznych [3]

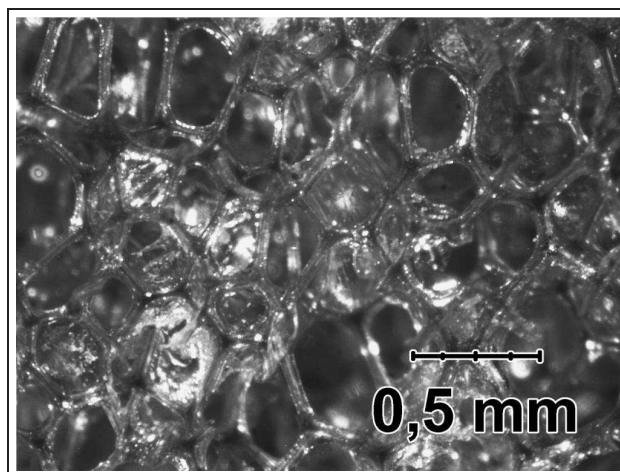
Fe	C	N	O	SiO_2 (warstwa zew.)
%	%	%	%	%
> 99,5	< 0,05	< 0,01	< 0,3	0,1

wykorzystano olej silikonowy POLSIL OM 200. Zawartość proszku żelaza w cieczy wynosiła wagowo 80%. Procedura wykonywania cieczy polegała na intensywnym rozprowadzaniu, za pomocą obrotowego mieszadła, proszku żelaza, podawanego małymi porcjami do oleju. Jednorazowo przygotowywano mieszaninę 240 g proszku i 60 g oleju.

Nie dodawano składników modyfikujących własności samej cieczy. Zmiana właściwości kompozytu powodowana obecnością dodatkowych związków chemicznych w cieczy magnetoreologicznej stanowi zagadnienie bardzo obszerne, które nie było poruszane w ramach tej pracy. Stworzona ciecz posiadała możliwie jak najprostszy skład, łatwy do wytworzenia i charakteryzujący się wyraźnym efektem magnetoreologicznym.

Matrycę kompozytu wykonano z poliuretanowej, elastycznej gąbki, której charakterystyczną cechą były otwarte pory [21]. Umożliwiało to swobodne penetrowanie przez cieczy MR jej wnętrza. Strukturę matrycy, zaobserwowaną przy użyciu mikroskopu świetlnego, pokazano na rysunku 6.2. Zauważyć

można dość regularną strukturę tzw. siatkową. Na podstawie obserwacji oceniono wielkość poszczególnych komórek równą $\sim 300 \mu m$. Porównanie rozmiarów porów i wielkości pojedynczej cząsteczki żelaza karbonylowego daje obraz skali wewnętrznej budowy kompozytu. Gęstość matrycy ρ wynosiła $32,96 \text{ kg/m}^3$, natomiast udział pustej, wypełnionej powietrzem przestrzeni w matrycy wynosił blisko 92%.



Rysunek 6.2. Struktura matrycy – materiał porowaty. Wyraźnie widoczna struktura siatkowa

Fazą kończącą wykonanie kompozytu było nasycanie matrycy uprzednio spreparowaną cieczą magnetoreologiczną. Proces ten realizowano metodą iniekcji za pomocą strzykawki z igłą lub poprzez zamaczanie i wyciskanie pozostałych wewnątrz pęcherzyków powietrza. Kontrolę ilości wtłoczonego do środka matrycy medium przeprowadzano regularnie ważąc próbki w czasie napełniania. W momencie całkowitego zastąpienia powietrza wewnątrz matrycy przez ciecz MR obserwowano jej wyciekanie na zewnątrz. Proces napełniania dążył więc do takiego stanu, by wewnątrz część objętości porów matrycy wypełniało powietrze, a jednocześnie ciecz pokrywała równomiernie wnętrze matrycy. Kompozyty, dla których wykonano badania, posiadały jednakową wartość wypełnienia cieczą MR. Wynosiła ona 70% objętości matrycy.

Zastosowanie parametrów cieczy i matrycy, jak opisano powyżej, miało na celu uzyskanie określonych cech kompozytu. Gąbczasta, elastyczna struktura matrycy umożliwiała utrzymanie cieczy MR w jednym miejscu, określonym zewnętrzną geometrią, jednocześnie umożliwiając jej swobodne oddziaływanie. Otwarte pory miały umożliwić swobodne przepływanie cieczy pomiędzy komórkami, ale ich wielkość powinny być na tyle mała, aby ciecz nie

wydostawała się na zewnątrz pod wpływem grawitacji. W wykonanych kompozytach zaobserwowano efekt wydostawania się cieczy magnetoreologicznej jedynie przy dużych odkształceniach, kiedy to gwałtowne zmniejszenie objętości komórek matrycy powodowało wypchnięcie ich zawartości na zewnątrz.

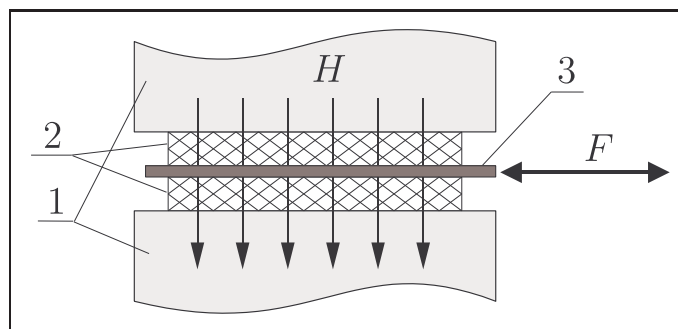
Problemem w przypadku cieczy magnetoreologicznych jest proces sedymentacji. Duże i ciężkie cząsteczki żelaza karbonylkowego pozostawione swobodnie w cieczy nośnej w ciągu kilku minut osiadają na dnie. Powoduje to segregację, a dalej nieprawidłowe funkcjonowanie cieczy i urządzenia do czasu jej ponownego, dokładnego ujednorodnienia. Dla kompozytów magnetoreologicznych taki efekt będzie występował tylko w ograniczonym zakresie. Proces sedymentacji wewnątrz kompozytu był hamowany dzięki siatkowej strukturze matrycy.

6.2. Próbkki do badań

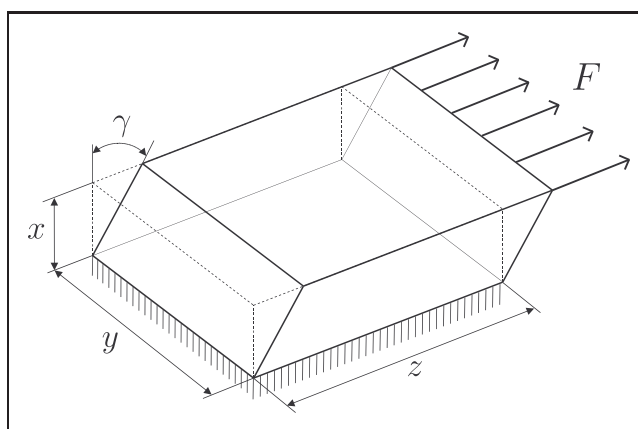
Próbkki do badań zostały ukształtowane w taki sposób, by można było uzyskać jednorodne ścinanie w badanym materiale. Wykonano je z dwóch identycznych kawałków kompozytu o kształcie prostopadłościanu i wymiarach odpowiednio: grubości 12 *mm*, szerokości 29 *mm* i długości 90 *mm*, zamocowanych symetrycznie po obu stronach tzw. płytki nośnej. Proces ich wytwarzania obejmował wycinanie matrycy, jej mocowanie oraz wypełnianie cieczą magnetoreologiczną. Dwie zewnętrzne powierzchnie przygotowywano w ten sposób, by za ich pomocą było możliwe bezpośrednie klejenie do nabiegunników rdzenia. Płytkę nośną wykonano z kompozytu epoksydowo-szklanego o grubości 2 *mm*. Schematyczne zamocowanie próbki na stanowisku pomiarowym w szczelinie rdzenia magnetycznego zostało pokazane na rysunku 6.3. Jak widać, to właśnie ze względów pomiarowych wygodne było badanie symetrycznie połączonych dwóch części rozdzielonych płytką nośną. Ta forma pozwoliła na uzyskanie stanu zbliżonego do czystego ścinania. Na rysunku 6.4 przedstawiono schematycznie jedną część próbki poddaną odkształceniu. Zewnętrzna powierzchnia, do której przykładana jest siła styczna, mocowana jest do płytki nośnej, natomiast utwierdzenie symbolizuje mocowanie do rdzenia układu magnetycznego.

W przeciwieństwie do sposobu funkcjonowania kompozytu jako elementu tarcowego¹⁾, jak to zaproponowano w pracy [11], badane próbki były zamocowane na stałe do rdzenia, bez możliwości przesuwania się. Ścinanie

¹⁾ W dorobku autora znajduje się wprowadzie cała grupa badań z wykorzystaniem kompozytów jako elementów tarczowych, ale ze względu na ich małe znaczenie dla tematyki



Rysunek 6.3. Schemat próbki z kompozytu MR do badań cyklicznych na ścinanie: 1 – rdzeń magnetyczny, 2 – kompozyt MR, 3 – płytka nośna, H – wektor pola magnetycznego oraz F – zewnętrzna siła ścinająca [42]



Rysunek 6.4. Schemat odkształcenia próbki z kompozytu magnetoreologicznego: x , y , z – wymiary zewnętrzne, γ – kąt odkształcenia postaciowego oraz F – zewnętrzna siła

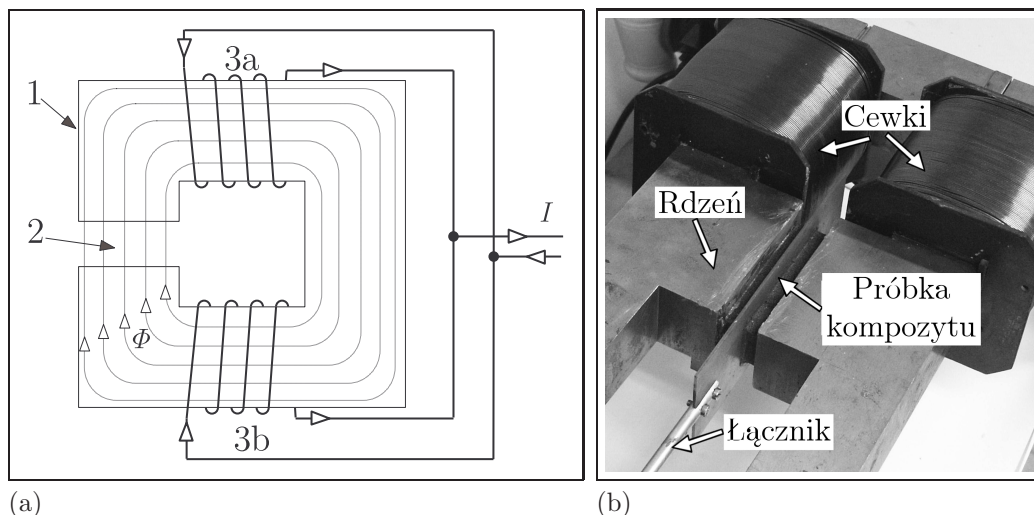
odbywało się w zakresie niewielkich odkształceń. Przyjęcie takich założeń było podyktowane chęcią uzyskania stanu ścinania, który byłby łatwy do wykorzystania w analizie i identyfikacji modelu materiału.

6.3. Stanowisko badawcze, aparatura

Poniżej opisane zostało stanowisko do badań kompozytów magnetoreologicznym dla odkształceń cyklicznych.

Główną częścią stanowiska badawczego był obwód magnetyczny. Składał się on z rdzenia oraz dwóch cewek. Zdjęcie wraz z opisem poszczególnych elementów tego obwodu pokazano na rysunku 6.5a i b. Cewki umieszczone zostały symetrycznie po obu stronach obwodu magnetycznego, tak aby wytwarzać jednolity strumień magnetyczny. W rdzeniu wykonana była szczelina

tej pracy nie zostaną one tu przytoczone. Odpowiednie informacje na ten temat można znaleźć w publikacjach [46–48].



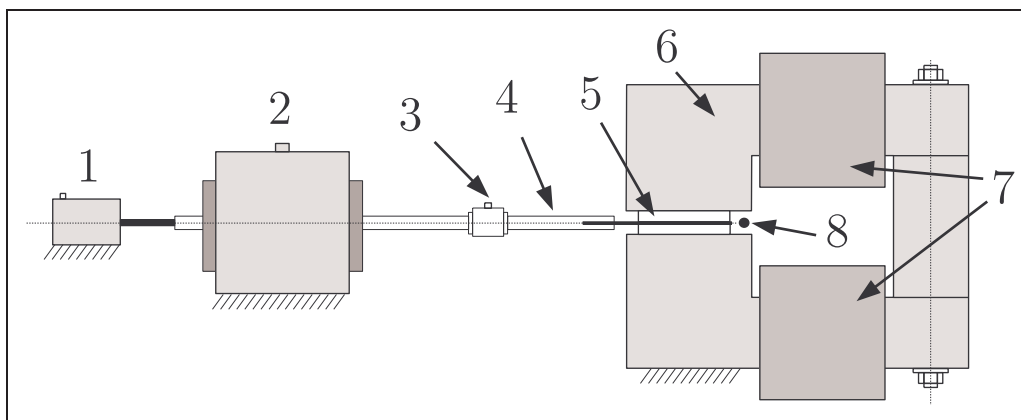
Rysunek 6.5. Główna część stanowiska do badania kompozytów MR; obwód magnetyczny wraz z zamocowaną próbką. Schemat obwodu – (a), oznaczono: 1 – rdzeń, 2 – strumień magnetyczny Φ w szczelinie rdzenia, 3a i 3b – cewki. Widok ogólny – (b)

o dwóch wzajemnie równoległych powierzchniach, wewnątrz której umieszczano badany materiał. Kształt rdzenia został tak dobrany, by wewnątrz szczeliny otrzymać wektor pola magnetycznego prostopadły do kierunku ściskania próbki. Modułowa budowa obwodu magnetycznego pozwalała na zmianę szerokości szczeliny w zależności od grubości badanego materiału. Maksymalna wysokość i długość próbki ograniczone były wymiarami poprzecznymi rdzenia w miejscu jej mocowania. W badaniach szczelina miała szerokość 26 mm. Poprzeczne wymiary próbek w stosunku do przekroju rdzenia były tak dobrane, by uniknąć wpływu warunków brzegowych i jednocześnie w momencie odkształcania się kompozytu nie wykraczać poza obszar oddziaływania jednorodnego pola magnetycznego. Duża sztywność rdzenia obwodu magnetycznego pozwalała na jego bezpośrednie wykorzystanie jako elementu konstrukcyjnego przenoszącego siłę. Badane próbki zamocowano bezpośrednio do jego powierzchni. Rdzeń wykonany został z materiału magnetycznie miękkiego tak, by charakteryzował się małym polem koercji.

Kompozyty magnetoreologiczne, podobnie jak i ciecze MR, należą do grupy materiałów, których zadaniem jest sterowane rozpraszanie energii. Zachodzi w nich głównie przemiana energii mechanicznej w ciepłą. Przy dużych ilościach powstałego ciepła, szczególnie dla odkształceń cyklicznych, pojawia się problem jego odprowadzania i utrzymania stałej temperatury badanego materiału. Ważne jest, by pojawiające się zmiany nie miały znaczącego wpływu

wu na parametry materiału. Duża masa i pojemność cieplna wykorzystanego do budowy układu rdzenia pozwoliły na szybkie odprowadzenie ciepła i stabilizację termiczną pomiaru.

Schemat stanowiska badawczego, jego mechanicznej części zaprezentowano na rysunku 6.6. W szczelinie rdzenia obwodu magnetycznego znajduje się badana próbka. Sygnał siły, generowany przez elektromagnetyczny wzbud-



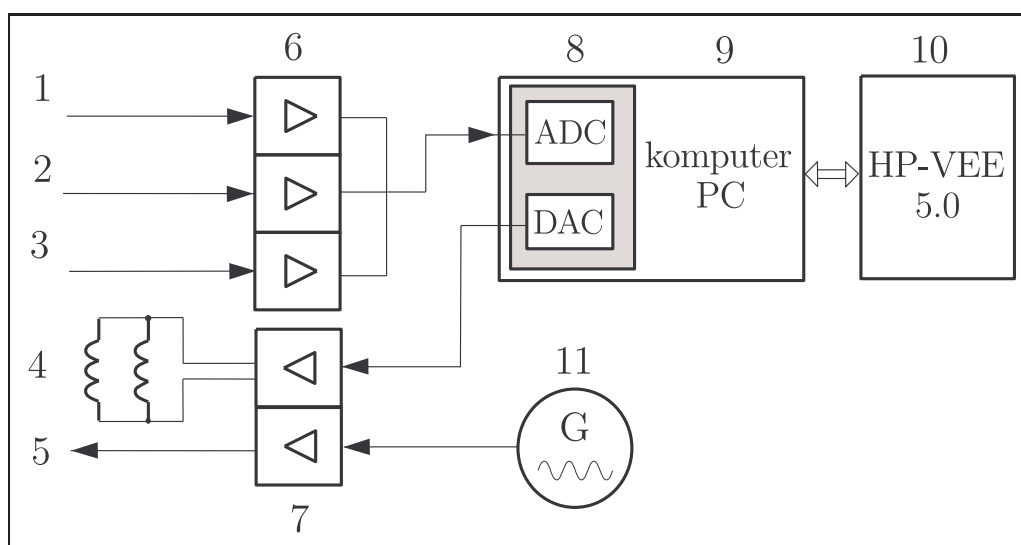
Rysunek 6.6. Schemat mechanicznej części stanowiska do badania kompozytów magnetoreologicznych: 1 – czujnik przemieszczenia, 2 – wzbudnik elektromagnetyczny, 3 – piezoelektryczny czujnik siły, 4 – łącznik, 5 – próbka z kompozytu magnetoreologicznego, 6 – rdzeń obwodu magnetycznego, 7 – cewki, 8 – czujnik pola magnetycznego (miejsce umieszczenia końcówki sondy pomiarowej)

nik, przekazywany był za pomocą układu aluminiowych łączników na płytkę nośną, do której przymocowano kompozyt. W środku, pomiędzy łącznikami, wbudowany został piezoelektryczny czujnik siły typu 208A02 firmy PCB umożliwiający dynamiczny pomiar jej wartości, który, w przeciwieństwie do układów tensometrycznych, był zupełnie niewrażliwy na pole magnetyczne. Sygnał z czujnika siły był wzmacniany przez układ wzmacniaczy przeznaczonych specjalnie do czujników piezoelektrycznych PCB i dalej przekazywany do systemu akwizycji danych, gdzie był zapisywany do dalszej obróbki.

Pomiar przemieszczenia odbywał się za pomocą indukcyjnego czujnika firmy HBM. Znajdował się on na jednej osi z czujnikiem siły i był zamocowany z drugiej strony wzbudnika. Dzięki temu uniknięto wpływu silnego pola magnetycznego pochodzącego od rdzenia, zachowując jednocześnie dokładne osiowanie względem próbki. Sygnał przemieszczenia poddawany był wzmocnieniu przez wysokiej klasy wzmacniacz firmy HBM, skąd dalej, podobnie jak sygnał siły, przesyłany był do systemu akwizycji danych.

Pomiar natężenia pola magnetycznego odbywał się za pomocą trójosiowego czujnika – hallotronu, którego końcówka pomiarowa umieszczona była bezpośrednio obok badanej próbki kompozytu w szczelinie rdzenia. Pomiar trzech wzajemnie prostopadłych składowych wektora H pozwolił ocenić rozkład pola wewnątrz szczeliny. Wartość głównej składowej pola magnetycznego, prostopadłej do wewnętrznych powierzchni tworzących szczelinę i odpowiedzialnej za oddziaływanie na badany materiał, pozostawała w całym zakresie pomiarowych o dwa rzędy większa od pozostałych składowych.

Drugą część układu badawczego, zawierającą system akwizycji danych i przetwarzania sygnałów, przedstawiono na schemacie 6.7.

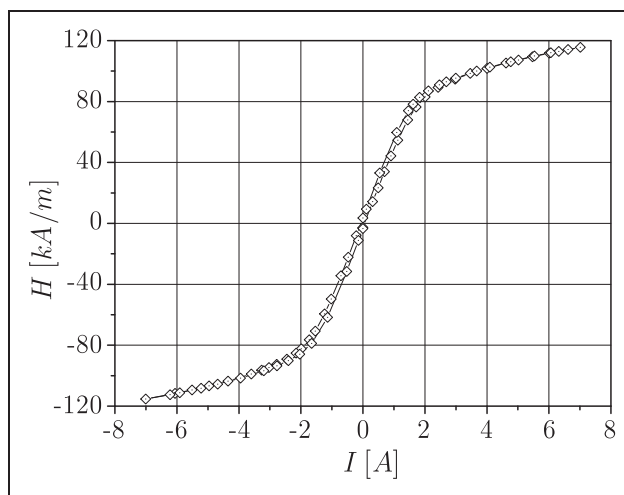


Rysunek 6.7. Schemat elektryczno-pomiarowej części stanowiska do badania kompozytów magnetoreologicznych: 1 – sygnał z czujnika siły, 2 – sygnał z czujnika przemieszczenia, 3 – sygnał z czujnika pola magnetycznego, 4 – cewki w obwodzie magnetycznym, 5 – sygnał do wzbudnika, 6 – zespół wzmacniaczy pomiarowych, 7 – zespół wzmacniaczy mocy, 8 – system akwizycji i przetwarzania danych, 9 – komputer PC, 10 – oprogramowanie odpowiedzialne za zbieranie i przetwarzanie danych pomiarowych, 11 – generator funkcyjny

Wzbudnik elektromagnetyczny realizował sygnał wymuszenia podawany poprzez układ wzmacniaczy z generatora. Dzięki temu możliwe było kształtowanie jego przebiegu i parametrów w zakresie amplitud jak i częstotliwości.

Wartość natężenia pola magnetycznego podawanego w czasie badań do kompozytu magnetoreologicznego uzależniona była od wartości natężenia prądu płynącego w uzwojeniu cewek. Ponieważ w czasie pomiarów wykorzystywano jedynie pole o stałej wartości, zmienianej skokowo dla kolejnych punktów pomiaru, generowanie pola magnetycznego odbywało się za pomocą regulowanego zasilacza (0–30 V, 20 A). Zakres natężenia pól magnetycznych

wykorzystywanych w badaniach ograniczony był możliwościami obwodu magnetycznego i mieścił się w zakresie $0 - 120 \text{ kA/m}$. Na rysunku 6.8 przedstawiono charakterystykę obwodu w postaci zależności $H(I)$ uzyskaną dla pełnego cyklu rozmagnesowania i namagnesowania rdzenia ($I = 0 \rightarrow I = \text{max} \rightarrow I = 0 \rightarrow I = -\text{max} \rightarrow I = 0$). Pomiaru dokonywano wraz z umieszczoną



Rysunek 6.8. Charakterystyka obwodu magnetycznego. Wartość natężenia pola magnetycznego H (składowej prostopadłej do powierzchni) mierzonego w szczelinie rdzenia w zależności od prądu płynącego w układzie cewek

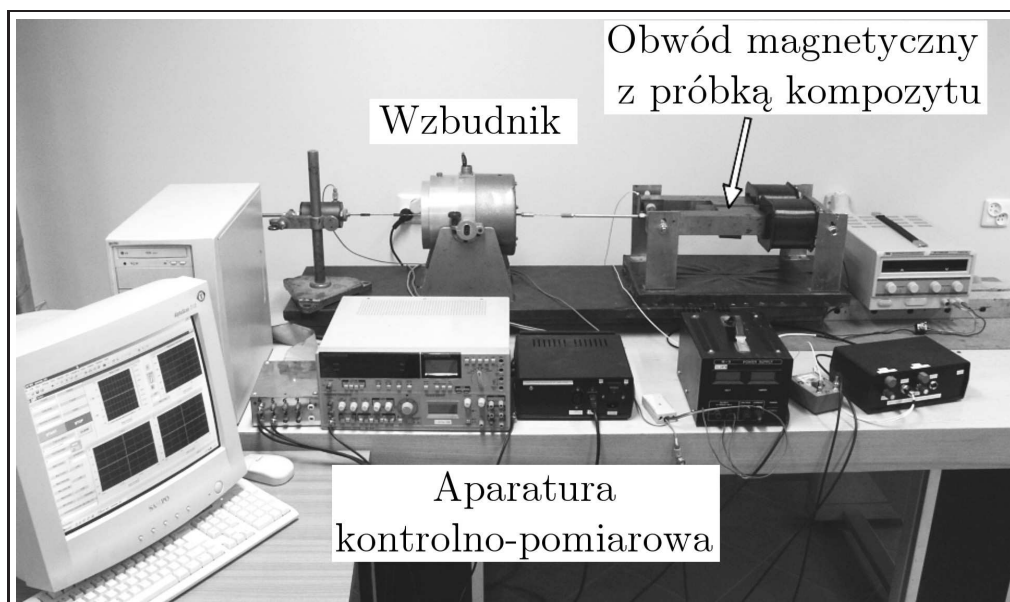
w szczelinie próbką. Powyżej wartości natężenia prądu $I = 2 \text{ A}$ następowało nasycenie magnetyczne obwodu powodujące, iż dalszy wzrost natężenia pola H wymagał zdecydowanie większej wartości I , co z kolei ograniczone było możliwościami zasilaczy, jak i odpornością cewek na przegrzanie.

Zbieranie danych pomiarowych oraz wysyłanie sygnałów sterujących realizowane było z wykorzystaniem komputera klasy PC wyposażonego w kartę MeasurementBoards PCI-DAS1602/16. Karta ta posiada 16-bitowe przetworniki cyfrowo-analogowe z możliwością próbkowania danych pomiarowych o maksymalnej częstotliwości 200 kHz . Częstotliwości mierzonych sygnałów mechanicznych w przeprowadzonych eksperymentach mieściły się w zakresie do 20 Hz . Z tego powodu nie była wymagana duża szybkość próbkowania i większość pomiarów odbywała się tak, by na jeden okres przebiegu otrzymać minimum 3000 punktów. Najważniejszym parametrem karty jako urządzenia pomiarowego była jej dokładność przetwarzania, małe zniekształcenia nieliniowe i mały dryft temperaturowy.

Ważną częścią składową systemu pomiarowego było oryginalne oprogramowanie stworzone przez autora przy pomocy pakietu HP-VEE 5.0. Jego zadaniem było odbieranie danych pomiarowych z przetworników, ich analiza

oraz prezentacja wyników. Dodatkowo powstały także programy do analizy i prezentacji wykorzystywane przy modelowaniu.

Widok ogólny stanowiska pomiarowego zawierającego opisane powyżej poszczególne elementy składowe został pokazany na rysunku 6.9.



Rysunek 6.9. Ogólny widok kompletnego stanowiska pomiarowego [43]

6.4. Eksperyment. Badania dla obciążeń cyklicznych

Sygnałem wymuszającym była zadawana siła F o przebiegu sinusoidalnym. Znajomość pola powierzchni S badanej próbki umożliwiła obliczenie naprężenia ścinającego:

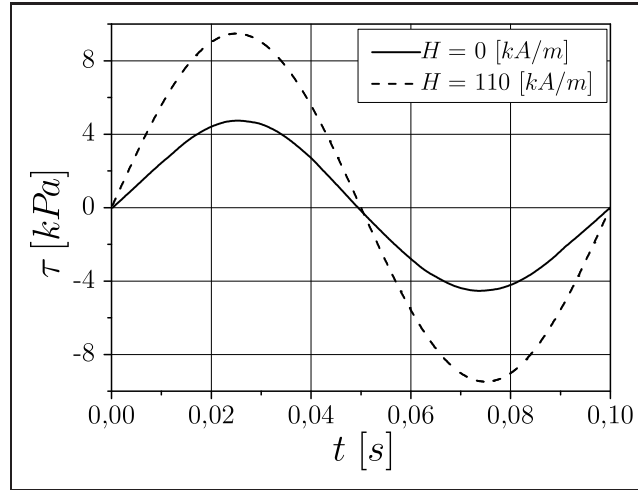
$$\tau = \frac{F}{2S} . \quad (6.1)$$

Jako odpowiedź układu rejestrowane było przemieszczenie płytki nośnej Δl , na podstawie którego obliczany był kąt odkształcenia postaciowego γ , a następnie odkształcenie postaciowe:

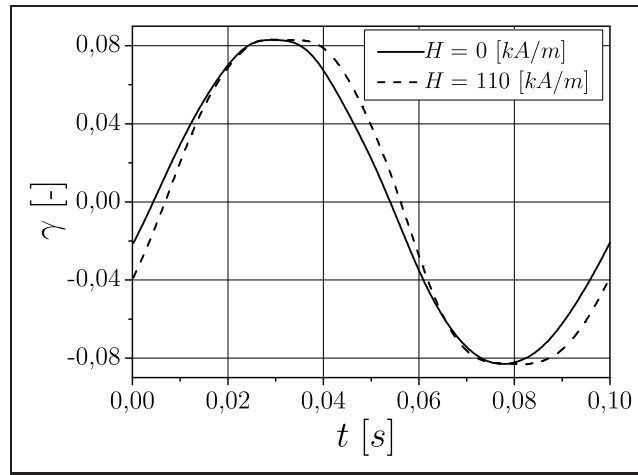
$$\frac{\gamma}{2} = \frac{\Delta l}{2x} , \quad (6.2)$$

gdzie x oznacza grubość próbki kompozytu.

Przykładowe przebiegi sygnałów $\gamma(t)$ i $\tau(t)$ dla dwóch skrajnych wartości pola magnetycznego (minimalnej $H = 0$ i maksymalnej $H = 110 \text{ kA/m}$) przedstawione zostały na rysunkach 6.10a i b. Stwierdzono, iż sygnały wymuszenia i odpowiedzi różnią się charakterem swojego przebiegu. Naprężenie ma wyraźnie harmoniczny przebieg, co jest wynikiem sposobu przeprowadzenia eksperymentu i sterowania wzбудnikiem. Natomiast sygnał odkształcenia



(a)



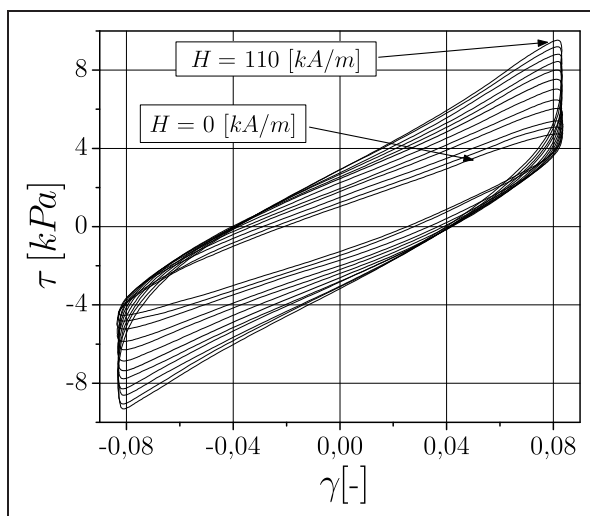
(b)

Rysunek 6.10. Przebiegi sygnałów $\tau(t)$ oraz $\gamma(t)$ dla dwóch skrajnych wartości natężenia pola magnetycznego $H = 0$ i $H = 110 \text{ kA/m}$

w momencie pojawienia się pola magnetycznego zaczyna przejawiać obecność wyższych składowych harmoniczných. Na rysunku 6.10b wyraźnie zauważalne jest „spłaszczenie” szczytowych części przebiegu oraz pojawienie się przesunięcia czasowego. Wpływ pola magnetycznego na właściwości materiału kompozytu jest bardzo dobrze widoczny. Zmiana natężenia pola magnetycznego H od 0 do 110 kA/m powoduje ponad dwukrotny wzrost amplitudy naprężenia τ_a przy zachowaniu jednakowej amplitudy odkształcenia.

Ponieważ badania prowadzone były dla obciążeń o charakterze cyklicznym, wyniki pomiarów na wykresach prezentowane są po jednym okresie przebiegu sygnału, w postaci pętli histerezy $\tau - \gamma$. Paletę pętli, uzyskaną dla kolejno narastających wartości natężenia pola magnetycznego przy zachowaniu stałej wartości amplitudy odkształcenia, zaprezentowano na ry-

sunku 6.11. Wzrost pola magnetycznego powoduje powiększenie pola pętli histerezy, zmianę jej kształtu oraz wzrost maksymalnego naprężenia.



Rysunek 6.11. Zbiór pętli histerezy $\tau - \gamma$ uzyskany dla kolejnych wartości pola magnetycznego od 0 do 110 kA/m (z krokiem co 10 kA/m) przy stałej wartości amplitudy odkształcenia $\gamma_a = 0,084$ i częstotliwości wymuszenia $f = 10 \text{ Hz}$

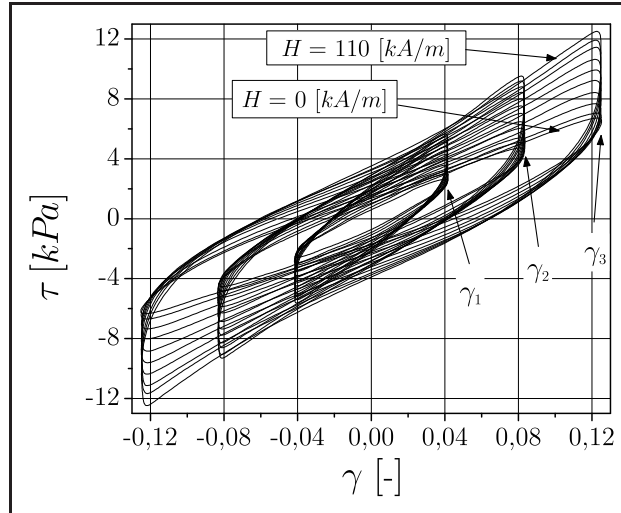
Wy tłumaczenia wymaga sposób w jaki przeprowadzono eksperyment uzyskując taki zestaw pętli i zachowując stałą wartości amplitudy odkształcenia. Sterowanie realizowane było w układzie zamkniętym za pomocą sygnału naprężenia (praktycznie siły generowanej przez wzbudnik na podstawie sygnału z generatora). Amplituda sygnału naprężenia dobierana była za pomocą ręcznej nastawy w taki sposób, by zachować, niezależnie od innych warunków, założoną amplitudę odkształcenia.

Wpływ amplitudy odkształcenia przeanalizowano wykonując kolejną serię badań. Na rysunku 6.12 przedstawione zostały wykresy zależności $\tau - \gamma$ wykonane dla trzech różnych wartości amplitud odkształcenia przy kolejnych wartościach natężenia pola magnetycznego. Pozwala to na zaobserwowanie wpływu obu tych parametrów na kształt pętli histerezy. Jak można zauważyć, wartość maksymalnego naprężenia i pola pętli histerezy zależy zarówno od natężenia pola magnetycznego, jak i od wartości amplitudy odkształcenia.

6.4.1. Właściwości tłumiące materiału

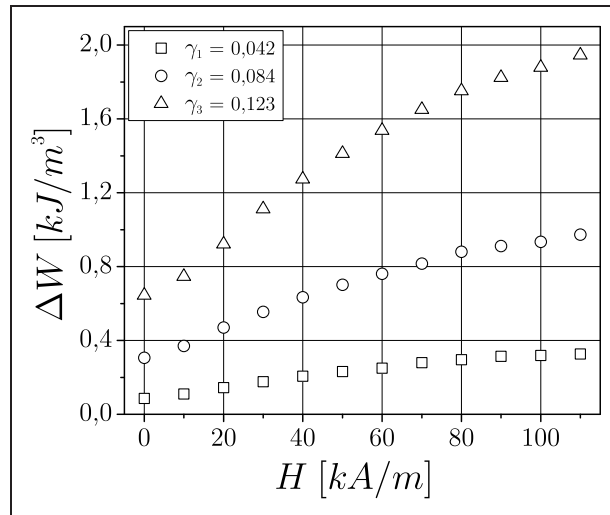
Jako parametr opisu właściwości tłumiących przyjęto energię rozpraszaną przez materiał kompozytu magnetoreologicznego i wyrażoną przez pole pętli histerezy ΔW w układzie współrzędnych $\tau - \gamma$.

Wartość ΔW otrzymaną na podstawie eksperymentu obliczano wykorzystując algorytm oparty na analizie i syntezie sygnałów za pomocą transfor-



Rysunek 6.12. Pętle histerezy uzyskane dla narastających wartości pola magnetycznego od 0 do 110 kA/m i trzech wartości amplitud odkształcenia dla częstotliwości wymuszenia $f = 10\ Hz$

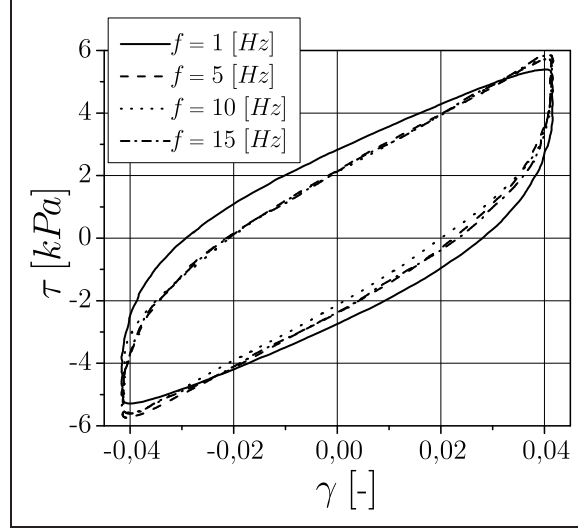
maty Fouriera [39]. Rysunek 6.13 prezentuje otrzymane wartości ΔW dla wybranej częstotliwości 5 Hz przy trzech różnych wartościach amplitudy odkształcenia. Jak widać, zmiany w funkcji natężenia pola magnetycznego nie mają charakteru liniowego.



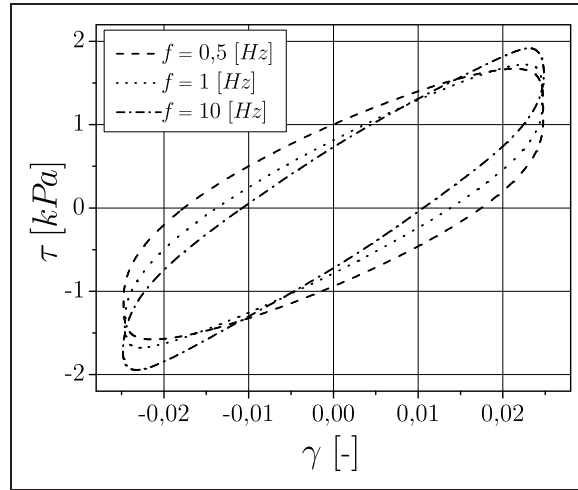
Rysunek 6.13. Zmiany pól pętli histerezy ΔW w funkcji natężenia pola magnetycznego dla częstotliwości wymuszenia 5 Hz i trzech wartości amplitud odkształcenia [49]

Kompozyt magnetoreologiczny jest – podobnie jak ciecz magnetoreologiczna – materiałem, w którym można się spodziewać wystąpienia efektów lepkich. W celu sprawdzenia ich wpływu wykonano badania eksperymentalne dla różnych częstotliwości wymuszenia. Rezultaty przedstawione zostały

na rysunkach 6.14a i b. Zakres badanych częstotliwości dobierany był z myślą o ewentualnych zastosowaniach kompozytów jako elementów sterowanych tłumików drgań w konstrukcjach mechanicznych. Widać wyraźnie, iż pętle



(a) $H = 110 \text{ kA/m}$, $\gamma_a = 0,042$

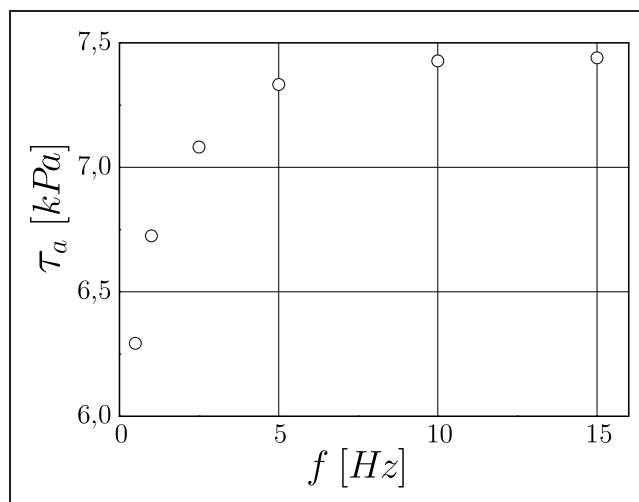


(b) $H = 30 \text{ kA/m}$, $\gamma_a = 0,025$

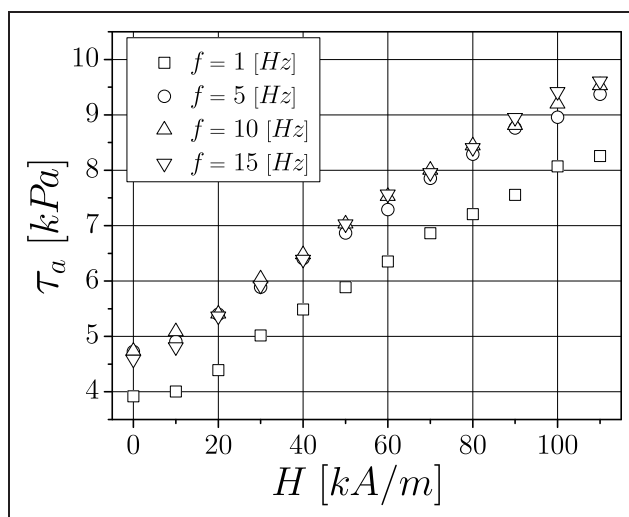
Rysunek 6.14. Pętle histerezy we współrzędnych $\tau - \gamma$ dla różnych częstotliwości wymuszenia przy ustalonej wartości natężenia pola magnetycznego [44]

histerezy $\tau - \gamma$ dla częstotliwości poniżej 5 Hz zmieniają się mimo zachowania stałej wartości natężenia pola magnetycznego i amplitudy odkształcenia. Powyżej tej granicy następuje ustabilizowanie zarówno wartości amplitudy naprężenia, jak i kształtu pętli. Takie zachowanie się materiału może świadczyć o występowaniu efektów lepkich, których wpływ na charakterystykę materiału maleje wraz ze wzrostem częstotliwości obciążenia, a więc szybkości ścinania.

Analizę wpływu częstotliwości wykonano w oparciu o dwie podstawowe cechy pętli: amplitudę naprężenia oraz pole powierzchni – energię rozproszoną przez materiał w jednym cyklu. Na rysunku 6.15 pokazane zostały zmiany amplitudy naprężenia, jakie otrzymano dla różnych wartości częstotliwości wymuszenia przy stałej wartości natężenia pola magnetycznego i amplitudy odkształcenia.

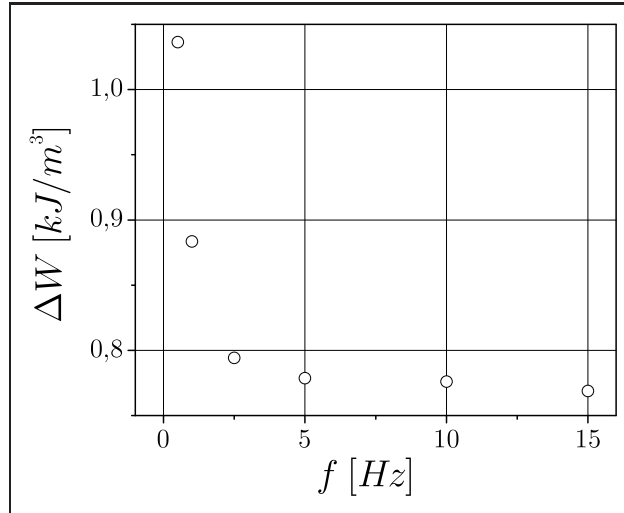


Rysunek 6.15. Zmiany amplitudy naprężenia w funkcji częstotliwości wymuszenia przy stałej wartości natężenia pola magnetycznego $H = 60 \text{ kA/m}$ i $\gamma_2 = 0,084$



Rysunek 6.16. Zmiany wartości amplitudy naprężenia τ_a w funkcji częstotliwości wymuszenia dla kolejnych wartości natężenia pola magnetycznego, $\gamma_2 = 0,084$

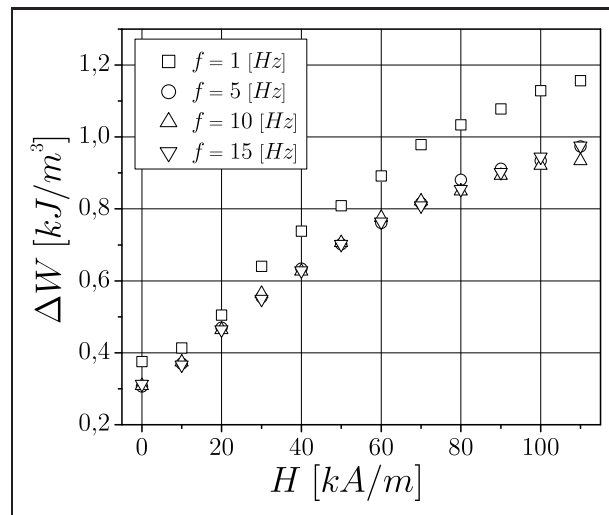
Zależność τ_a od częstotliwości wymuszenia ma podobny charakter dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego, jakie oddziałuje na kompozyt. W przebadanym zakresie zmienności H występują niewielkie różnice dla f powyżej 5 Hz , co można zaobserwować na rysunku 6.16.



Rysunek 6.17. Zmiany pól pętli histerezy w funkcji częstotliwości wymuszenia przy stałej wartości natężenia pola magnetycznego $H = 60 \text{ kA/m}$ i $\gamma_2 = 0,084$

Zmiany pól pętli histerezy w funkcji częstotliwości wymuszenia mają podobny charakter jak amplitudy naprężenia; powyżej 5 Hz są niewielkie, co zostało pokazane na rysunku 6.17.

Zbiórny rysunek 6.18 prezentuje natomiast zmiany ΔW od f dla różnych



Rysunek 6.18. Zmiany pól pętli histerezy ΔW w funkcji częstotliwości wymuszenia dla kolejnych wartości natężenia pola magnetycznego, $\gamma_2 = 0,084$

wartości natężenia pola magnetycznego. Podobnie jak dla amplitudy naprężenia nie ma znaczących zmian dla częstotliwości powyżej 5 Hz w całym zakresie H , wartości pól pętli są zbliżone.

6.4.2. Wybrane problemy eksperymentalne

Jednym z poważniejszych problemów, z jakimi borykał się autor, był brak punktu odniesienia umożliwiającego porównanie osiągniętych rezultatów badań. W literaturze przedmiotu temat kompozytowych materiałów magneto-reologicznych jest w fazie badań wstępnych i tylko kilka ośrodków zajmuje się podobną problematyką. Z tego powodu nie była możliwa weryfikacja ilościowa wniosków i wyników w oparciu o niezależne źródła. Dotyczy to również oceny żywotności zmęczeniowej kompozytu oraz wpływu czasu na poszczególne parametry.

Do badań pomiarowych wykonana została seria próbek, której wyniki, pomimo zachowania tych samych parametrów i procesu wytwarzania co opisane w rozdziale 6.1, cechowała różnica dochodząca do 10% (zależność amplitudy naprężenia od pola magnetycznego przy tej samej wartości odkształcenia). Prawdopodobną przyczyną mogły być różnice w ilości materiału magnetycznego (żelaza karbonyłkowego) wykorzystanego do budowy próbki kompozytu. Matryce z kolei uzyskiwano z tego samego kawałka materiału i miejsc położonych blisko siebie, co powinno było zapewnić powtarzalność parametrów.

Nie sprawdzano natomiast wpływu liczby cykli obciążenia na stałość otrzymywanych wyników, czyli właściwości cyklicznych i wytrzymałości zmęczeniowej. W czasie, w którym były wykonywane badania, nie zaobserwowano zmian. Trwałość kompozytów magneto-reologicznych można szacować jedynie sugerując się np. wynikami uzyskanymi dla cieczy magneto-reologicznych. Badania takie prowadzi firma LORD, zainteresowana żywotnością produktów, które wprowadzane są na rynek. Trwałość cieczy zależy od wielu parametrów, w tym głównie od jej składu i budowy. Czynniki, które mogą wpływać destrukcyjnie, są temperatura i prędkość ścinania. Wiele zależy więc od tego w jakich warunkach pracuje ciecz MR oraz ile energii musi rozproszyć. Efekt zużycia, tzw. zagęszczania w trakcie użycia¹⁾, który występował w starszych typach cieczy, powodował wzrost zerowej (bez pola magnetycznego) lepkości cieczy w tłumikach już po około 200 tys. cykli obciążania. Firma LORD poradziła sobie z tym efektem i nie występuje on w obecnie sprzedawanych cieczach nawet po 10 mln. cykli [9]. Można się go natomiast spodziewać w cieczach przygotowywanych eksperymentalnie.

¹⁾ ang. *IUT – in use thickening*

Problem trwałości matrycy, jak i całego kompozytu pozostaje zatem sprawą otwartą. Jediną wskazówką dotyczącą wytrzymałości gąbek nasyconych cieczami MR może być trwałość tłumików tarcowych firmy LORD. Stwierdzono bowiem, iż po 2 *mln.* cykli programu obciążenia wartość siły maksymalnej spada z 90 do 70 *N* [8].

7. Model materiału

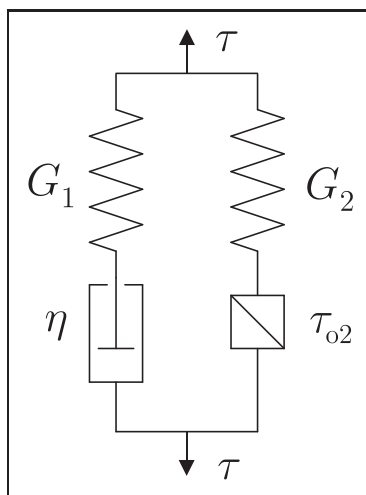
Uzyskanie wyników z badań eksperymentalnych dla kompozytów magnetoreologicznych stało się podstawą prac na rzecz identyfikacji właściwości tych materiałów. Przewidując ich zastosowania w różnego rodzaju aktywnych urządzeniach tłumiących, za kluczowe zagadnienie uznano budowę równań konstytutywnych.

Przystępując do budowy modelu materiału dla kompozytu magnetoreologicznego, przyjęto następujące założenia ogólne, a mianowicie:

- model powinien umożliwiać opis zachowania się materiału w złożonym stanie naprężenia, nawet jeśli w pierwszej fazie będzie identyfikowany jedynie dla czystego ścinania,
- parametry modelu mechanicznego powinny być możliwie proste, tzn. co najwyżej liniowe. Jednocześnie parametry te mogą być zależne od natężenia pola magnetycznego.

Na podstawie własnych badań eksperymentalnych założono, że materiał kompozytu jest ciałem sprężysto-lepkoplastycznym, tzn. jest ciałem lepko-sprężystym do granicy plastyczności i lepkoplastycznym powyżej [50, 51]. Należy zaznaczyć, że opis takiego materiału i identyfikacja jego modelu jest złożona – granica plastyczności zależy bowiem od prędkości obciążania, natomiast powyżej granicy plastyczności mamy do czynienia z dwoma rodzajami odkształceń nieodwracalnych, a mianowicie: zależnych od skali czasu i zależnych od trajektorii odkształcenia, przez co nie możemy tu zastosować zasady superpozycji.

Dotychczas najczęściej stosowano tego typu modele w reologii gruntów lub opisie tworzyw sztucznych [73]. Jednakże należy zwrócić uwagę, że w literaturze przedmiotu do chwili obecnej nie ma zadowalającego opisu takiego ciała. W pracy przeanalizowano możliwość opisu takiego materiału czteroparametrowym modelem reologicznym [22, 53], którego schemat przedstawiono na rysunku 7.1. Ciało Maxwella połączono równolegle z ciałem sprężysto idealnie plastycznym (element plastyczny połączony szeregowo ze sprężystym).



Rysunek 7.1. Schemat modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego

Dla takiego modelu związki konstytutywne możemy zapisać następująco:

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

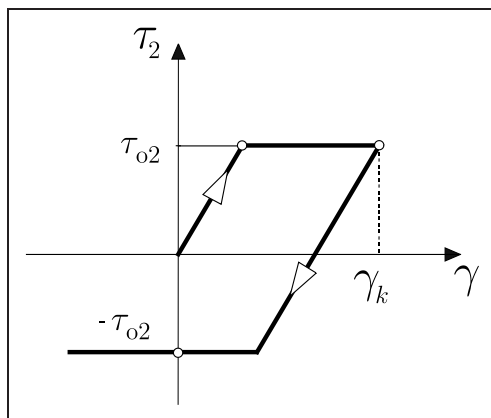
gdzie

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

jest związkiem między naprężeniem i odkształceniem w ciele Maxwella oraz

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

γ_k jest wartością odkształcenia w chwili, gdy w elemencie idealnie plastycznym rozpoczęto proces odciążania. Zależność $\tau_2(\gamma)$ dla ciała sprężystego idealnie plastycznego ilustruje rysunek 7.2.



Rysunek 7.2. Zależność odkształcenie – naprężenie dla ciała sprężystego idealnie plastycznego

Przy takich założeniach możemy wyprowadzić związki między naprężeniem i odkształceniem w postaci:

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

gdy w elemencie drugim nie jest przekroczona granica plastyczności, oraz w przeciwnym razie:

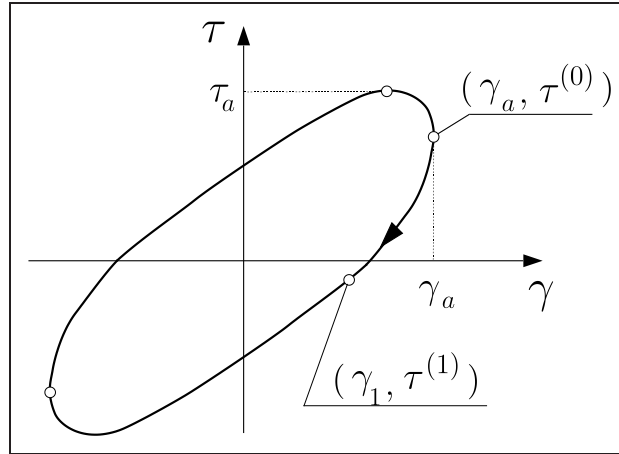
$$\tau + \frac{\eta}{G_1} \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} + \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau} , \quad \text{gdy} \quad \tau_2 = \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau} . \quad (7.5)$$

7.1. Pole pętli histerezy dla modelu przy sterowaniu odkształceniem

Dla przyjętego modelu materiału wyprowadzona została zależność na energię rozproszoną w czasie jednego okresu cyklicznego ścinania. Ze względu na uproszczenie obliczeń przeprowadzono je przy założonej postaci odkształcenia, a mianowicie:

$$\gamma(t) = \gamma_a \cos \omega t . \quad (7.6)$$

Punkt rozpoczęcia obliczeń znajduje się na malejącej gałęzi pętli histerezy. Jego współrzędne to $(\gamma_a, \tau^{(0)})$, gdzie $\tau^{(0)} = \tau(0)$ (oznaczony na rysunku 7.3).



Rysunek 7.3. Schematyczne przedstawienie pętli histerezy z naniesionymi punktami charakterystycznymi wykorzystanymi do obliczeń

Położenie amplitud naprężenia i odkształcenia nie pokrywa się. Rozwiązując równanie (7.4)

$$\tau + t_\gamma \dot{\tau} = G_2(\gamma + t_\tau \dot{\gamma}) - G_2 \gamma_a + \tau_{o2} , \quad (7.7)$$

gdzie:

$$t_\gamma = \frac{\eta}{G_1}, \quad t_\tau = \eta \frac{G_1 + G_2}{G_1 G_2} = t_\gamma \left(1 + \frac{G_1}{G_2} \right) \quad (7.8)$$

z warunkiem początkowym: $\tau(0) = \tau^{(o)}$, otrzymujemy:

$$\tau(t) = (A \cos \omega t - B \sin \omega t) + e^{-\frac{t}{t_\gamma}} (\tau^{(o)} - A - \tau_{o2} + G_2 \gamma_a) + \tau_{o2} - G_2 \gamma_a, \quad (7.9)$$

gdzie

$$A = G_2 \gamma_a \frac{\omega^2 t_\tau t_\gamma + 1}{(1 + \omega^2 t_\gamma^2)} \quad \text{i} \quad B = G_2 \gamma_a \frac{\omega(t_\tau - t_\gamma)}{(1 + \omega^2 t_\gamma^2)}. \quad (7.10)$$

Powyższe równanie obowiązuje aż do chwili, gdy w drugim elemencie nie zostanie osiągnięta granica plastyczności $\tau_2 = -\tau_{o2} \rightarrow \gamma_1 = \gamma_a \cos \omega t_1 = \gamma_a - \frac{2\tau_{o2}}{G_2}$. Następnie rozwiązując równanie (7.5) z warunkami początkowymi: $\gamma = \gamma(t_1)$ i $\tau = \tau(t_1)$ otrzymujemy odpowiedź modelu w postaci:

$$\tau(t) = (A_1 \cos \omega t - B_1 \sin \omega t) + C_1 e^{-\frac{t-t_1}{t_\gamma}} - \tau_{o2}, \quad (7.11)$$

gdzie

$$\begin{aligned} A_1 &= G_1 \gamma_a \frac{t_\gamma^2 \omega^2}{1 + t_\gamma^2 \omega^2}, \\ B_1 &= B, \\ C_1 &= \tau^{(1)} - A_1 \cos \omega t_1 + B \sin \omega t_1 + \tau_{o2}. \end{aligned} \quad (7.12)$$

Podobne obliczenia można wykonać dla drugiej, wzrastającej części pętli histerezy. Energię rozproszoną w materiale, czyli pole pętli histerezy, możemy wyznaczyć ze wzoru:

$$\Delta W = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \tau(t) \dot{\gamma}(t) dt. \quad (7.13)$$

Rozwiązanie powyższego równania zawiera cały szereg złożonych członów. Aby można było poddać je dalszej analizie i identyfikacji, należało przyjąć szereg następujących przybliżeń¹⁾. Ponieważ $t_1 \in [0, \frac{\pi}{\omega}]$, możemy założyć, że $e^{-\frac{t}{t_\gamma}} \approx 1$ dla $t \in [0, t_1]$ oraz $e^{-\frac{t-t_1}{t_\gamma}} \approx 1$ dla $t \in [t_1, \frac{\pi}{\omega}]$. Otrzymujemy wtedy symetryczną pętlę histerezy, a naprężenie dla malejącej połówki pętli jest równe:

$$\tau(t) = A \cos \omega t - B \sin \omega t + \tau^{(o)} - A, \quad t \in [0, t_1], \quad (7.14)$$

oraz

$$\tau(t) = A_1 \cos \omega t - B \sin \omega t + \tau^{(1)} - A_1 \cos \omega t_1 + B \sin \omega t_1, \quad t \in [t_1, \frac{\pi}{\omega}]. \quad (7.15)$$

Energię rozproszoną w materiale, pole pętli histerezy, otrzymujemy ostatecznie w postaci:

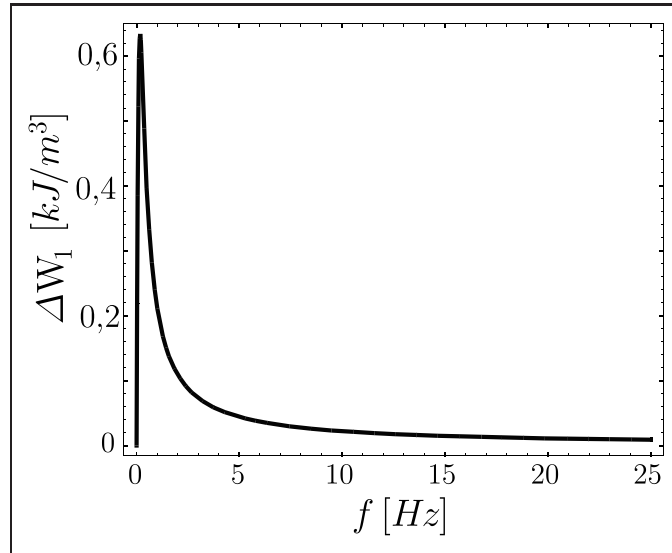
$$\Delta W = \frac{G_1^2 \pi \eta \omega \gamma_a^2}{G_1^2 + \eta^2 \omega^2} + 4 \left(\tau_{o2} \gamma_a - \frac{\tau_{o2}^2}{G_2} \right) = \Delta W_1 + \Delta W_2. \quad (7.16)$$

¹⁾ Poprawność przyjętych założeń upraszczających sprawdzono po procesie identyfikacji wykonując obliczenia numeryczne dla konkretnych wartości parametrów otrzymanych dla danych eksperymentalnych.

Pierwszy człon w powyższym równaniu, oznaczony dalej ΔW_1 , związany jest z właściwościami lepki materialu, natomiast drugi – ΔW_2 – z odkształceniem plastycznym. Jeżeli częstość ω lub lepkość η dąży do nieskończoności, otrzymujemy model ośrodka sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym¹⁾. Pole pętli histerezy przestanie być funkcją prędkości odkształcania i będzie równe ΔW_2 :

$$\lim_{\eta\omega \rightarrow \infty} \Delta W = 4 \left(\tau_{o2}\gamma_a - \frac{\tau_{o2}^2}{G_2} \right) = \Delta W_2 . \quad (7.17)$$

W celu pokazania wpływu częstości na zmiany ΔW_1 zamieszczono przykładowy wykres (rysunek 7.4) wykonany dla następujących danych: $G_1 = 60 \text{ kPa}$, $\gamma_a = 0,084$, $\eta = 10 \text{ kNs/m}^2$.



Rysunek 7.4. Zależność energii dyssypacji ΔW_1 od częstości wymuszenia

7.2. Identyfikacja parametrów modelu

Kolejnym etapem pracy, będącym logicznym następstwem wykonanych wcześniej analiz, było sprawdzenie możliwości zaproponowanego w poprzednim rozdziale modelu materialu do odwzorowania rzeczywistych przebiegów uzyskanych dla badanych kompozytów magnetoreologicznych.

Mimo niewielkiej liczby parametrów do wyznaczenia (η , G_1 , G_2 , τ_{o2}) przyjęty model, dany wzorami (7.4) i (7.5), charakteryzował się dużym stopniem

¹⁾ Równoległe połączenie elementu sprężystego ze stałą sprężystości G_1 z elementem sprężysto idealnie plastycznym ze stałą sprężystości G_2 i granicą plastyczności τ_{o2} . Model ten omówiony zostanie w kolejnych rozdziałach.

komplikacji (cztery gałęzie opisywane różnymi, łączonymi równaniami różniczkowymi). W celu uproszczenia procesu identyfikacji jego parametrów podzielony został on na dwa etapy. Do każdej części wykonano odrębną grupę badań eksperymentalnych mających na celu weryfikację przyjętych założeń i ich ewentualną akceptację lub odrzucenie.

7.2.1. Identyfikacja – etap I. Główny zakres częstotliwości

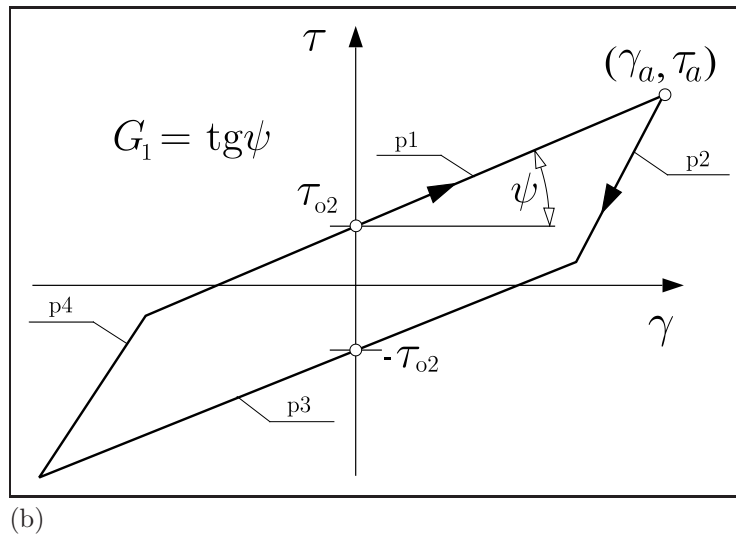
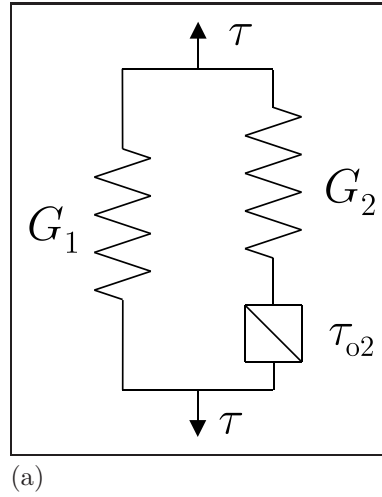
Pierwsza część procesu identyfikacji parametrów modelu przeprowadzona została przy wykorzystaniu spostrzeżenia związanego z wpływem częstotliwości wymuszenia. Analiza pętli histerezy $\tau - \gamma$ przeprowadzona w rozdziale 6.4.1 przy ustalonej wartości natężenia pola magnetycznego i amplitudy odkształcenia doprowadziła do wniosku, że powyżej pewnej wartości częstotliwość f nie ma wpływu na tłumienie (patrz rysunki 6.17, 6.18 i 7.4). Dla wykonanych pomiarów eksperymentalnych (przy częstotliwościach $f = 0,5, 1, 2,5, 5, 10, 15 \text{ Hz}$) przyjęto, iż wartością graniczną jest 5 Hz .

W przyjętym modelu materiału (rysunek 7.1) jedynym elementem, którego odpowiedź jest funkcją prędkości odkształcania, a więc częstotliwości sygnału wymuszenia, jest ciec Newтона. Wzrost częstotliwości f lub lepkości η powoduje, iż założony model ulega znacznemu uproszczeniu do tzw. modelu sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym, w którym efekty lepkie są całkowicie pomijane. Założono więc, iż dominującym procesem nieodwracalnym dla badanego materiału kompozytu magnetoologicznego w zakresie częstotliwości powyżej 5 Hz jest odkształcenie plastyczne, a materiał jest ciałem sprężysto-plastycznym z kinematycznym wzmocnieniem liniowym.

7.2.1.1. Model ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym

Schemat strukturalny modelu ciała sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem oraz schematyczny kształt pętli histerezy dla tego modelu pokazano na rysunkach 7.5a i b. Pętla składa się z czterech prostych, oznaczonych odpowiednio jako p1 i p3 dla obciążania oraz p2 i p4 dla odciążania. Charakterystyczne punkty zostały zaznaczone na rysunku. Granica plastyczności τ_{o2} określona jest w miejscu przecięcia prostych p1 lub p3 z osią naprężenia, natomiast ich nachylenie wyznacza parametr G_1 . Związki konstytutywne dla tego modelu są następujące:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad \text{ i } \quad \gamma = \gamma_1 = \gamma_2 , \quad (7.18)$$



Rysunek 7.5. Schemat strukturalny modelu ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym – (a) oraz przykładowa pętla histerezy z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi – (b)

gdzie

$$\tau_1 = G_1 \gamma_1, \quad \tau_2 = G_2 \gamma_2 - G_2 \gamma_k + \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau}. \quad (7.19)$$

Ciało idealnie sprężysto-plastyczne zdefiniowane jest identycznie jak we wzorze (7.3) i na rysunku 7.2. Związki pomiędzy naprężeniem a odkształceniem, dla tak przyjętych założeń, można wyprowadzić następująco:

$$\tau = \gamma(G_1 + G_2) - G_2 \gamma_k + \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau}, \quad (7.20)$$

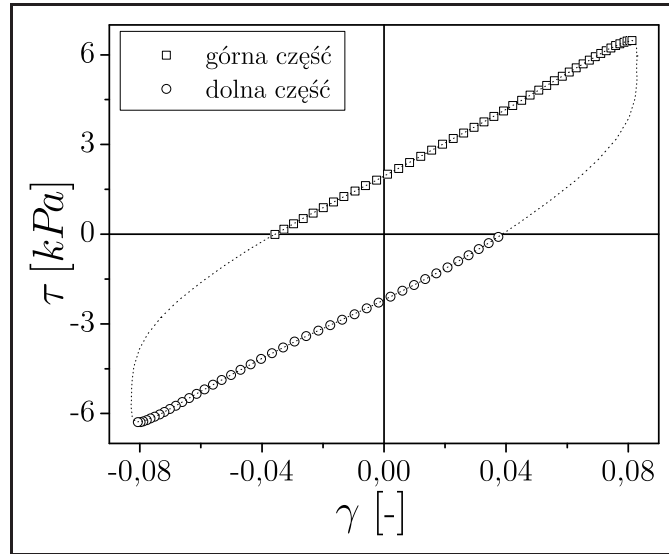
gdy nie jest przekroczona granica plastyczności w elemencie idealnie plastycznym, oraz w przeciwnym razie:

$$\tau = \gamma G_1 + \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau}, \quad \text{dla} \quad \tau_2 = \tau_{o2} \text{sign} \dot{\tau}. \quad (7.21)$$

Punkt przejścia z obciążania do odciążania określony jest przez współrzędne amplitudy naprężenia τ_a i odkształcenia γ_a . Pole pętli histerezy dla modelu można obliczyć według wzoru (7.17), co zostało wyprowadzone wcześniej dla modelu sprężysto-lepkoplastycznego, przy założeniu iż częstotliwość dąży do nieskończoności.

7.2.1.2. Procedura identyfikacji parametrów G_1 i τ_{o2}

Na rysunku 7.6 pokazana została wybrana pętla histerezy z eksperymentu ($f = 15 \text{ Hz}$, $\gamma_a = 0,084$ i $H = 40 \text{ kA/m}$). Zaznaczono symetryczne



Rysunek 7.6. Wybrana pętla histerezy z oznaczonymi częściami, które służyły do wyznaczenia parametrów G_1 oraz τ_{o2}

kawałki pętli histerezy – odpowiednio górny i dolny, które aproksymowane liniami prostymi posłużyły do identyfikacji parametrów G_1 i τ_{o2} . Ograniczenie tych części pętli, które wybierano do identyfikacji, przecięciem z osią γ było spowodowane tym, iż niemożliwe było jednoznaczne wyznaczenie miejsca rozpoczęcia przejścia materiału ze stanu sprężystego w sprężysto-plastyczny. Z tego powodu wybór sprowadzono do jednoznacznie określonych punktów: z jednej strony do przecięcia pętli z osią γ a z drugiej do punktów (τ_a, γ_a) dla górnej lub $(-\tau_a, -\gamma_a)$ dla dolnej części (patrz rysunek 7.5).

Do wyznaczenia parametrów G_1 i τ_{o2} zastosowano regresję liniową opartą na metodzie najmniejszych kwadratów. Równanie prostej w formie $\tau = \gamma G_1 + \tau_{o2}$ pozwoliło na bezpośrednie wyznaczenie obu poszukiwanych parametrów. Obliczenia były przeprowadzane jednocześnie z wykorzystaniem danych pomiarowych otrzymanych dla trzech częstotliwości (5, 10, 15 Hz) i trzech amplitud odkształceń ($\gamma_1 = 0,042$, $\gamma_2 = 0,084$, $\gamma_3 = 0,123$). Z każ-

dej pętli brane były obie części, górna i dolna. Takie zabiegi pozwoliły na uzyskanie najbardziej wiarygodnego wyniku dla posiadanych danych eksperymentalnych. Poszczególne obliczenia wykonywane były dla każdej wartości natężenia pola magnetycznego osobno, tak by można było wyznaczyć zależność poszukiwanych parametrów od H . Wyniki identyfikacji umieszczone zostały w tabeli 7.1. Dokładność wyniku identyfikacji można ocenić na pod-

Tabela 7.1. Wyniki identyfikacji dla parametrów G_1 i τ_{o2}

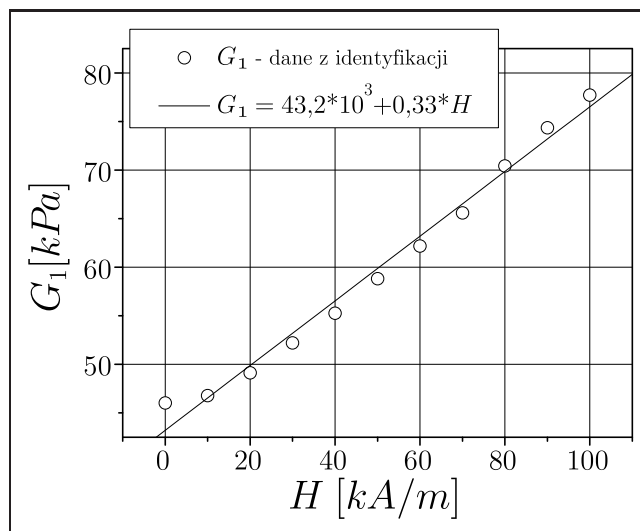
H kA/m	G_1 kPa	s_{G_1} kPa	τ_{o2} Pa	$s_{\tau_{o2}}$ Pa	r
0	46,03	0,09	1038	4,5	0,9854
10	46,79	0,09	1235	4,5	0,9854
20	49,1	0,11	1490	5,2	0,9821
30	52,2	0,12	1762	6	0,9790
40	55,3	0,13	2015	7	0,9771
50	58,8	0,15	2240	7,2	0,9758
60	62,2	0,16	2434	8	0,9753
70	65,6	0,17	2673	9	0,9764
80	70,4	0,18	2823	9	0,9769
90	74,4	0,19	2961	9	0,9779
100	77,7	0,2	3070	10	0,9786

stawie wartości współczynników korelacji $r > 0,975$ oraz wielkości błędów standardowych dla G_1 i τ_{o2} , które zamieszczono także w tabeli.

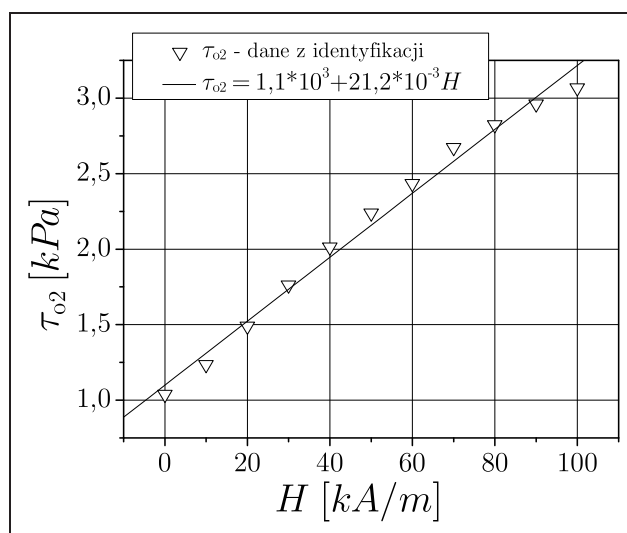
Wyznaczone parametry G_1 i τ_{o2} w funkcji natężenia pola magnetycznego H zaprezentowano na rysunkach 7.7 i 7.8. Charakter tych zależności jest zbliżony do funkcji liniowej, co pokazują umieszczone na wykresach proste regresji otrzymane z wysokim współczynnikiem korelacji $r > 0,992$. Wyraźnie widoczne są jednak miejsca, w których następują przegięcia: dla $H \simeq 10 \text{ kA/m}$ oraz $H \simeq 70 \text{ kA/m}$.

7.2.1.3. Wyznaczenie parametru G_2

Do otrzymania pełnej pętli z modelu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym potrzebne było jeszcze wyznaczenie parametru G_2 . Jego określenie na podstawie danych eksperymentalnych, nie było możliwe podobnie, jak wyznaczenie G_1 z bezpośredniej aproksymacji punktów pomiarowych za pomocą linii prostej. Powodem tego jest fakt, iż nie można jednoznacznie



Rysunek 7.7. Wartość parametru G_1 w funkcji natężenia pola magnetycznego wyznaczona z aproksymacji modelem ciała sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym



Rysunek 7.8. Wartość parametru τ_{o2} w funkcji natężenia pola magnetycznego wyznaczona z aproksymacji modelem ciała sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym

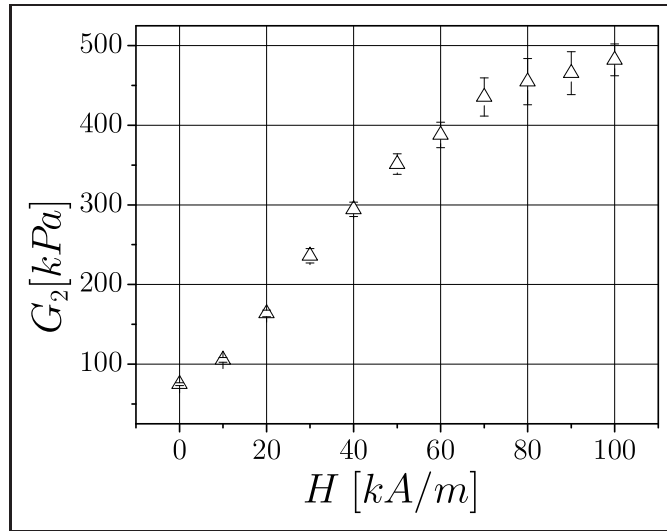
wskazać, w którym punkcie pętli histerezy przechodzimy z obszaru sprężystego w sprężysto-plastyczny. Dodatkowo odcinek obciążania materiału, oddziaływań wyłącznie sprężystych jest dość krótki i nie nadaje się do bezpośredniej aproksymacji linią prostą.

W celu wyznaczenia wartości G_2 wykorzystano zależność umożliwiającą obliczenie pola równoległoboku, za pomocą którego można przybliżyć pętle histerezy. Analizie poddano osobno każdą z eksperymentalnie otrzymanych pętli. Wyznaczono im pole $\Delta W^{(eks)}$, szerokość w miejscu przecięcia z osią

naprężenia $2\tau_{(\gamma=0)}$ oraz amplitudę odkształcenia γ_a . Następnie, korzystając z wzoru na pole równoległoboku przekształconego do postaci:

$$G_2 = \frac{4\tau_{(\gamma=0)}^2}{4\tau_{(\gamma=0)}\gamma_a - \Delta W^{(exp)}} , \quad (7.22)$$

obliczono wartości G_2 dla poszczególnych pętli histerezy. Obliczenia przeprowadzono dla trzech różnych wartości amplitud odkształcenia i trzech częstotliwości wymuszenia $f \geq 5 \text{ Hz}$ oraz dla kolejnych wartości natężenia pola magnetycznego H od 0 do 100 kA/m . Na podstawie serii wyników otrzymanych dla poszczególnych pętli histerezy oszacowano wartość rzeczywistą G_2 , wybierając jako estymator średnią arytmetyczną $\overline{G_2}$ obliczoną dla wszystkich uzyskanych wyników przy jednej wartości H . Jako niepewność oceny wartości $\overline{G_2}$ przyjęto błąd standardowy średniej $s_{\overline{G_2}}$ (niepewność standardową). Rezultaty identyfikacji, zależność parametru G_2 od natężenia pola magnetycznego, zostały pokazane na rysunku 7.9 oraz wyszczególnione w tabeli 7.2.



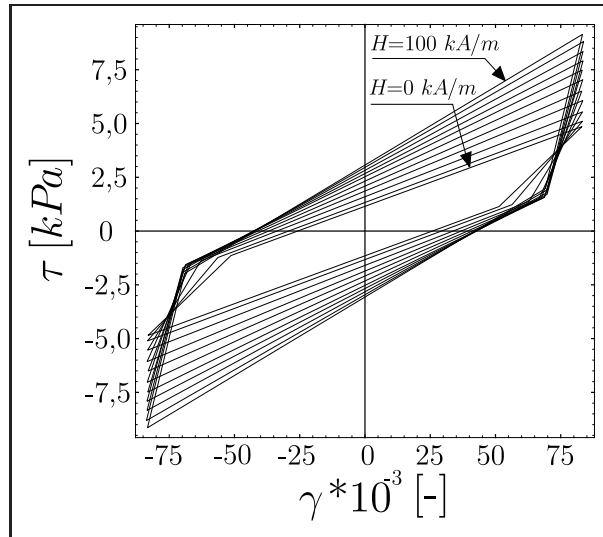
Rysunek 7.9. Wartość parametru G_2 w funkcji natężenia pola magnetycznego

Można zauważyć, że przybliżenie zależności $G_2(H)$ za pomocą funkcji liniowej nie byłoby prawidłowe. Widoczna jest, wyraźniej niż dla parametrów G_1 i τ_{o2} , nieliniowość charakterystyki i jej załamanie w punktach $H \simeq 10$ i $H \simeq 70 \text{ kA/m}$. Wy tłumaczenia powstających nieliniowości w górnym zakresie H , obserwowanych dla trzech wyznaczonych w identyfikacji parametrów, G_1 , G_2 i τ_{o2} , można szukać w zjawisku nasycenia magnetycznego cząstek wykorzystanych do budowy kompozytu. Występowanie tego zjawiska jest charakterystyczne dla samych cieczy magnetoreologicznych, co zaobserwowano również podczas badań tłumików z cieczami.

Tabela 7.2. Wyniki identyfikacji dla parametru G_2

H kA/m	$\overline{G}_2$ kPa	$s_{\overline{G}_2}$ kPa
0	75	1,8
10	105	3
20	164	4,2
30	236	9
40	294	9
50	351	13
60	388	16
70	436	24
80	455	29
90	465	27
100	482	20

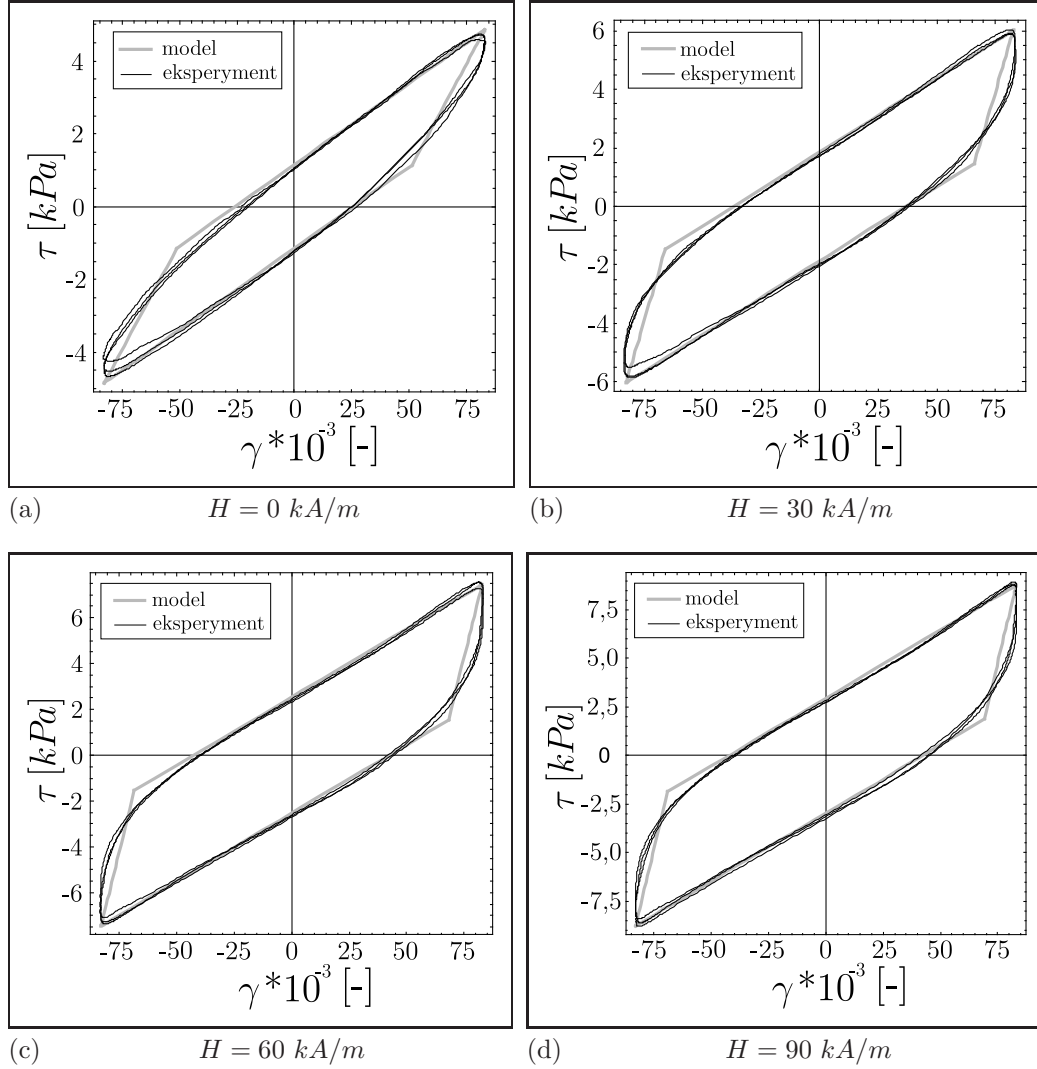
Po wyznaczeniu parametrów G_1 , τ_{o2} i G_2 możliwe było narysowanie pętli histerezy dla modelu, co zaprezentowano na rysunku 7.10, gdzie widoczna jest cała gama pętli uzyskana w funkcji kolejnych wartości pola magnetycznego od $H = 0$ do $H = 100 \text{ kA/m}$, przy stałej amplitudzie odkształcenia $\gamma_a = 0,084$. Porównanie pętli otrzymanych z modelu i przebiegów rzeczywistych dla czterech wartości natężenia pola magnetycznego zaprezentowano



Rysunek 7.10. Pętle histerezy z modelu dla parametrów G_1 , τ_{o2} i G_2 wyznaczonych w pierwszym etapie identyfikacji dla narastających wartości H od 0 do 100 co 10 kA/m , przy amplitudzie odkształcenia $\gamma_a = 0,084$

stych dla czterech wartości natężenia pola magnetycznego zaprezentowano

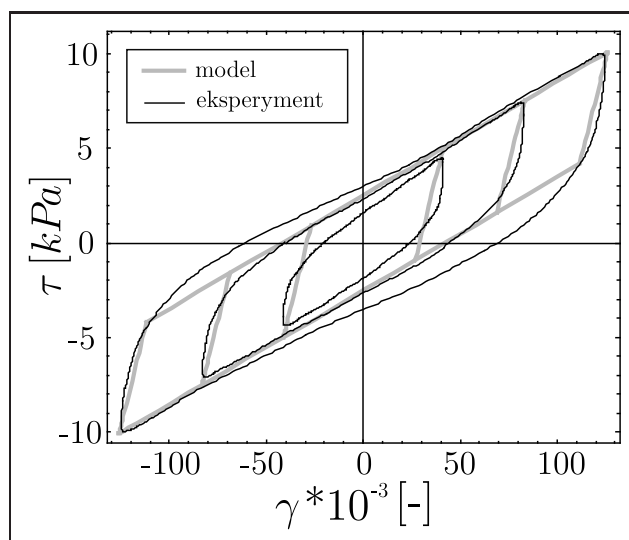
na rysunkach 7.11a–d. Pokazane zostały jednocześnie pętle eksperymentalne dla trzech wartości f (5, 10 i 15 Hz) oraz odpowiadająca im pętla uzyskana z modelu. Model dość dobrze odzwierciedla rzeczywisty przebieg dla obciąża-



Rysunek 7.11. Porównanie pętli histerezy, otrzymanych z modelu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym i eksperymentalnych dla wybranych wartości natężenia pola magnetycznego H , $\gamma_a = 0,084$

nia materiału. Natomiast dla odciążania linia prosta przecina wypukłą część pętli.

Wyznaczenie parametrów G_1 , G_2 i τ_{o2} zaprezentowane powyżej zostało zrealizowane dla różnych wartości amplitud odkształcenia. Porównanie danych eksperymentalnych oraz modelu dla wybranych wartości γ_a pokazano na rysunku 7.12. Widoczne są różnice pomiędzy modelem a danymi eksperymentalnymi, szczególnie dla dwóch skrajnych wartości amplitud odkształcenia. Zarówno granica plastyczności, jak i nachylenie pętli przy obciążaniu



Rysunek 7.12. Porównanie pętli histerezy eksperymentalnych i uzyskanych z modelu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym dla trzech wartości amplitud odkształcenia, $f=15 \text{ Hz}$ [111]

w modelu powinny się zmieniać wraz z amplitudą naprężenia, by odwzorować eksperymentalne przebiegi. Zależność od amplitudy nie była jednak własnością, którą można w bezpośredni sposób uwzględnić w przyjętym modelu.

Jakościowy opis danych eksperymentalnych za pomocą przyjętego modelu pomimo niezgodności można uznać za dobry.

7.2.2. Identyfikacja – etap II. Zakres niskich częstotliwości, badania wstępne

Kolejny etap identyfikacji miał na celu określenie wartości czwartego parametru modelu – lepkości. Wcześniej uzyskane rezultaty sugerowały bowiem jednoznacznie wyraźny wpływ częstotliwości poniżej 5 Hz . Pozostałe parametry wyznaczone zostały w poprzednich rozdziałach po przyjęciu uproszczenia wynikającego z rezultatów badań eksperymentalnych dla wyższych częstotliwości. Dalej poddawano rozważaniom oraz wykorzystywano w obliczeniach model ciała sprężysto-lepkoplastycznego.

7.2.2.1. Numeryczne rozwiązanie modelu dla obciążeń cyklicznych

Poszukiwanie wartości η wymagało rozwiązania równań (7.4) i (7.5) dla przyjętego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego. Ponieważ jest on nieliniowy, wymaga kolejnego rozwiązywania i łączenia dwóch równań różniczkowych a granica plastyczności zależy od prędkości odkształcania jego rozwiązanie analityczne bez podstawiania konkretnych wartości parametrów nie jest możliwe [22]. Mając na uwadze poszukiwanie wyników dla obciążeń cy-

klicznych zdecydowano się na wykonanie obliczeń za pomocą specjalnie do tego celu stworzonego modelu numerycznego.

Algorytm rozwiązywania modelu numerycznego został zaprogramowany z wykorzystaniem pakietu Mathematica 5.1. Bazując na [88], znacząco zmodyfikowano program obliczeń, tak by odzwierciedlić warunki obciążania panujące w zrealizowanym eksperymencie. Sterowanie musiało mieć charakter sinusoidalny z możliwością zmiany częstotliwości i doboru amplitudy obciążenia, tak by otrzymać zadaną amplitudę odkształcenia. Procedura obliczania modelu, w dużym uproszczeniu, sprowadzona została do numerycznego rozwiązywania czterech równań różniczkowych, pomiędzy którymi przekazywane były warunki ich połączenia. Punkt zakończenia rozwiązywania jednego z równań stawał się początkiem do rozpoczęcia obliczeń dla następnego, przez co uzyskiwano ich „sklejenie”. Schemat blokowy rozwiązywania modelu został pokazany na rysunku 7.13.

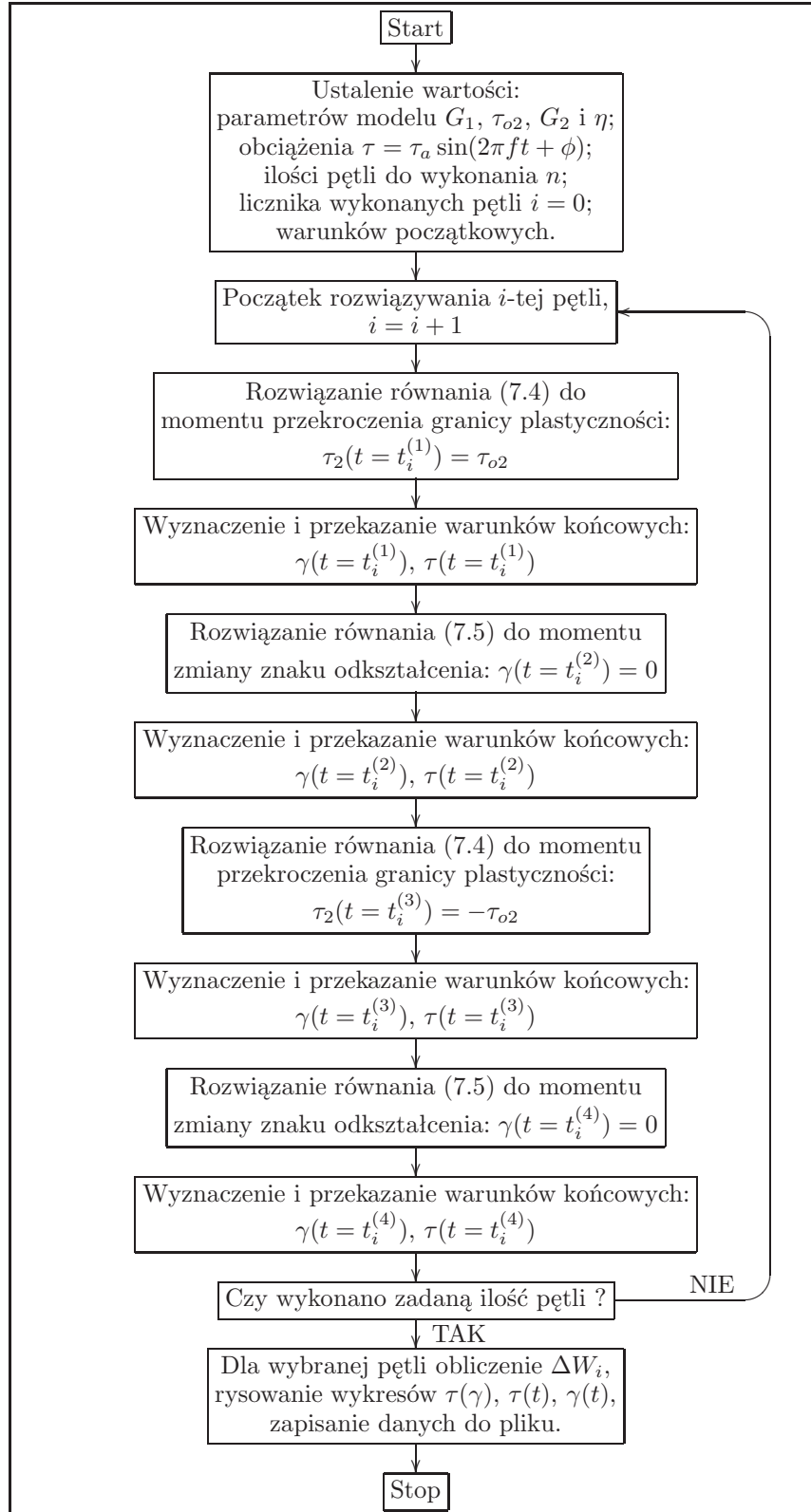
Model numeryczny – procedura rozwiązywania poszczególnych równań – został zaprogramowany w taki sposób, by możliwe było wykonywanie obliczeń przy kolejnych cyklach obciążenia. Umożliwiało to uzyskanie pętli histerezy dla ustabilizowanego stanu, w którym obliczenie pola pętli histerezy nie było obciążone wpływem warunków początkowych.

Aby zweryfikować poprawność wykonanego modelu numerycznego, przed rozpoczęciem obliczeń związanych z poszukiwaniem parametru η wykonano obliczenia próbne. W tym celu wykonano szereg testów, w których poszczególne parametry modelu przyjmowały wartości ekstremalne, np. $\tau_{o2} \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow \infty$ itp. W ten sposób uproszczono model czteroparametrowy do postaci modeli znanych z literatury, łatwych do rozwiązania na drodze analitycznej i sprawdzenia, czy otrzymane wyniki z obliczeń numerycznych są z nimi zgodne. Na przykład dla $\tau_{o2} \rightarrow 0$ otrzymano model ciała Maxwella, a wraz z $\eta \rightarrow \infty$ ciało Hooke’a. Podobne sprawdzenia przeprowadzono zmieniając parametry tak, by otrzymać ciało Kelvina-Voighta, Saint-Venanta i ciecz Newtona¹⁾.

Ważną cechą modelu, która wymagała również wcześniejszego sprawdzenia, była stabilność w czasie²⁾. Do tego celu także wykorzystano numeryczny algorytm umożliwiający wykonanie wielokrotnych obliczeń. Efekt ustalania się położenia i kształtu pętli histerezy sprawdzono, wykonując kolejno kil-

¹⁾ Nazewnictwo poszczególnych modeli ciał za [15].

²⁾ Przez stabilność w czasie rozumiane jest ustalanie się położenia i kształtu pętli dla kolejnych cykli obciążenia.



Rysunek 7.13. Schemat rozwiązywania modelu numerycznego

kadzieśiat cykli obciążenia i obserwując przy tym odpowiedź modelu. Przy sterowaniu naprężeniem, jak i odkształceniem (o charakterze sinusoidalnym

lub trójkątnym) oraz zmianą parametrów modelu w szerokim zakresie ustalenie się sygnałów następowało już po pierwszym cyklu. Parametry, w zakresie których sprawdzana była poprawność modelu i stabilizacja pętli, oscylowały wokół wartości, które dawały rozwiązania jakościowo podobne do otrzymanych z badań eksperymentalnych, szczególnie biorąc po uwagę wartości częstotliwości wymuszeń oraz amplitudy odkształceń i naprężeń. Zakres sprawdzanych częstotliwości mieścił się w granicach od 0,1 do 20 Hz.

7.2.2.2. Wyznaczenie parametru η

Identyfikacja parametru η została przeprowadzona dla czteroparametrowego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego opisanego na początku rozdziału 7. Pozostałe trzy parametry: G_1 , G_2 oraz τ_{o2} występujące w równaniach (7.4) i (7.5) wyznaczone zostały w pierwszym etapie identyfikacji dla modelu ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym, który był uproszczoną wersją modelu czteroparametrowego po przyjęciu wartości $\eta \rightarrow \infty$.

W identyfikacji η wykorzystane zostało kryterium zgodności wielkości pól pętli histerezy otrzymanych z modelu i z eksperymentu, które zdefiniowano, opierając się na metodzie najmniejszych kwadratów, w następujący sposób:

$$q = \sum_{j=1}^N \left(\Delta W_j^{(\text{eks})} - \Delta W_j^{(\text{mod})} \right)^2, \quad (7.23)$$

gdzie $\Delta W^{(\text{eks})}$ oznacza wartość pola pętli obliczoną na podstawie danych otrzymanych z eksperymentu, natomiast $\Delta W^{(\text{mod})}$ – wartość pola pętli dla modelu. Sumowanie po wskaźniku j wykonywano dla wartości pól pętli wyznaczonych przy różnych częstotliwościach wymuszenia. Procedura identyfikacji polegała na wyznaczeniu takiego η , przy którym wartość kryterium q osiągnęła minimum. W tym celu zastosowano najprostszą ze względów obliczeniowych metodę minimalizacji, polegającą na uzyskaniu tablicy poszczególnych wartości q w funkcji skokowo zmienianego η w zadanym przedziale.

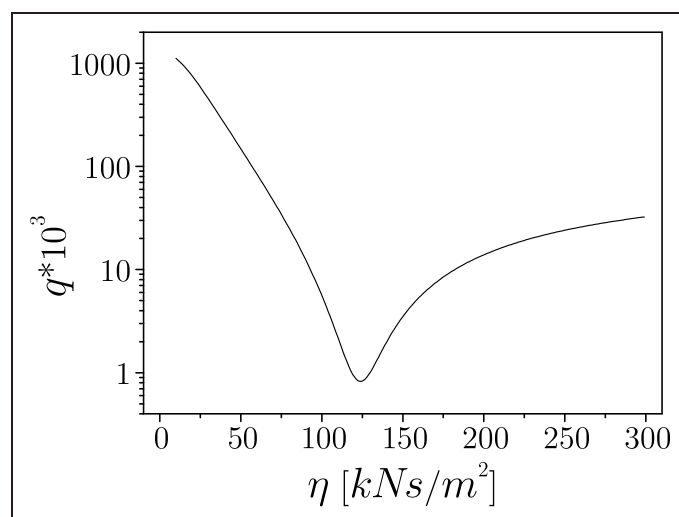
Do obliczenia wartości $\Delta W^{(\text{mod})}$ wykorzystano model numeryczny opisany w rozdziale 7.2.2.1. Pozwalał on na dokładne odwzorowanie warunków obciążania, jakie obowiązywały podczas wykonywania eksperymentu¹⁾ (sterowanie kształtem sygnału naprężenia z jednoczesnym utrzymywaniem amplitudy odkształcenia).

¹⁾ Do obliczania pola pętli wykluczone było użycie wzoru (7.16), który został wyprowadzony dla sterowania odkształceniem. Dla $f < 5$ Hz wpływ efektów lepkich był nie do pominięcia i wymagał precyzyjnego opisu zgodnego z przeprowadzonym eksperymentem, sterowania kształtem naprężenia.

Procedura poszukiwania minimum q była wykonywana w szerokim zakresie zmienności parametru η od 5 do 300 z krokiem co 1 kNs/m^2 dla kilku różnych częstotliwości wymuszenia f w zakresie od 0,5 Hz do 5 Hz i jednej wartości natężenia pola magnetycznego $H = 60 kA/m$. Pozostałe parametry wykorzystane w identyfikacji zestawiono w tabeli 7.3. Rezultaty obliczeń – kryterium q w funkcji η – pokazano na rysunku 7.14. Wartość minimalną q uzyskano dla $\eta = 124 kNs/m^2$.

Tabela 7.3. Wartości parametrów wykorzystanych w procesie identyfikacji η

Parametr	G_1 kPa	τ_{o2} Pa	G_2 kPa	γ_a –
Wartość	62,2	2434	388	0,084



Rysunek 7.14. Kryterium q w funkcji η

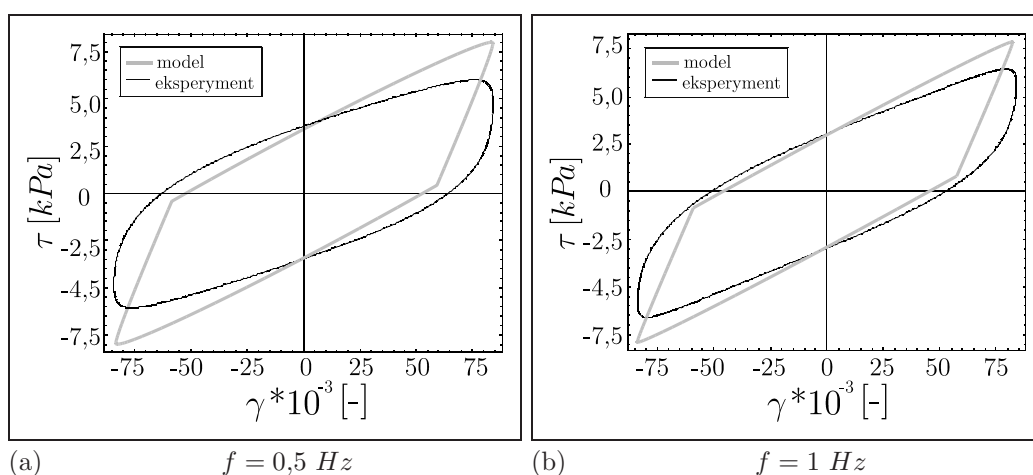
Wartości pól pętli histerezy modelu obliczone dla wyznaczonego η oraz odpowiadające im wartości eksperymentalne przy różnych częstotliwościach wymuszenia zestawiono w tabeli 7.4. Wyliczone różnice pomiędzy modelem a eksperymentem są bardzo małe, sięgające kilku procent. Pod tym względem można uznać, iż przyjęte kryterium i procedura identyfikacji się sprawdziły. Odmienny wniosek można wysnuć analizując rysunki 7.15a–d, na których pokazano pętle z eksperymentu i odpowiadające im z modelu dla wyznaczonej wartości η przy kolejnych częstotliwościach wymuszenia. Widoczne są różnice w kształcie pętli, powiększające się wraz z obniżeniem częstotliwości.

Wstępna identyfikacja pełnego modelu materiału w zakresie częstotliwości $0,5 \leq f \leq 5 Hz$ była zadaniem nadprogramowym i miała znaczenie

Tabela 7.4. Porównanie wielkości pól pętli histerezy eksperymentalnych i otrzymanych z modelu dla wyznaczonego parametru $\eta = 124 \text{ kN s/m}^2$

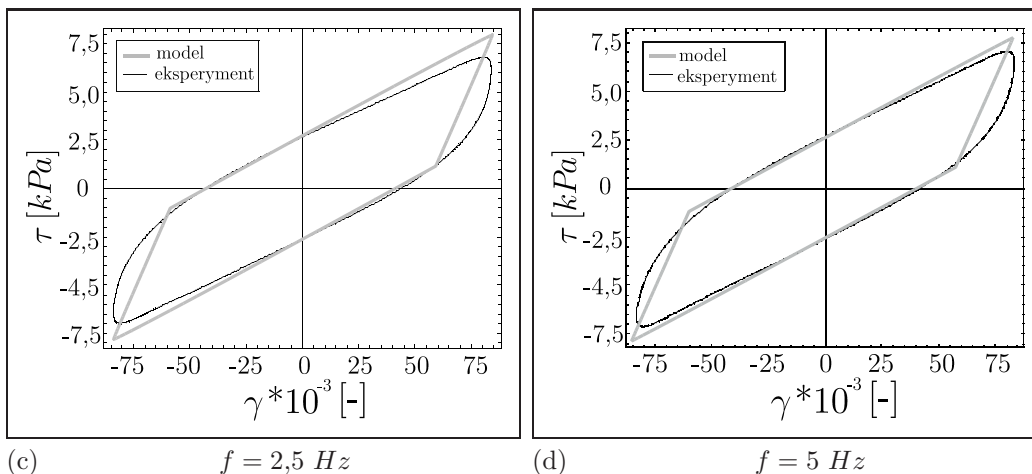
f Hz	$\Delta W^{(\text{mod})}$ J/m^3	$\Delta W^{(\text{eks})}$ J/m^3	$\Delta W^{(\text{mod})} - \Delta W^{(\text{eks})}$ %
5	778,6	777,9	0,09
2,5	784,3	810,2	3,2
1	884,2	891	0,9
0,5	1036,4	1026,5	1

poznawcze w związku z ujawnionym wyraźnym wpływem lepkości. Mimo że zastosowana procedura identyfikacji wykorzystująca przyjęte kryterium pozwoliła na otrzymanie jednoznacznego rozwiązania dla parametru η , uzyskany wynik uznano za niezadowalający. Różnice pomiędzy rezultatami eksperymentalnymi i modelowymi są, pomimo zachowania prawie identycznych pól pętli, tym gorsze, im niższa częstotliwość.



Rysunek 7.15. Porównanie pętli histerezy eksperymentalnych z uzyskanymi z modelu sprężysto-lepkoplastycznego dla pola magnetycznego $H = 60 \text{ kA/m}$ i $\gamma_a = 0,084$

Podjmując w dalszej perspektywie kolejną próbę identyfikacji przyjętego wcześniej modelu w tym zakresie częstotliwości należy krytycznie rozważyć przyjęte założenia dotyczące liniowych zależności modelu, w szczególności η . Sugestie te poparte są także analizą zachowania cieczy magnetoreologicznych, będących głównym składnikiem kompozytów, których lepkości, liniowa w pewnym zakresie, ulega znaczącym zmianom szczególnie dla niskich prędkości odkształcenia (patrz rysunek 2.6). Rozważeniu powinno także podlegać wybrane kryterium „dopasowania” jako wystarczające do przeprowadzenia



Rysunek 7.15. Porównanie pętli histerezy eksperymentalnych z uzyskanymi z modelu sprężysto-lepkoplastycznego dla pola magnetycznego $H = 60 kA/m$ i $\gamma_a = 0,084$ (kontynuacja z poprzedniej strony)

identyfikacji i uzyskania wartości poszukiwanych współczynników oraz sposób sterowania parametrami mechanicznymi w czasie przeprowadzania eksperymentów.

8. Przykład zastosowania kompozytu magnetoreologicznego

Kompozyty magnetoreologiczne, jak to zaprezentowano w poprzednich częściach pracy, są bardzo interesującym materiałem nowej generacji, charakteryzującym się zmianą swoich właściwości tłumiących w funkcji natężenia pola magnetycznego. Właściwości, którymi można sterować, powodują powstanie nowych możliwości budowy aktywnych urządzeń możliwych do zastosowania w różnorodnych strukturach SMART. Jako przykład przedstawiono w tym rozdziale wykorzystanie tego typu materiału do budowy aktywnego tłumika oraz jego zastosowanie. Zadaniem, jakie postawiono sobie w tym zakresie, było pokazanie możliwości wykorzystania kompozytu magnetoreologicznego do budowy aktywnego urządzenia oraz zbadanie jego możliwości tłumiących. W ramach tego zadania zrealizowano następujące etapy opisane kolejno w punktach:

- budowa prototypowego tłumika z kompozytem magnetoreologicznym,
- zastosowanie tłumika w wybranym układzie mechanicznym oraz analiza jego wpływu na drgania.

Konstrukcja tłumika, jak i próba jego zastosowania miały charakter prototypowy, a głównym celem było zaprezentowanie możliwości i pokazanie pewnych celów na przyszłość¹⁾.

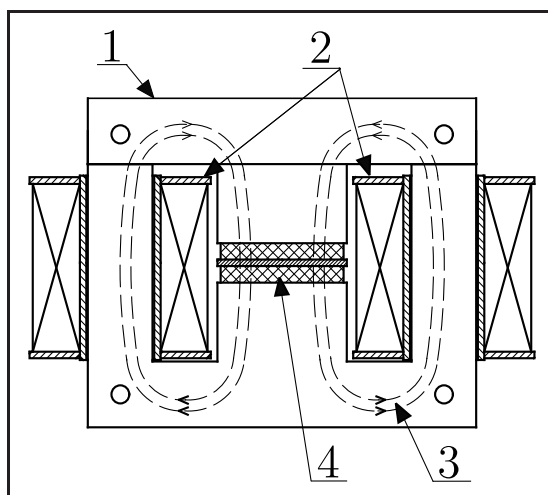
8.1. Prototypowa wersja tłumika z kompozytem MR

Budowę tłumika rozpoczęto od analizy wyników badań eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale 6. Pozwoliło to na dobranie parametrów obwodu magnetycznego oraz wymiarów materiału kompozytu w ten sposób, by uzyskać przewidywany do wytłumienia zakres sił i przemieszczeń. Konstrukcja tłumika od strony mechanicznej i magnetycznej została wykonana z wykorzystaniem danych o stanowisku pomiarowym zastosowanym w bezpo-

¹⁾ Dane zaczerpnięto głównie z pracy dyplomowej P. Kustronia, którą wykonano po opieką promotora (dr. hab. J. Kalety), a przy realizacji której doktorant miał znaczący udział [56], oraz wspólnej publikacji konferencyjnej [40].

średnich badaniach kompozytu (rozdział 6.3). Układ kształtowania i zadawania sygnału magnetycznego wykonany został z rdzenia transformatora, dzięki czemu możliwe było ograniczenie strat spowodowanych prądami wirowym. Na rdzeniu umieszczone zostały dwie cewki wytwarzające pole magnetyczne, których parametry zostały tak dobrane, by uzyskać jak najmniejszą wartość indukcyjności i jednocześnie duże natężenie prądu. Indukcyjność była ważnym parametrem ze względu na czas reakcji tłumika, a więc i jego sterowanie, natomiast od natężenia prądu zależała wartość uzyskiwanego natężenia pola magnetycznego, jakim oddziaływano na kompozyt. W rdzeniu wykonana została szczelina, w której umieszczono dwie warstwy kompozytu magnetoreologicznego połączone płaskim elementem, za pomocą którego możliwe było przenoszenie sił z zewnątrz.

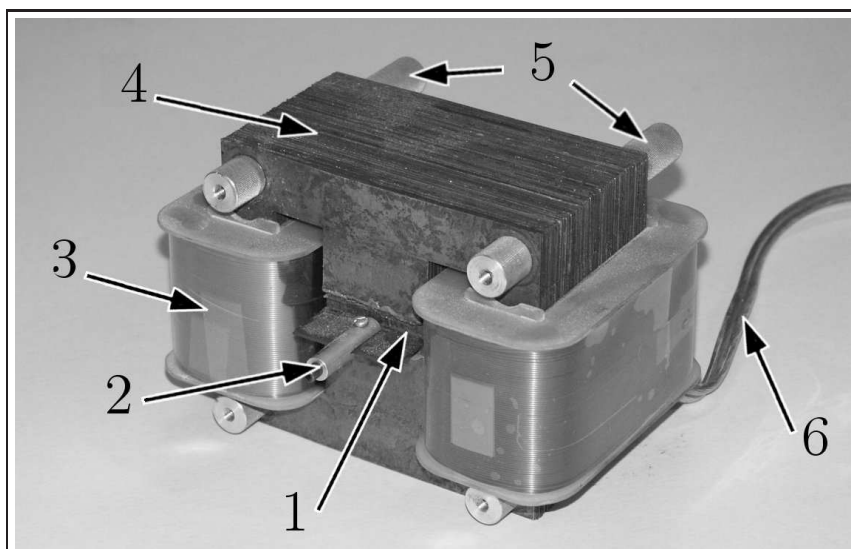
Schemat prototypowego tłumika wraz z opisem części składowych pokazany został na rysunku 8.1, natomiast jego widok ogólny przedstawiono na rysunku 8.2



Rysunek 8.1. Schemat konstrukcji prototypowego tłumika drgań z kompozytem magnetoreologicznym: 1 – rdzeń transformatora, 2 – cewki, 3 – przebieg linii strumienia magnetycznego, 4 – kompozyt magnetoreologiczny w szczelinie rdzenia [56]

Podstawową charakterystyką, jaką wyznaczono dla zbudowanego tłumika, była zależność amplitudy siły od natężenia prądu w cewkach. Dla $I = 4\text{ A}$, amplitudy odkształcenia $x_a = 1\text{ mm}$ i częstotliwości $f = 5\text{ Hz}$ uzyskano maksymalną wartość siły 40 N . Przy braku pola magnetycznego wartość siły tłumiącej wynosiła 10 N .

Istniejące komercyjne konstrukcje tłumików z kompozytami magnetoreologicznymi (tłumiki tarciove [8]) charakteryzują się podobnym zakresem sił



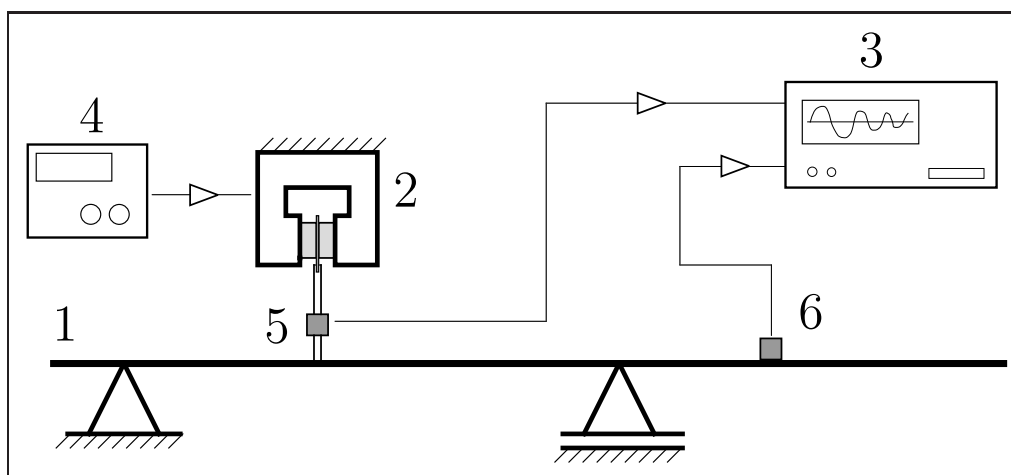
Rysunek 8.2. Widok ogólny tłumika drgań z kompozytem magnetoreologicznym:
 1 – kompozyt MR, 2 – łącznik, miejsce mocowania do konstrukcji drgającej,
 3 – cewki, 4 – rdzeń, 5 – mocowania tłumika do podstawy, 6 – przewody
 doprowadzające sygnał prądowy do tłumika

tłumiących pod wpływem pola magnetycznego, jak zbudowane prototypowe urządzenie. Trudno jednak o bezpośrednie porównanie, gdyż w przypadku tłumika tarcowego siła maksymalna nie jest uzależniona od amplitudy przemieszczenia.

8.2. Układ pomiarowy i testowy obiekt drgający

Do praktycznego sprawdzenia możliwości tłumienia drgań mechanicznych zbudowanego urządzenia wybrano stalową belkę o dwóch podporach. W literaturze przedmiotu opisującej zastosowania podobnych tłumików z cieczami magnetoreologicznymi zazwyczaj można odnaleźć próby ich zastosowań w dyskretnych układach drgających o jednym lub dwóch stopniach swobody [60, 82]. Natomiast wybraną belkę należy zaliczyć do układów ciągłych, które charakteryzują się występowaniem wielu form drgań. Z tego powodu problem tłumienia wymaga zupełnie innego podejścia, które musi uwzględnić charakter drgań, zakres częstotliwości występujących w danym obiekcie.

Schemat wykorzystanego stanowiska pomiarowego zaprezentowano na rysunku 8.3. Tłumik utwierdzony był do podłoża od strony rdzenia za pomocą specjalnych mocowań. Płytką nośna, do której obustronnie przymocowany był kompozyt znajdujący się w szczelinie, połączona była z belką za pomocą sztywnego pręta z wbudowanym czujnikiem siły. Dzięki temu drgania belki wywoływały obciążenia tnące kompozytu magnetoreologicznego. Infor-



Rysunek 8.3. Stanowisko badawcze: 1 – obiekt badań, belka na dwóch podporach, 2 – testowany tłumik z kompozytem MR, 3 – system zbierania i przetwarzania danych, analizator widma HP35639A, 4 – zasilacz regulowany, 5 – czujnik siły, 6 – czujnik przyspieszenia

macji o aktualnym stanie konstrukcji dostarczały piezoelektryczne czujniki siły i przyspieszenia firmy PCB. Akwizycję i analizę danych pomiarowych wykonywano przy pomocy dwukanałowego analizatora widma HP35639A. Wymiary belki to: długość 300 *cm*, szerokość 12 *cm* i grubość 1,2 *cm*. Ze względu na proporcje wymiarów przyjęto traktować ją jako jednowymiarowy obiekt i pomijać zjawiska związane z innymi wymiarami, jak np. drgania skrętne.

Zasilacz regulowany podłączony do układu cewek umożliwiał płynne ustalanie wartości natężenia prądu, a przez to zmianę właściwości materiału tłumiącego. Cewki odpowiedzialne były za wytwarzanie strumienia pola magnetycznego w rdzeniu, następnie ukierunkowanego i podawanego prostopadle do warstwy ścinanego kompozytu. Wartość natężenia prądu uznano za parametr sterujący tłumikiem i to w jego funkcji podawane są poszczególne wyniki badań.

8.2.1. Wybór miejsca zamocowania tłumika

Tłumiki takiego typu, jak zaprezentowana w tym rozdziale konstrukcja, działają dyskretnie (we wskazanym miejscu konstrukcji), a co za tym idzie, miejsce jego podłączenia staje się ważnym parametrem determinującym możliwości tłumienia drgań. Z tego powodu istotny staje się wybór takiego punktu oddziaływania, w którym efektywność tłumienia byłaby największa. W przypadku badanego obiektu – belki – decyzję tę podjęto na podstawie obserwacji poszczególnych form drgań. Za pomocą analizy modalnej wyzna-

czono pięć głównych częstotliwości rezonansowych oraz odpowiadających im form drgań w zakresie do 100 Hz . Rozpatrzenie poszczególnych przypadków form umożliwiło zamocowanie tłumika. Punkt zamocowania nie był przedmiotem optymalizacji, natomiast analiza form drgań pozwoliła na umieszczenie tłumika poza węzłami. Dzięki temu uniknięto miejsc, w których dla danej częstotliwości rezonansowej amplituda przemieszczeń była bliska zeru, a tym samym tłumienie tej częstotliwości drgań nie byłoby możliwe.

Ponieważ charakterystyka tłumika (w stanie wyłączonym, bez pola magnetycznego) nie jest zupełnie bez wpływu na drgania konstrukcji, po jego zamocowaniu sprawdzono ponownie istniejące formy drgań i odpowiadające im częstotliwości. Badania wykazały, że belka przyjmuje 5 form modalnych w zakresie do 100 Hz . Częstości rezonansowe poszczególnych form wynoszą odpowiednio: 5,5, 15, 34,5, 49 oraz 61,5 Hz . Miejsce zamocowania tłumika wybrano 70 cm od początku belki.

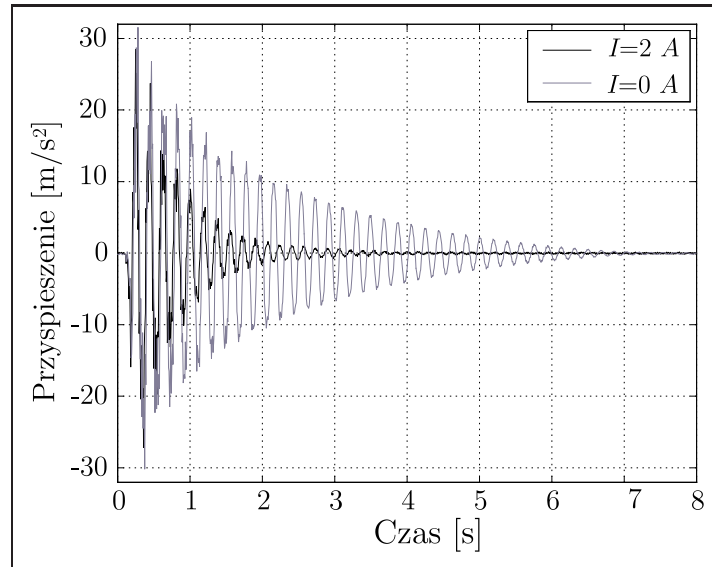
8.3. Analiza wpływu oddziaływania tłumika na drgania belki

8.3.1. Tłumienie drgań swobodnych

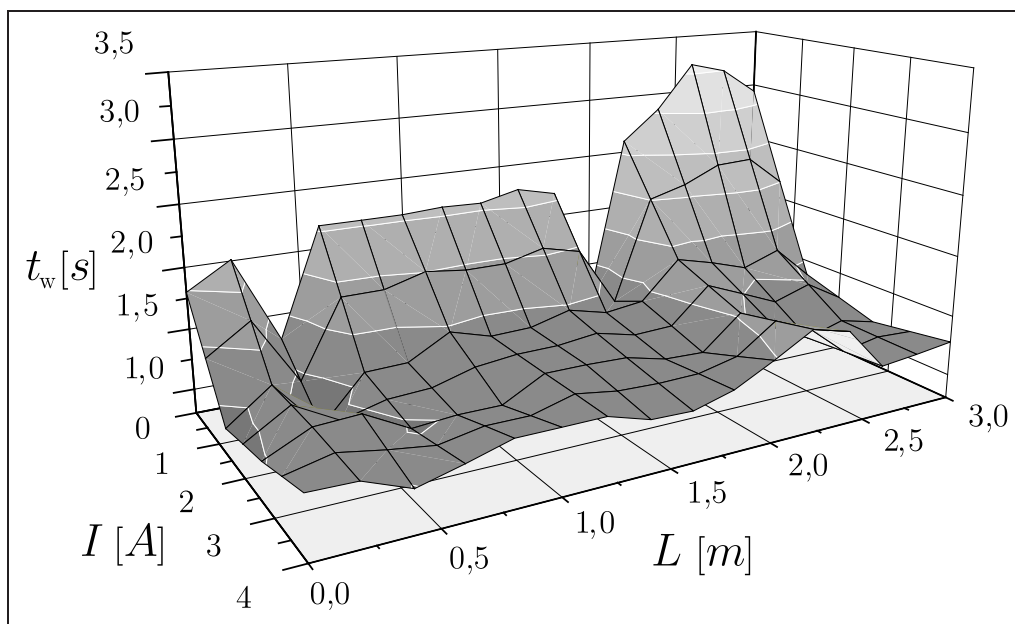
Jako pierwszą część badań mających na celu sprawdzenie wpływu tłumika na drgania belki wybrano obserwacje charakterystyk amplitudowo-czasowych. Za kryterium oceny tłumienia przyjęto spadek amplitudy drgań swobodnych. Wymuszenie belki realizowane było poprzez warunek początkowy dla końca belki w postaci jej wychylenia bez prędkości początkowej.

Na rysunku 8.4 pokazane zostały przebiegi czasowe amplitudy przyspieszenia zarejestrowane dla wybranego punktu (koniec belki, $L = 3\text{ m}$) przy dwóch różnych wartościach natężenia prądu I .

Zmiana natężenia prądu sterującego ma jak widać istotny wpływ na drgania belki. Spadek amplitudy jest tu najbardziej zauważalnym efektem, dlatego też za ocenę wpływu tłumienia przyjęto właśnie czas (oznaczony t_w), po jakim nastąpi wytłumienie amplitudy do poziomu 20% jej maksymalnej wartości. Dla belki, jako obiektu uproszczonego do skali jednowymiarowej, wykonano całą serię pomiarów w szesnastu punktach równomiernie rozłożonych na długości L . Wartość natężenia prądu I zmieniano w zakresie od 0 do 4 A dla każdego punktu pomiarowego. Zebrane wyniki w postaci wykresu trójwymiarowego pokazane zostały na rysunku 8.5.



Rysunek 8.4. Drgania swobodne obserwowane dla punktu na końcu belki ($L = 3 \text{ m}$) dla dwóch wartości natężenia prądu sterującego tłumikiem równych odpowiednio $I = 0$ i $I = 2 \text{ A}$



Rysunek 8.5. Czas wytłumienia t_w amplitudy drgań swobodnych w poszczególnych punktach belki w zależności od natężenia prądu sterującego I

Wpływ natężenia prądu jest, jak widać, największy w zakresie do 2 A . Przekroczenie tej granicy stawało się zabiegiem nieefektywnym, powodującym jedynie niepotrzebny pobór energii przez cewki. Najlepsze efekty wytłumienia uzyskano dla punktów na wolnym końcu belki, gdzie czas wygasania drgań uległ największemu skróceniu – blisko dwukrotnie.

8.3.2. Wpływ tłumienia na charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe

Kolejną próbą pokazania wpływu tłumika na drgania badanej konstrukcji była analiza charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. Dysponując narzędziami analizy modalnej można było wybrać punkt zamocowania tłumika, jak i ocenić jego wpływ. Do wymuszenia konstrukcji używano młotka udarowego z wbudowanym czujnikiem siły, natomiast do odczytu odpowiedzi z konstrukcji akcelerometrów. Na kolejnych rysunkach 8.6a–e zaprezentowany został wpływ tłumika na poszczególne formy drgań zarejestrowane dla dwóch jego nastaw ($I = 0$ oraz $I = 2\text{ A}$). Wykresy te przedstawiają unormowane do maksymalnej wartości równej jedności formy drgań powstałe z amplitud przyspieszeń dla danej częstotliwości rezonansowej.

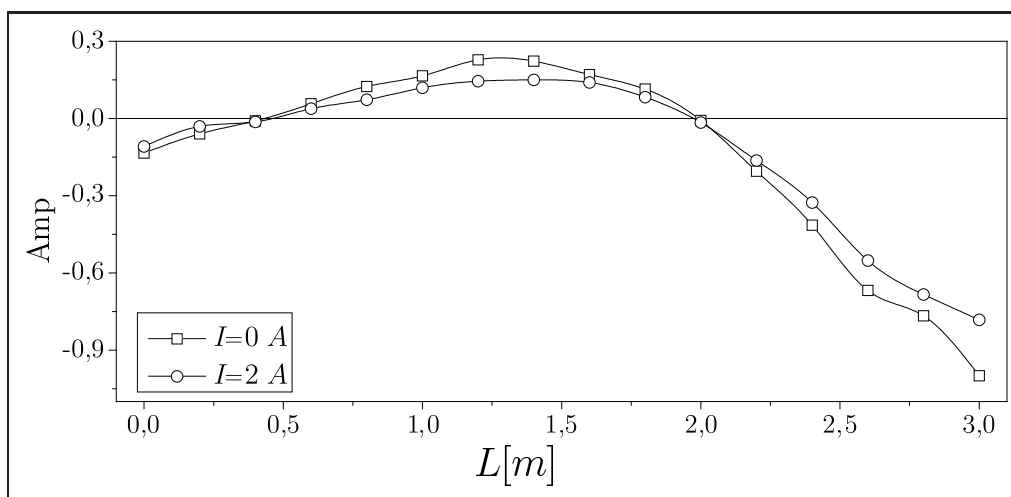
Widoczny jest wyraźny spadek amplitudy drgań dla każdej z badanych częstotliwości. Sumaryczny wpływ na poszczególne formy został pokazany w tabeli 8.1. Wyznaczono go jako średnią różnicę amplitud drgań mierzonych w szesnastu punktach pomiarowych znajdujących się na długości belki, dla każdej formy drgań osobno. Największy wpływ na amplitudę drgań zaobser-

Tabela 8.1. Spadek amplitudy drgań dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych

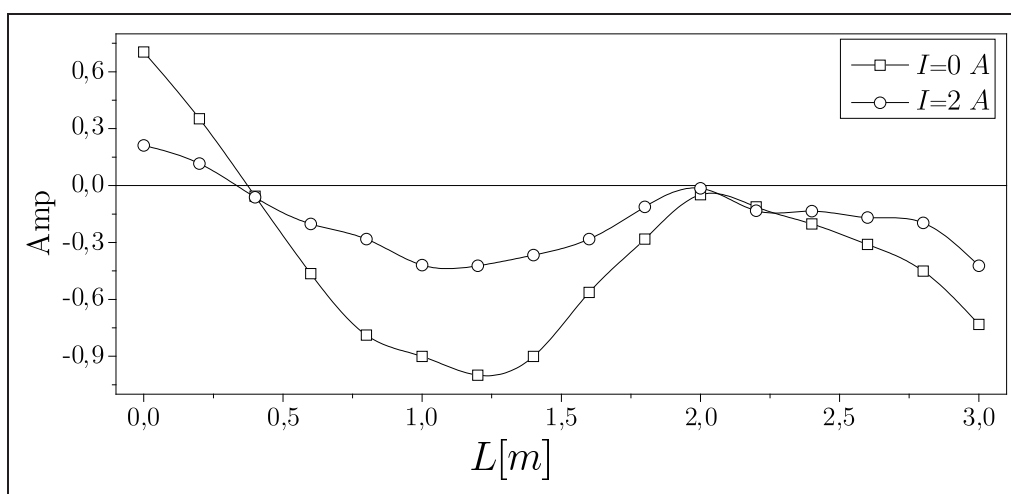
Częstotliwość [Hz]	5,5	15	34,5	49	61
Średni spadek amplitudy [%]	15	48	69	45	52

wowano dla formy występującej przy $f = 34,5\text{ Hz}$. Może mieć to związek z tym, iż tłumik był zamocowany właśnie w strzałce ugięcia tej formy.

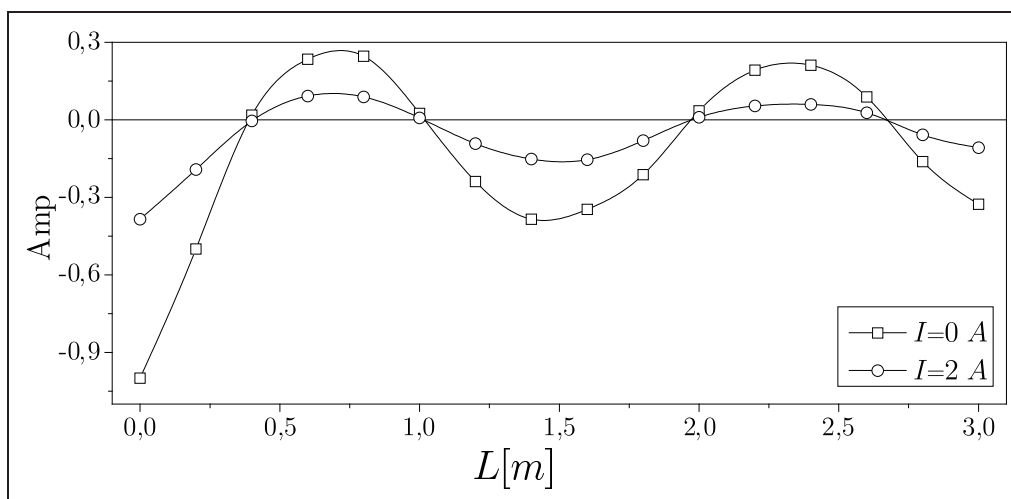
Nie zaobserwowano natomiast zmiany wartości poszczególnych częstotliwości. Takiego efektu można się było spodziewać poprzez analogię do układu jednomasowego (prosty oscylator harmoniczny z tłumieniem), gdzie zwiększenie tłumienia powoduje obniżenie wartości częstotliwości rezonansowej. W przypadku oddziaływania wywoływanego przez zastosowany tłumik z kompozytem magnetoreologicznym wartości częstotliwości nie ulegały zmianie, co pozwoliło na porównanie poszczególnych form drgań dla różnych wartości natężenia prądu sterującego.



(a) $f = 5.5 \text{ Hz}$

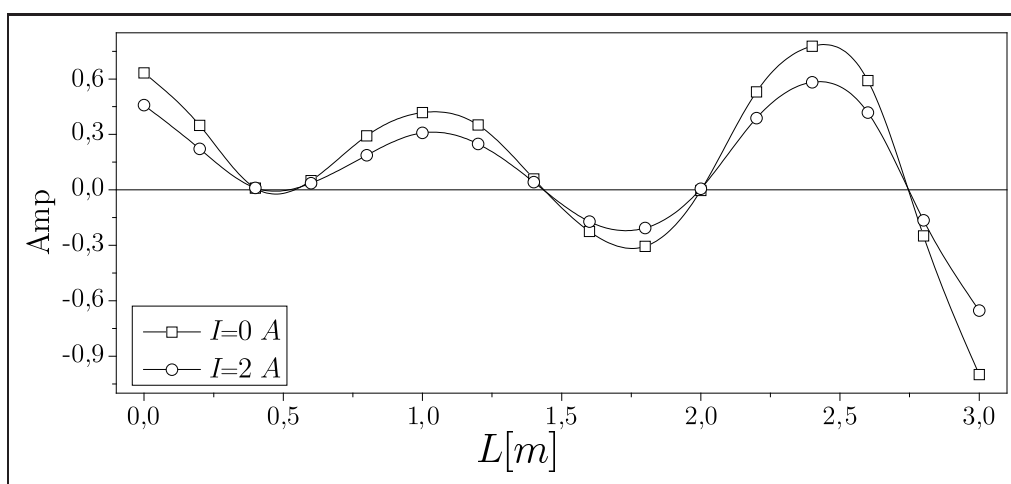


(b) $f = 15 \text{ Hz}$

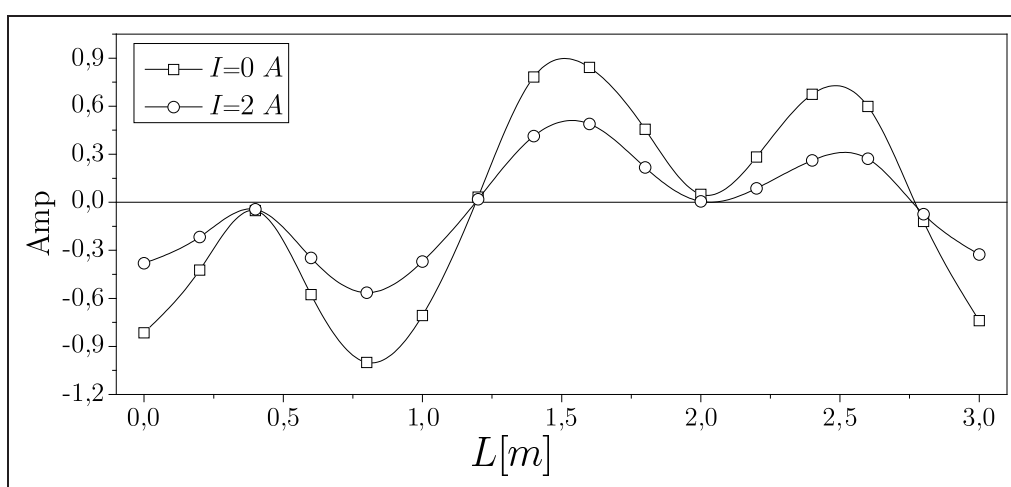


(c) $f = 34.5 \text{ Hz}$

Rysunek 8.6. Porównanie oddziaływania tłumika na poszczególne formy drgań belki



(d) $f = 49 \text{ Hz}$



(e) $f = 61 \text{ Hz}$

Rysunek 8.6. Porównanie oddziaływania tłumika na poszczególne formy drgań belki (kontynuacja z poprzedniej strony)

8.4. Podsumowanie

Celem zaprezentowanych w tym rozdziale badań było bezpośrednie wykazanie przydatności kompozytów magnetoreologicznych jako aktywnych materiałów tłumiących. W tym celu zbudowany został prototypowy tłumik z wykorzystaniem tych właśnie materiałów oraz pokazane zostało jego zastosowanie w wybranej konstrukcji drgającej, jaką była belka o dwóch podporach.

Ponieważ badana konstrukcja była obiektem modelowym, bez konkretnego przeznaczenia, badania skupiały się na pokazaniu całościowego wpływu, jaki powoduje zastosowanie sterowanego tłumika z kompozytem magnetoreologicznym. Najważniejszym rezultatem przeprowadzonych testów było pokazanie możliwość wpływania na amplitudę drgań i czas jej wygasania po-

przez sterowanie właściwościami tłumiącymi kompozytu. Uzyskano wyraźne zmniejszenie amplitudy drgań dla wszystkich częstotliwości i form modalnych przy wzroście natężenia pola magnetycznego oddziałującego na kompozyt.

9. Wnioski i uwagi końcowe

Przedłożone rezultaty pozwalają stwierdzić, iż właściwości tłumiące kompozytu magnetoreologicznego obciążonego cyklicznie w warunkach ścinania można opisać przy użyciu czteroparametrowego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego, którego mechaniczne stałe materiałowe są zależne funkcyjnie od natężenia pola magnetycznego. Udowodniono w ten sposób tezę pracy, osiągnięto cel główny i zrealizowano zadania szczegółowe.

Rezultaty szczegółowe omówiono dodatkowo poniżej. Wnioski podzielono umownie na odnoszące się do głównych celów i tezy pracy oraz do zagadnień dodatkowych, ważnych dla dalszego rozwoju wiedzy z zakresu cieczy magnetoreologicznych, kompozytów uzyskanych na ich bazie, a także metod mechaniki eksperymentalnej, identyfikacji oraz aplikacji kompozytów.

1. Wytworzono kompozyty z wykorzystaniem cieczy magnetoreologicznych i elastycznych matryc porowatych.
 - a) Opanowano technologię wytwarzania kompozytów magnetoreologicznych z wykorzystaniem elastycznych struktur porowatych i cieczy magnetoreologicznych. Zastosowano w tym celu gąbki poliuretanowe, do których wprowadzono ciecz MR. Ciecz wytworzono z użyciem dostępnych na rynku, komercyjnych składników w postaci oleju silikonowego oraz żelaza karbonyłkowego firmy BASF. Stworzono w ten sposób możliwość swobodnego kształtowania geometrii materiału, przeciwdziałano sedimentacji proszku składnika magnetycznego, obniżono koszt wytworzenia kompozytu (w porównaniu z kosztami cieczy o identycznej objętości), a w rezultacie stworzono nowe możliwości zastosowań materiałów magnetoreologicznych.
 - b) Uzyskano w rezultacie materiał o cechach **SMART**, którego właściwości mechaniczne można stymulować zewnętrznym polem magnetycznym. Wykazano silną podatność tłumienia mechanicznego na wartość natężenia pola magnetycznego. Wartość pola pętli histerezy, dla przyjętego zakresu zmian natężenia pola magnetycznego wzrosła trzy-

krotnie. Stwierdzono ponadto wyraźny wpływ częstotliwości obciążania mechanicznego. Wartości energii dyssypacji, podobnie jak wartość maksymalnego naprężenia w funkcji natężenia pola magnetycznego H dla częstotliwości 5, 10 i 15 Hz , były niemal jednakowe. Natomiast dla zakresu niskich częstotliwości (0,5 – 5 Hz) zaobserwowano znaczące zmiany obu badanych parametrów.

2. Stworzono możliwości eksperymentalne wyznaczenia tłumienia w kompozytach w warunkach zmiennych wartości parametrów pola mechanicznego i magnetycznego.
 - a) Zbudowano oryginalne stanowisko pomiarowe umożliwiające badanie kompozytów magnetoreologicznych w warunkach cyklicznego ścinania z możliwością zmiany natężenia pola magnetycznego oraz regulacji parametrów widma obciążenia mechanicznego (amplituda siły, częstotliwość). Konstrukcja stanowiska spełnia ponadto wymagania w zakresie wymienności kompozytu oraz regulacji geometrii badanego obiektu.
 - b) Wykonano układ kontrolno-pomiarowy, który zapewniał numeryczną nastawę parametrów mechanicznych i magnetycznych, posiadał system akwizycji obu typów sygnałów pomiarowych oraz zapewniał możliwość ich przetwarzania w celu wyznaczania energii dyssypacji i krzyżowych charakterystyk magnetomechanicznych.
 - c) Opracowano metodę badań umożliwiającą analizę wpływu parametrów obciążenia mechanicznego oraz natężenia pola magnetycznego na właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie identyfikacji modeli konstytutywnych.
 - d) Przeprowadzono testową i zasadniczą serię badań, których wyniki posłużyły do identyfikacji modeli tłumienia.

Wykazano w rezultacie pełną przydatność układu pomiarowego do badania właściwości kompozytów z cieczami MR w warunkach obciążeń cyklicznych.

3. Zaproponowano model reologiczny dla badanego kompozytu i przeprowadzono jego identyfikację.
 - a) Uzyskane dane doświadczalne zostały wykorzystane do budowy modelu konstytutywnego opisującego właściwości tłumiące w kompozytach MR. Analiza danych eksperymentalnych potwierdziła nieprzydatność modeli reologicznych znanych z literatury przedmiotu, a stosowanych do identyfikacji tłumienia w cieczach MR. Zaproponowano w rezulta-

cie opis materiału za pomocą czteroparametrowego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego. Poszczególne współczynniki modelu przyjęto za zależne funkcyjnie od natężenia pola magnetycznego H . Przeprowadzono analizę modelu oraz zaprojektowano procedury jego identyfikacji.

- b) Przeprowadzono dwuczęściowy proces identyfikacji parametrów modelu. Pierwszy etap zrealizowano dla sygnału wymuszenia z obszaru powyżej 5 Hz , czyli podstawowego zakresu częstotliwościowego przewidywanego zastosowania kompozytu. Ponieważ, jak wynikało z badań eksperymentalnych, wpływ lepkości był nieistotny – wykorzystano uproszczony model sprężysto-plastyczny z kinematycznym wzmocnieniem. Drugi, dodatkowy etap obejmował pilotażowe badanie wpływu efektów lepkich w zakresie niskich częstotliwości.
 - c) Wykazano w pełni zadowalającą poprawność modelu konstytutywnego w warunkach cyklicznego ścinania na całym obszarze działania pola magnetycznego w zakresie częstotliwości powyżej 5 Hz . Rezultat ten uzyskano w następstwie wyznaczenia parametrów modelu i porównania otrzymanych (wyliczonych) pętli histerezy z danymi eksperymentalnymi.
 - d) W następstwie wstępnej identyfikacji zakwestionowano przydatność modelu w zakresie najniższych badanych częstotliwości $f = 0,5 - 1\text{ Hz}$. Kształt pętli histerezy uzyskanych z modelu, mimo spełnienia warunku równości ich pól, odbiega istotnie od wyników eksperymentalnych. Przyczyn takiego stanu rzeczy może być kilka. Zależności w przyjętym modelu są liniowe i nie odzwierciedlają prawidłowo wszystkich związków występujących w materiale. Przyjęte kryterium zgodności wielkości pól pętli histerezy, jakkolwiek bardzo ważne z punktu widzenia właściwości tłumiących kompozytów, jest tylko jednym z możliwych. Z tego powodu wynik dla niskich częstotliwości należy traktować orientacyjnie i przyjąć jako punkt wyjściowy do dalszych badań.
4. Zaprezentowano przykład zastosowania tłumika z kompozytem MR
- a) Zaprezentowano prototypową konstrukcję własną tzw. półaktywnego tłumika z kompozytem zawierającym ciecz magnetoreologiczną. Do budowy wykorzystano elementy komercyjnego transformatora, wy-

tworzony kompozyt i rezultaty jego badań, co umożliwiło efektywne sterowanie tłumienia zewnętrznym polem magnetycznym.

- b) Zaprojektowano i wykonano stanowisko do badania efektywności oddziaływania tłumika. Jako testowy obiekt drgający wybrano belkę na dwóch podporach. Odmienne niż w większości znanych z literatury badań zdecydowano się na obiekt o charakterze ciągłym, a nie dyskretnym.
- c) Dokonano wyboru miejsca zamocowania tłumika w badanej konstrukcji z wykorzystaniem narzędzi analizy modalnej, tak by ominąć występowanie węzłów.
- d) Sprawdzono efektywność tłumienia drgań rejestrując czas wygaszania drgań swobodnych. Zarejestrowane przebiegi dla różnych wartości nastaw tłumika pokazały wyraźne skrócenie czasu drgań (przez wytłumienie rozumiano zmniejszenie amplitudy do 20% wartości początkowej). Wyznaczono ponadto wartość siły umożliwiającej osiągnięcie optymalnego wytłumienia drgań belki. Pokazano też, że dalsze zwiększanie tej siły prowadzi do wzrostu poszczególnych amplitud oraz czasów wygaszania drgań. Sprawdzeniu poddano także zmianę form drgań powstałych dla wyznaczonych częstotliwości rezonansowych. Amplitudy poszczególnych form uległy wyraźnemu zmniejszeniu w przypadku włączonego tłumika. Najlepszy wynik uzyskano dla formy drgań, dla której tłumik znajdował się dokładnie w strzałce ugięcia.

Dzięki możliwości sterowania właściwościami tłumiącymi kompozytu magnetoreologicznego można było w rezultacie wykonać urządzenie typu SMART, które da się efektywnie zastosować do tłumienia drgań.

- 5. Przeprowadzono badania referencyjne tłumienia dla cieczy magnetoreologicznych. Brak danych literaturowych na temat kompozytów na bazie cieczy MR był powodem podjęcia obszernego programu badań własnych z zakresu cieczy magnetoreologicznych, potraktowanych z konieczności jako materiał referencyjny. W tym celu:
 - a) Zestawiono i opisano wybrane modele konstytutywne cieczy MR oraz modele tzw. strukturalne tłumików z cieczami MR, a także przytoczono szeroką paletę ich zastosowań w technice i medycynie. Opanowano ponadto podstawy technologii wytwarzania cieczy, przydatne następ-

nie w procesie przygotowania kompozytów MR. Zestawiono i omówiono literaturę przedmiotu.

- b) Stworzono układ pomiarowy do badań tłumików z cieczą i opanowano metodykę pomiaru. Za podstawowy układ badań przyjęto profesjonalny tłumik firmy LORD, co umożliwiło porównanie rezultatów własnych z danymi producenta i przykładami z literatury przedmiotu.
- c) Przeprowadzono identyfikację właściwości tłumika z wykorzystaniem modeli Bingham oraz Bouc-Wena.

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 czternastu pracach (czasopismach lub recenzowanych materiałach konferencyjnych), których autorem lub współautorem jest doktorant.

Bibliografia

- [1] Ch. Alexiou, A. Schmidt, P. Hulin, R. Klein, Ch. Bergemann, W. Arnold. Magnetic Drug Targeting: Biodistribution and Dependency on Magnetic Field Strength in Vitro. *9th International Conference on Magnetic Fluids*, 2001.
- [2] Delphi Automotive. *Suspension Systems MAGNERIDE*, 2000. www.delphiauto.com.
- [3] BASF Aktiengesellschaft. *Carbonyl Iron Powders. A Versatile Metal Powder Specialty from BASF*, 2001. Catalog & Product Specification.
- [4] Antonio BicchiBicchi, Enzo Pasquale Scilingo, Nicola Sgambelluri, Danilo De Rossi. *Haptic Interfaces Based on Magnetorheological Fluids*. UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA Centro "E. Piaggio", 2002.
- [5] Jacek Bomba, Jerzy Kaleta. Giant Magnetostrictive Materials (GMM) - Functional Materials for Sensors and Actuators. *Workshop SMART'03, AMAS Conference Proceedings, Warsaw*, 2004.
- [6] Jacek Bomba, Jerzy Kaleta, Paweł Sawa. Application of Giant Magnetostrictive Material into Construction of Broad Spectrum Vibration Generator. *Materials Science Forum*, 482:395–398, 2005.
- [7] Trosten Butz, Oskar von Stryk. Modeling and Simulation of Rheological Fluid Devices. Raport instytutowy SFB-438-9911, TU-München, Universität Augsburg, 1999.
- [8] J. David Carlson. Low-Cost MR Fluid Sponge Devices. R. Tao, redaktor, *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*, strony 621–628. World Scientific, 1999.
- [9] J. David Carlson. What Makes a Good MR Fluid? *Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, 2001.
- [10] J. David Carlson, Michael Chrzan. MR Fluid Sponge Devices and Their Use in Vibration Control of Washing Machines. *Proceedings of the 8th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport, Beach, CA, 2001. SPIE.
- [11] J. David Carlson, Mark R. Jolly. MR Fluid, Foam and Elastomer Devices. *Mechatronics*, 10:555–569, 2000.
- [12] J. David Carlson, Wilfried Matthiis, James R. Toscano. Smart Prosthetics Based on Magnetorheological Fluids. Anna-Maria R. McGowan, redaktor, *Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, wolumen 4332, strony 308–316. SPIE, 2001.
- [13] Richard E. Christenson. *Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies*. Praca doktorska, The Graduate School of the University of Notre Dame, 2001.

- [14] Jérôme Claracq, Jérôme Sarrazin, Jean-Pierre Montfort. Viscoelastic Properties of Magnetorheological Fluids. *Rheology Acta*, 43:38–49, 2004.
- [15] Włodzimierz Derski, Stefan Ziemba. *Analiza modeli reologicznych*. PWN, 1968.
- [16] Suraj S. Deshmukh, Gareth H. McKinley. Compression Studies of Magneto-Rheological Fluid Filled Foams. *2002 ASME International Mechanical Engineering Congress*, 2002.
- [17] Suraj S. Deshmukh, Gareth H. McKinley. Adaptive Energy-Absorbing Materials Using Field Responsive Fluid-Impregnated Cellular Solids. *Advanced Functional Materials*, submitted, 2004.
- [18] Suraj S. Deshmukh, Gareth H. McKinley. Rheological Behavior of Magnetorheological Suspensions under Shear, Creep and Large Amplitude Oscillatory Shear (LAOS) Flow. *Proceedings XIVth International Congress on Rheology*. The Korean Society of Rheology, 2004.
- [19] Suraj S. Deshmukh, Gareth H. McKinley. *US Patent Application Publication Nr.: 2004/0173422 A1. Fluid-Filled Cellular Solids for Controlled*, 2004.
- [20] G. A. Dimock, J. E. Lindler, N. M. Wereley. Bingham Biplastic Analysis of Shear Thinning and Thickening in Magnetorheological Dampers. Norman M. Wereley, redaktor, *SPIE, Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems*, wolumen 3985, strony 444–455, Czerwiec 2000.
- [21] Krzysztof Dobrosz, Adam Matysiak. *Tworzywa sztuczne, materiałoznawstwo i przetwórstwo*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1994.
- [22] Andrzej Drescher. Analiza pewnego modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego. *Rozprawy Inżynierskie*, 15:713–729, 1967.
- [23] Goran Engdahl. *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*. Academic Press, 2000.
- [24] E. O Ericksen, F. Gordaninejad. A Magneto-Rheological Fluid Shock Absorber for an Off-Road Motorcycle. *International Journal Vehicle Design*, 2003.
- [25] FerroTec. *Ferrofluidic Vacuum Rotary Feedthroughs*, 2001. Catalog & Product Specification.
- [26] G. A. Flores, J. Liu. Embolization of Blood Vessels as a Cancer Therapy Using Magnetorheological Fluids. G. Bossis, redaktor, *Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, strony 146–152. World Scientific, 2001.
- [27] C. Gansau, Th. Goetze, N. Buske, M. Roeder, P. Goernert, M. Bahr. Magnetic Core/Shell Nanoparticles for Medical Application. *9th International Conference on Magnetic Fluids*, 2001.
- [28] P. McKnight Geoffrey. *[112] Oriented Terfenol-D Composites*. Praca doktorska, University of California, Los Angeles, 2002.
- [29] J. M. Ginder, L. C. Davis. Shear Stresses in Magnetorheological Fluids: Role of Magnetic Saturation. *Applied Physics Letter*, 65(26):3410–3412, 1994.
- [30] John W. Gravatt. Magneto-Rheological Dampers for Super-Sport Motorcycle Applications. Praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [31] G. L. Gulley. Structures of Magnetorheological Fluid. R. Tao, redaktor, *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*, strony 331–338. World Scientific, 1999.
- [32] Vincent A. Hackley, Chiara F. Ferraris. *Guide to Rheological Nomencla-*

- ture: *Measurement in Ceramic Particulate Systems*. National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [33] Stephen D. Jacobs, Donald Golini, Yuling Hsu, Birgit E. Puchebner, D. Strafford, William I. Kordonsky, Igor V. Prokhorov, Edward M. Fess, D. Pietrowski, William I. Kordonski. Magnetorheological Finishing: a Deterministic Process for Optics Manufacturing. *International Conference on Optical Fabrication and Testing*, 2576:372–382, 1995.
 - [34] Doyoung Jeon, Chanhoo Park, Kiyang Park. Vibration Suppression by Controlling an MR Damper. M. Nakano, K. Koyama, redaktorzy, *Proceedings of the 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications*, strony 853–860. World Scientific, 1997.
 - [35] Zehui Jiang, Kunquan Lu. A Single-Chain Model for Quasi-Static Shear-Strain Properties of Magnetorheological Fluids. G. Bossis, redaktor, *Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, strony 841–846. World Scientific, 2001.
 - [36] Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender, J. David Carlson. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. Raport instytutowy, Thomas Lord Research Center, Lord Corporation, 1999.
 - [37] Mark R. Jolly, J. David Carlson, Beth C. Munoz, Todd A. Bullions. The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7:613–622, 1996.
 - [38] M. Kaczmarek, T. Hornowski, A. Skumiel, M. Łabowski. Ultrasonic Waves in Magnetic Liquids: Two-Phase Approach and Experimental Results. *Acta Physica Polonica*, A 97:639–649, 2000.
 - [39] Jerzy Kaleta. *Doświadczalne podstawy formułowania zmęczeniowych hipotez energetycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1998.
 - [40] Jerzy Kaleta, Paweł Kustroń, **Daniel Lewandowski**. Tłumienie drgań w belce z wykorzystaniem układu adaptacyjnego z kompozytem magnetoreologicznym. *Mechanika Ośrodków Niejednorodnych*, Zielona Góra – Łagów, 2005.
 - [41] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**. Metodyka badań tłumika z cieczą magnetoreologiczną w warunkach cyklicznych obciążeń. *Materiały XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, strony 179–185, kwiecień 2002.
 - [42] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**. Investigation of Magnetorheological Fluid Properties in Shear Mode Damping Device. *AMAS/ECOMAS/STC Workshop on Smart Materials and Structures – SMART’03, Jadwisin, Poland*, 2003.
 - [43] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**. Układ o zmiennych parametrach do badania tłumienia w cieczach magnetoreologicznych. *II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji*, Augustów, 2003.
 - [44] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**. Damping in Selected Magnetorheological Composites Under Cyclic Loading. *3rd International Conference Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity*, Lviv, Ukraine, 2004.
 - [45] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Piotr Zając. Damping with the Magnetorheological Fluids (MRF), Experimental Methods and Model Verification. *19th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, strony 120–121, 2002.
 - [46] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Piotr Zając. Cyclic Properties of

- Magnetorheological Composite. *20th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Győr, Hungary, 2003.
- [47] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Piotr Zajac. Wpływ sztywności matrycy na tłumienie w kompozycie magnetoreologicznym. *IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce–Cedzyna, 2003.
 - [48] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Piotr Zajac. Tłumienie w wybranych kompozytach magnetoreologicznych w warunkach obciążeń cyklicznych. *XX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Bydgoszcz, 2004.
 - [49] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Piotr Zajac. Experimental identification of magnetorheological composites and elastomers. *Materials Structure & Micromechanics of Fracture, Materials Science Forum*, 482:403–407, 2005.
 - [50] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Grażyna Ziętek. Model ciała kompozytu magnetoreologicznego w warunkach obciążenia cyklicznego. *XX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Bydgoszcz, 2004.
 - [51] Jerzy Kaleta, **Daniel Lewandowski**, Grażyna Ziętek. Viscoplastic Material Model of Magnetorheological Composite for Cyclic Loading. *3rd International Conference Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity*, Lviv, Ukraine, 2004.
 - [52] Jerzy Kaleta, Piotr Zajac. Identyfikacja tłumienia magnetomechanicznego w cieczach i kompozytach typu MRF. *II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji Augustów*, 2003.
 - [53] Igor Kisiel. *Zastosowanie modelu reologicznego ciała M/V w mechanice gruntów*. Ossolineum, 1967.
 - [54] D. Kittipoomwong, Daniel J. Klingenberg, John C. Ulicny. Simulations of Bidisperse Magnetorheological Fluids. G. Bossis, redaktor, *Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, strony 834–840. World Scientific, 2001.
 - [55] W. Kordonsky, D. Golini. Progress Update in Magnetorheological Finishing. M. Nakano, K. Koyama, redaktorzy, *Proceedings of the 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications*, strony 837–844. World Scientific, 1997.
 - [56] Paweł Kustroń. Tłumienie drgań w konstrukcji mechanicznej z wykorzystaniem układu adaptacyjnego z cieczą magnetoreologiczną. Praca magisterska, opiekun: dr hab. inż Jerzy Kaleta, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, 2004.
 - [57] M. Kutz, redaktor. *Handbook of Materials Selection*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 2002.
 - [58] Dietrich Lampe. *Untersuchungen Zum Einsatz Von Magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen*. Praca doktorska, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden, 2000.
 - [59] Dug-Young Lee, Young-Tai Choi, Norman M. Wereley. Performance Analysis of Smart Impact Damper System Using Herschel-Bulkley Model. G. Bossis, redaktor, *Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, strony 256–262. World Scientific, 2001.
 - [60] Yeongrok Lee, Doyoung Jeon. A Study on the Vibration Attenuation of a Driver Seat Using an MR Fluid Damper. G. Bossis, redaktor, *Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, strony 70–76. World Scientific, 2001.
 - [61] M. Lokander. *Performance of Magnetorheological Rubber Materials*. Praca doktorska, Kungliga Tekniska Högskolan, 2004.

- [62] M. Lokander, B. Stenberg. Improving the Magnetorheological Effect in Isotropic Magnetorheological Rubber Materials. *Polymer Testing*, 22:677–680, 2003.
- [63] M. Lokander, B. Stenberg. Performance of Isotropic Magnetorheological Rubber Materials. *Polymer Testing*, 22:245–251, 2003.
- [64] Materials Division Lord Corporation. *Designing with MR Fluids*, 1999.
- [65] Materials Division Lord Corporation. *Wonder Box, Device Controller, RD-3002-1*, 1999.
- [66] Lord Corporation, Materials Division. *Motion Master, Ride Management System*, 2001. www.rheonetic.com.
- [67] Lord Corporation, Materials Division. *Water-Based MR Fluid MRF-241ES Product Bulletin*, 2002.
- [68] Lord Corporation, Materials Division. *Hydrocarbon-Based MR Fluid MRF-132AD Product Bulletin*, 2003.
- [69] Lord Corporation, Materials Division. *MR 180KN Damper, Preliminary Product Bulletin*, 2003.
- [70] Lord Corporation, Materials Division. *MR Controllable Friction Damper RD-1097-01, Product Bulletin*, 2003.
- [71] Lord Corporation, Materials Division. *MR Damper RD-1003-5, Product Bulletin*, 2003.
- [72] Lord Corporation, Materials Division. *Silicone-Based MR Fluid MRF-336AG Product Bulletin*, 2004.
- [73] V. A. Lubarda, D. J. Benson, M. A. Meyers. Strain-rate Effects in Rheological Models of Inelastic Response. *International Journal of Plasticity*, 19:1097–1118, 2003.
- [74] H. V. Ly, F. Reitich, M. R. Jolly, H. T. Banks, Kazi Ito. Simulations of Particle Dynamics in Magnetorheological Fluids. *Journal of Computational Physics*, 155:160–177, 1999.
- [75] J. Wilson Malcolm, Alan Fuchs, Faramarz Gordaninejad. Development and Characterization of Magnetorheological Polymer Gels. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(14):2733–2742, 2002.
- [76] Teresa Mann. *Why Has Our Work Has Focused on MR Fluid Technology?* Lord Corporation, Materials Division, 2002.
- [77] R. Jolly Mark, J. David Carlson, Beth C. Munoz. A Model of the Behavior of Magnetorheological Materials. *Smart Materials and Structures*, 5:607–614, 1996.
- [78] Constantinos Mavroidis, Yoseph Bar-Cohen, Bourad Bouzit. *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles – Reality, Potential and Challenges*, rozdział 19, Haptic Interfaces Using Electrorheological Fluids, strony 567–594. SPIE Press, 2001.
- [79] Grzegorz Mikulowski, Jan Holnicki-Szulc. Adaptive Aircraft Shock Absorbers. *Proceedings of the Third European Conference on Structural Control, 3ECSC, Vienna University of Technology, Vienna, Austria*, 2004.
- [80] Andrzej Milecki, Andrzej Ławniczak. *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1999.
- [81] Andrzej Milecki, Dariusz Sędziak, Mikołaj Hauke. Zastosowanie cieczy magnetoreologicznych w pochłaniaczach energii. *IV Wrocławskie Sympozjum, Automatyzacja Produkcji, Nauka–Wiedza–Innowacje*, number 41, T.2 serii Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki

- Wrocławskiej, strony 268–274. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [82] Stefan Müller. *Zum Einsatz von Semi-Aktiv Aktoren zur Optimale Schwingungsreduktion in Tragwerken*. Praca doktorska, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Mechanik, 2000.
 - [83] M. Nakano, H Yamamoto, M. R. Jolly. Dynamic Viscoelasticity of a Magnetorheological Fluids in Oscillatory Slit Flow. M. Nakano, K. Koyama, redaktorzy, *Proceedings of the 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications*, strony 551–559. World Scientific Publishing, 1997.
 - [84] A. Nethe, Th. Scholz, H.-D. Stahlmann. Improving the Efficiency of Electric Motors Using Ferrofluids. *Magnetohydrodynamics*, 37(3):312–317, 2001.
 - [85] Autor nieznany. *Magnetics Fluids in Chemical Engineering*. <http://www.ferrotec-europe.de/pdf/magneticfluidaslubricant.en.pdf>.
 - [86] James A. Norris. Behavior of Magneto-Rheological Fluids Subject to Impact and Shock Loading. Praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
 - [87] Stefan Odenbach. Magnetics fluids. *Advances in Colloid and Interface Science*, 46:263–282, 1993.
 - [88] Sylvian Olivier, Grażyna Ziętek. Analyse du Comportement des Matériaux Élasto-Viscopastiques Pour des Chargements Cycliques. PRE 4/2004, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, 2004.
 - [89] Christopher A. Paré. Experimental Evaluation of Semiactive Magneto-Rheological Suspensions for Passenger Vehicles. Praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
 - [90] J. Popplewell, R. E. Rosesweig, J. K. Siller. Magnetorheology of Ferrofluid Composites. *Journal of Magnetism and Magnetics Materials*, 149:53–56, 1995.
 - [91] James C. Poynor. Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers. Praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
 - [92] Edward M. Purizhansky. *US Patent Nr. 6,673,258 B2. Magnetically Responsive Foam and Manufacturing Process Therefor*, 2004.
 - [93] Jacob Rabinow. *US Patent Nr. 2,575,360. Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device*.
 - [94] Peter J. Rankin, Andrew T. Horvath, Daniel J. Klingenberg. Magnetorheology in Viscoplastic Media. *Rheology Acta*, 38:417–477, 1999.
 - [95] Brian A. Reichert. Application of Magnetorheological Dampers for Vehicle Seat Suspensions. Praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
 - [96] R. E. Rosensweig. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
 - [97] Bogdan Sapiński. *Linear Magnetorheological Fluid Dampers for Vibration Mitigation: Modeling, Control and Experimental Testing*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2004.
 - [98] F. Scarpa, F. C. Smith. Passive and MR Fluid-coated Auxetic PU Foam-Mechanical, Acoustic, and Electromagnetic Properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15:973–979, 2004.
 - [99] Mel Schwartz, redaktor. *Encyclopedia of Smart Materials*. John Wiley & Sons, 2002.

- [100] Genc Seval. *Synthesis and Properties of Magnetorheological (MR) Fluids*. Praca doktorska, University of Pittsburgh, School of Engineering, 2002.
- [101] Y. Shen, M. F. Golnaraghi, G. R. Heppler. Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15:27–35, 2004.
- [102] R. Sheng, G.A. Flores, J. Liu. In Vitro Investigation of a Novel Cancer Therapeutic Method Using Embolizing Properties of Magnetorheological Fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 194:167–175, 1999.
- [103] David E. Simon. Experimental Evaluation of Semiactive Magnetorheological Primary Suspensions for Heavy Truck Applications. Praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [104] Jacek Skrzypek. *Plastyczność i pełzanie*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa, 1986.
- [105] A. Skumiel, A. Józefczak, M. Łabowski. The Influence of the Concentration of Ferroparticles in a Ferrofluid on its Magnetic and Acoustic Properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36:3120–3124, 2003.
- [106] Jr. B. F. Spencer, S. J. Dyke, J. D. Carlson. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 123(3):230–238, 1997.
- [107] Mandayam A. Srinivasan. *What is Haptics?* Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [108] McMurray William Stewart, Matthew John Ginder, Larry Dean Elie, Edward Nichols. *US Patent Nr.:5,816,587. Method and Apparatus for Reducing Brake Shudder*, 1998.
- [109] M. Simon Tammy, F. Reitich, M. R. Jolly, K. Ito, H. T. Banks. Estimation of the effective permeability in magnetorheological fluids. *Journal Intelligent Materials Systems and Structures*, 10(11):872, 1999.
- [110] **Daniel Lewandowski**. Stanowisko do badań tłumienia cieczy magneto-reologicznych w warunkach cyklicznych obciążeń. *III Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce–Cedzyna*, 2001.
- [111] **Daniel Lewandowski**, Grażyna Ziętek. Wybrane modele konstytutywne dla kompozytów magneto-reologicznych. *Mechanika Ośrodków Niejednorodnych, Zielona Góra – Łagów*, 2005.
- [112] Xiaojie Wang, Faramarz Gordaninejad. Herschel-Bulkley Analysis of Electro- and Magneto-Rheological Controllable Fluids in Flow Mode. R. Tao, redaktor, *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*, strony 568–578. World Scientific, 1999.
- [113] Jon R. Watson. *US Patent Nr.:5,609,353. Method and Apparatus for Varying the Stiffness of a Suspension Bushing*, 1997.
- [114] Li Weihua. *Rheology of MR Fluids and MR Damper Dynamic Response: Experimental and Modeling Approaches*. Praca doktorska, School of Mechanical and Production Engineering, 2000.
- [115] Krzysztof Wilczyński. *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [116] Bogdan Wiślicki. Kompozyty magneto-reologiczne jako czynnik polepszający właściwości eksploatacyjne urządzeń mechanicznych. *Przegląd Mechaniczny*, 4:18–24, 2002.
- [117] Bogdan Wiślicki, Wojciech Lassota, Jan Holnicki-Szulc. Możliwości polep-

- szania żywotności węzłów łożyskowych za pomocą magnetoreologicznych. *Tribologia*, 5:701–709, 1999.
- [118] H. Yamamoto, H. Nakano. Dynamic Viscoelasticity and its Mechanical Model of an MR Suspension in Oscillatory Flow Mode. R. Tao, redaktor, *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*, strony 665–673. World Scientific, 1999.
 - [119] Guangqiang Yang. *Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control*. Praca doktorska, Graduate School of the University of Notre Dame, 2001.
 - [120] Fu Yi, Shirley J. Dyke, Juan M. Caicedo, David J. Carlson. Experimental Verification of Multi-Input Seismic Control Strategies for Smart Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(11), 2001.
 - [121] An. Yuxian, T. Shaw Montgomery. Actuating Properties of Soft Gels with Ordered Iron Particles: Basis for a Shear Actuator. *Smart Materials and Structures*, 12(2):157–163, 2003.
 - [122] M Zrinyi, D. Szabó, H. G. Kilian. Kinetics of Shape Changes of Magnetic Field Sensitive Polymer Gels. *Polymer Gels and Networks*, 6, 1999.

„Dla materiałów i konstrukcji SMART otwierają się szerokie horyzonty zastosowań. Możliwość wykorzystania tych materiałów w produkcji różnorodnych konstrukcji SMART jest ograniczona jedynie talentem, zdolnościami i umiejętnością nieszablonowego myślenia.”¹⁾

Przewidywane obszary badań i zastosowań. Wskazane kierunki aktywności naukowej zespołu

Analiza trendów zebranych z różnych źródeł (nieliczne publikacje, internet, dane od producentów), własne doświadczenia autora zgromadzone przy przygotowaniu rozprawy doktorskiej oraz równoległe aktywności podejmowane w Zakładzie Mechaniki Ośrodków Ciągłych (Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej), pozwalają na podjęcie próby przewidywania rozwoju w zakresie rozpatrywanej grupy materiałów. Można zatem, zdaniem autora, prognozować w najbliższej przyszłości pewne kierunki działań naukowych oraz inżynierskich, a także zastosowania, które mają szanse na sukces techniczny i ekonomiczny. Zagadnienia te krótko scharakteryzowano poniżej.

1. W zakresie technologii wytwarzania „mokrych”, porowatych kompozytów magnetoreologicznych nasycanych cieczami MR
 - Wytworzona zostanie paleta „konwencjonalnych” (czyli powstałych z już istniejących na rynku komponentów) kompozytów z różnymi parametrami paramagnetycznej struktury nośnej porowatej i różnymi cieczami MR.
 - Wytworzone zostaną nowe kompozyty polimerowe, w których osnową materiałów porowatych będzie spieniona ciecz ferro, spełniająca jednocześnie funkcję elastycznego „rdzenia” magnetycznego, czyli magnetowodu. Rdzeń pełnił będzie jednocześnie rolę matrycy nośnej. Dzięki temu rozproszenie strumienia magnetycznego będzie niewielkie. Spowoduje to zmniejszenie natężenia pola magnetycznego niezbędnego do stymulacji właściwościami mechanicznymi kompozytu.
 - Wytworzone zostaną nowe gatunki mikro- i nanoproszków ferromagnetycznych do cieczy MR i ferro (w tym do wykorzystania w rozpa-

¹⁾ „The future of SMART materials and structures is wide open. The use of SMART materials in a product and the type of SMART structures that one can design is only limited to one's talents, capabilities, and ability to think out of the box.” [57]

trywanych kompozytach), w których zastosowana zostanie technologia zol-żel. Poszerzy to znacznie możliwości wykorzystania tej klasy cieczy i kompozytów w medycynie, gdyż kluczowy w technologii zol-żel krzem jest akceptowany przez organizm i łatwy do wydalenia.

2. W zakresie metod badawczych mechaniki eksperymentalnej

- Opracowane zostaną nowe metodyki badania kompozytów w warunkach zmiennych w czasie parametrów mechanicznych i magnetycznych. Stworzone zostaną w tym celu stanowiska badawcze (laboratoryjne tłumiki) do obciążania kompozytów w warunkach statycznych, cyklicznych i tzw. programowanych obciążeń ścinających, rozciągająco-ściskających i złożonych. Zbudowane zostaną sterowane numerycznie układy do akwizycji, pomiaru i przetwarzania sygnałów magnetycznych i mechanicznych. Wprowadzona zostanie możliwość niezależnego sterowania odkształceniem lub naprężeniem, co ma kluczowe znaczenie w procedurach identyfikacji modeli tłumienia.
- Zbadane zostaną właściwości tłumiące w szerokim (również ekstremalnym) zakresie wartości pól magnetycznych i częstotliwości zadawania pola mechanicznego. Sprawdzana będzie standardowo żywotność zmęczeniowa kompozytów i procesy starzenia się matrycy i cieczy.
- Kluczowe znaczenie będzie miało uproszczenie i zwiększenie efektywności stymulacji magnetycznej, co wpłynie na poszerzenie możliwości zastosowań kompozytów i zmniejszenie wydatku energetycznego. Za szczególnie obiecujące uważa się w tym zakresie dyskretne systemy sterowania polem magnetycznym.

3. W zakresie modelowania właściwości tłumiących kompozytów

- Materiały SMART, w tym i kompozyty magnetoreologiczne, są dobitnym przykładem, jak bardzo inżynieria materiałowa wpływa na rozwój mechaniki. Widać wyraźnie, że konwencjonalne modele konstytutywne, przydatne uprzednio w przypadku metali czy nawet cieczy MR, nie spełniają oczekiwań w zakresie kompozytów MR. Stąd spodziewać się należy szybkiego rozwoju modeli (których parametry mechaniczne uzależnione są od natężenia pola magnetycznego) oraz sposobów ich identyfikacji. Rozwój modelowania jest bowiem warunkiem skutecznego sterowania tej klasy materiałami i wyzyskania ich kluczowej cechy SMART.
- Innym podejściem proponowanym w literaturze przedmiotu w zakresie

modelowania jest wykorzystanie teorii fraktali, a także tzw. stochastycznej teorii mikrostruktury¹⁾.

4. W zakresie zastosowań kompozytów

- Kompozyty wykorzystane zostaną przede wszystkim do budowy takich tzw. półaktywnych tłumików o szerokich możliwościach zastosowań i zakresie przenoszonych obciążeń. Głównymi obszarami zastosowań będą: transport (wszystkie typy samochodów, pojazdy specjalistyczne do pracy w warunkach terenowych, kopalnianych), budowle i konstrukcje w warunkach sejsmicznych lub quasi-sejsmicznych (np. zagrożenia tąpnięciami), duże konstrukcje przemysłowe będące źródłem drgań (także i hałasu), artykuły gospodarstwa domowego (pralki, roboty kuchenne itp.).
- Znane są pierwsze udane zastosowania militarne (np. eliminacja wpływu drgań układu napędowego helikoptera na celność działka szybkostrzelnego), których poszerzenie niewątpliwie nastąpi.
- Barięą na drodze do szerokich zastosowań jest rozwój układów sterowania parametrami kompozytów, co wymaga skojarzonej wiedzy z zakresu modelowania, identyfikacji i algorytmów zarządzających sygnałami oraz odpowiednich procesorów.

5. W zakresie komercjalizacji dorobku naukowego

- Kompozyty magnetoreologiczne to produkty zaliczane do grupy materiałów *high-tech* i wytwarzane przez niewielką grupę producentów. Produkcja i ich stosowanie jest uznawana za jedną z miar innowacyjności firm i regionów.
- Kompozyty magnetoreologiczne mogą być obiektem udanych komercjalizacji. Wytwarzanie produktów z ich udziałem może być podjęte przez przedsiębiorstwa typu *spin-off* lub podmioty MŚP²⁾.
- W wielu przypadkach wymagana infrastruktura (powierzchnia robocza hali, aparatura itp.) zaliczana jest do tzw. podstawowej i nie wymaga dużych nakładów finansowych. Wysokiej jakości komponenty są również możliwe do nabycia lub samodzielnego wytworzenia (np. ciecz MR). Kluczowe znaczenie mają zatem kompetencje, a nie wyposażenie.

¹⁾ *ang. stochastic theory of microstructure*

²⁾ małe i średnie przedsiębiorstwa

Powyżej ograniczono przewidywania i sugestie jedynie do kompozytów porowatych wypełnionych cieczami MR. Podobne prognozy można podjąć dla kompozytów porowatych wypełnionych „suchymi” materiałami ferromagnetycznymi czy szerokiej palety kompozytów litych, elastomerów (w tym na bazie silikonów, gum itp. oraz materiałów wysokowytrzymałych, takich jak np. włókna węglowe czy aramidowe).

Wrocław, czerwiec 2005

Summary

Damping properties of magnetorheological composites. Tests, models, identification

Identification of damping characteristics of magnetorheological composites constitutes the main goal of the paper. Tests were carried out under cyclic shearing. Elastic porous matrix filled with magnetorheological liquid has been chosen for examinations. Such composites are commonly named also Magnetorheological Fluids Impregnated Solids or Magnetorheological Foams. Material manufactured has useful properties close to magnetorheological liquid but geometry and sizes can be freely formed. This gives a chance to reduce costs and to extend applications of SMART materials from this group.

Survey in literature devoted to this group of SMART materials¹⁾ entailed original classification of SMM materials. Very limited number of publications concerning composites suggests to treat most examined magnetorheological liquids as the reference material. Cited papers as well as own research are devoted to structure of MR liquids, methods of manufacturing, examinations and constitutive models. The wide research program of composites has been carried out. Ferrofluids and magnetorheological elastomers are also discussed.

Identification of damping characteristics of magnetorheological composites constitutes the main goal of the research program undertaken. The original composite with stable properties has been manufactured. Experimental stand for test under cyclic shearing has been constructed. Controlling system as well as signal acquisition system enabled examination of magnetic and mechanical properties. The basic series of tests under stress control determined influence of mechanical parameters (frequency, load amplitude) and magnetic parameters (field intensity) onto character and the form of dissipation energy ΔW treated as the fundamental damping characteristic.

Models of MR known from literature appeared inapplicable. Therefore, the own original model was proposed. Composite is the elasto-visco-plastic materials according to accepted assumptions. More accurately, composite behaves as the elasto-viscotic material below plasticity limit and it manifests visco-plastic properties above this limit. The rheological model with four parameters depending on magnetic field intensity was examined. Detailed discussion allowed to find dissipated energy and to indicate terms responsible for viscotic and elastic properties suitably. Numerical simulations determined properties under limit conditions.

Identification of parameters and the multi step final identification constitutes the next stage. Energy of hysteresis loop ΔW was accepted as criterial quantity. Identification has been carried out within the frequency range $5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$ according to future applications. Within this range, the four parameter model was simplified since one may neglect terms related to viscosity. It means the three

¹⁾ SMM – SMART magnetic materials

parameter model (elasto-plastic with linear kinetic hardening) suffices to control effectively damping properties of magnetorheological composite.

In addition the identification of the full four parameter model has been performed within the frequency range $0,5 \leq f \leq 5 \text{ Hz}$, where experiments indicated influence of viscotic effects. Results obtained appear unsatisfactory and suggest future direction of research. Finally, the thesis includes list of results split into six groups according to topics concerned. Suggestions above future directions of research and scientific activities of entire team during nearest years complete the thesis.

Резюме

ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ. ИССЛЕДОВАНИЯ, МОДЕЛИ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Главной целью, принятой в работе, была идентификация демпфирующих свойств избранного класса магнитореологических композитов в условиях циклического срезания. Объектом исследований был композит, матрицу которого создавала эластичная пористая структура. Поры были заполнены магнитореологической жидкостью. Так понимаемые композиты выступают в англоязычной литературе по данной теме также под названием *Magnetorheological Fluids Impregnated Solids* или *Magnetorheological Foams*. В результате был получен материал с эксплуатационными свойствами (функциональными), похожими на магнитореологическую жидкость, геометрию и размеры которого можно, по мере возможности, произвольно формировать (в противовес самой жидкости). Это дает шанс на понижение стоимости и расширение возможности применения такого класса SMART материалов. Был проведен просмотр магнитных материалов из группы SMART. Предпринята авторская попытка классификации материалов SMM.

Небольшое количество разработок по теме композитов было поводом подхода к магнитореологическим жидкостям, к наиболее известным объектам этого класса, как к своего рода эталонному материалу (референционному). Поэтому широко приведены работы, посвященные жидкостям и выполнена обширная программа собственных исследований в данной области. Просмотр литературы и собственные работы касались построения жидкости МРЖ, технологии изготовления, экспериментальных методов, основных (конститутивных) моделей, так называемых структурных моделей для демпферов с жидкостями, а также применений жидкостей. Рассмотрены также феррожидкости и магнитореологические эластомеры. На этой основе была выполнена программа исследований из области композитов.

Целью обширной программы основных экспериментальных исследований было установление демпфирования в композитах. Для этого был создан оригинальный композит с повторяемыми свойствами. Был сконструирован измерительный стенд для исследований в условиях циклического срезания. Построена система управления, а также аквизиции и обработки измерительных сигналов, как механических, так и магнитных. Основная серия исследований была проведена в условиях управления напряжением. Их целью было определение влияния механических параметров (частота, амплитуда воздействий), а также магнитных (напряженность поля) на характер и форму энергии рассеяния ΔW в качестве величины, характеризующей демпфирующие свойства.

Модели, известные по литературе предмета, для жидкости МРЖ ока-

зались непригодными. Поэтому была предложена собственная модель, учитывающая, что материал композита являясь пластично-вязко-упругим телом, а точнее телом вязко-упругим до предела пластичности и вязко-пластичным выше этого предела. Были исследованы возможности реологической модели, в которой четыре параметра были обусловлены напряженностью магнитного поля. Затем были введены зависимости на диссипированную энергию при выделении элементов, связанных с вязкими и пластичными свойствами. Числовые симуляции модели позволили предвидеть ее поведение в предельных условиях.

В дальнейшем была определена процедура идентификации параметров, а также проведена свойственная многоступенчатая идентификация. Критериальной величиной принята энергия цикла гистерезиса ΔW . Идентификация проводилась для частот будущих применений композитов, в пределах $5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$. Было доказано, что в этом пространстве модель с четырьмя параметрами можно упростить, поскольку можно пренебречь влиянием элемента, содержащего вязкость. В итоге доказано, что модель из трех параметров (вязко-пластичная с линейным кинематическим усилением) может эффективно использоваться для управления демпфирующими свойствами магнитореологического композита.

Дополнительно проведена идентификация полной модели с четырьмя параметрами в пределах частот $0,5 \leq f \leq 5 \text{ Hz}$, в которой экспериментально доказано влияние вязких эффектов. Полученные результаты были признаны неудовлетворительными и были сформулированы указания относительно направления дальнейшей работы.

Результаты, полученные в работе, представлены в виде выводов и заключительных замечаний, упорядоченных в шести тематических блоках. В заключении работы даются указания относительно предусматриваемых областей исследований и применений по данной теме в ближайшие годы.

Предложены также направления дальнейшей собственной активности коллектива.

Kurzfassung

Dämpfende Eigenschaften der magnetorheologischen Verbundwerkstoffe. Untersuchungen, Modelle, Identifizierung

Das in der Dissertation angenommene Hauptziel war die Identifizierung der dämpfenden Eigenschaften der gewählten Klasse von magnetorheologischen Verbundwerkstoffen (MRC¹⁾) unter den Bedingungen des zyklischen Schubs. Das Versuchsobjekt war ein Verbundwerkstoff, dessen Matrix eine elastische Porenstruktur bildete. Die Poren wurden mit der magnetorheologischen Flüssigkeit (MRF²⁾) gefüllt. Die so begriffenen Verbundwerkstoffe treten in der englischsprachigen Fachliteratur auch unter dem Begriff *magnetorheological fluids impregnated solids* bzw. *magnetorheological foams* auf. Im Endeffekt erhielt man einen Werkstoff mit Nutzeigenschaften (funktionalen Eigenschaften), die den magnetorheologischen Flüssigkeiten ähnlich sind. Die Geometrie dieses Werkstoffes und seine Abmessungen können gewissermaßen beliebig gestaltet werden (im Gegensatz zu der Flüssigkeit selbst). Dadurch können die Kosten herabgesetzt und die Anwendungsmöglichkeiten dieser Klasse SMART-Werkstoffe (SMM³⁾) erweitert werden. Es wurde eine Übersicht der magnetischen Werkstoffe der Gruppe SMART durchgeführt. Der Autor versuchte, die SMM Werkstoffe zu klassifizieren. Eine geringe Anzahl der Fachliteraturpositionen im Bereich der Verbundwerkstoffe war die Ursache dafür, dass magnetorheologische Flüssigkeiten, die bekanntesten Objekte dieser Klasse, als gewisser Art Referenzstoffe betrachtet wurden. Aus diesen Gründen wurden Publikationen auf dem Gebiet der Flüssigkeiten ausführlich zitiert und ein umfangreiches Programm in diesem Bereich durchgeführt. Die Prüfungen der Fachliteratur sowie eigene Arbeiten bezogen sich auf die Struktur der MR-Flüssigkeiten, die Herstellungsverfahren, die experimentellen Methoden, die konstitutiven Modelle, die sog. strukturellen Modelle für Flüssigkeitsdämpfer sowie die Anwendungen der Flüssigkeiten. Behandelt wurden ebenfalls Ferroflüssigkeiten sowie magnetorheologische Elastomere. Auf dieser Grundlage wurde der Versuchsplan im Bereich der Verbundstoffe ausgeführt.

Ziel des umfangreichen Plans der grundlegenden Versuche war die Ermittlung der Dämpfung in den Verbundwerkstoffen. Zu diesem Zweck wurde ein originaler Verbundwerkstoffe mit wiederholbaren Eigenschaften hergestellt. Es wurde ein Messstand für die Untersuchungen unter den Bedingungen des zyklischen Schubs aufgebaut. Aufgestellt wurde ein System der Steuerung und Akquisition sowie der Umsetzung der Messsignale – sowohl der mechanischen wie auch der magnetischen Messsignale. Es wurden grundlegende Versuchsserien unter den Bedingungen der Spannungssteuerung durchgeführt. Ihr Ziel war, den Einfluss der mechanischen Kennwerte (Frequenz, Erzwingungsamplitude) sowie der magnetischen Kennwerte

¹⁾ engl.: MRC – *magnetorheological composites*

²⁾ engl.: MRF – *magnetorheological fluids*

³⁾ engl.: SMM – *SMART magnetic materials*

(Feldstärke) auf den Charakter und die Form der Dissipationsenergie ΔW als einer Größe, die die Dämpfungseigenschaften kennzeichnet, zu bestimmen.

Die aus der Fachliteratur bekannten Modelle für die MRF erwiesen sich als ungeeignet. Deshalb wurde ein eigenes Modell vorgeschlagen, wobei angenommen wurde, dass der Verbundstoff ein plastisch-viskoelastischer Körper ist, genauer ausgedrückt viskoelastisch bis zur Fließgrenze und viskoplastisch oberhalb dieser Grenze. Untersucht wurden die Möglichkeiten des rheologischen Modells, in dem vier Kennwerte von der Stärke des Magnetfeldes abhängig gemacht wurden. Folgend wurden Beziehungen für die zerstreute Energie abgeleitet, indem die Glieder, die entsprechend mit viskosen und mit plastischen Eigenschaften verbunden sind, ausgesondert wurden. Die numerischen Simulationen des Modells erlaubten, sein Verhalten im Grenzzustand vorauszusehen.

Weiterhin wurde das Identifizierungsverfahren der Kennwerte bestimmt und die eigentliche mehrstufige Identifizierung durchgeführt. Für die kriterielle Größe wurde die Energie der Hysteresisschleife DW angenommen. Die Identifizierung wurde im Frequenzbereich der künftigen Anwendungen des Verbundstoffen durchgeführt, d.h. für $5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$. Nachgewiesen wurde, dass in diesem Bereich sich das 4-Parameter-Modell vereinfachen lässt, denn der Einfluss des Gliedes, das die Viskosität enthält, ist zu vernachlässigen. Im Endergebnis wurde ermittelt, dass das 3-Parameter-Modell (viskoplastisch mit linearer kinematischer Verstärkung) effektiv bei der Steuerung der dämpfenden Eigenschaften des magnetorheologischen Verbundwerkstoffes verwendet werden kann.

Zusätzlich wurde die Identifizierung des vollständigen 4-Parameter-Modells im Frequenzintervall von $0,5 \leq f \leq 5 \text{ Hz}$ durchgeführt, in der der Einfluss der viskosen Effekte experimentell nachgewiesen wurde. Die erhaltenen Ergebnisse wurden als unzufriedenstellend erkannt und man formulierte Vorschläge für die Richtungen der weiteren Arbeiten. Die in der Dissertation erzielten Ergebnisse sind in Form von Schlussfolgerungen und -bemerkungen, die in sechs thematischen Blöcken geordnet sind, zusammengefasst. Zum Schluss werden Anregungen bezüglich der voraussichtlichen Forschungs- und Anwendungsgebiete im behandelten Bereich in den kommenden Jahren geäußert. Angedeutet wurden auch Richtungen der weiteren eigenen Aktivität des Forschungsteams.

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)	19
2.2	Real structures of carbonyl iron particles in magnetorheological fluid created under an influence of magnetic field. Magnification 2000x, light microscope [author's research, unpublished]	20
2.3	Bingham material model	23
2.4	Characteristics $\tau - \gamma$ of Bingham material model for two different shear rates $\dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$	23
2.5	Characteristics $\tau(\dot{\gamma})$ of Bingham material model extended by function $\tau_o(H)$ for magnetorheological fluid. Two graphs for different magnetic field strength values $H_2 > H_1$	24
2.6	Plots of experimentally obtained dependence of shear stress on shear rate, for magnetorheological fluid MRF-132LD, for successively increasing values of the current intensity (in coils generating magnetic field) [114]	24
2.7	The use of magnetorheological fluid in valve-mode	31
2.8	The use of magnetorheological fluid in shear-mode	31
2.9	The use of magnetorheological fluid in squeeze-mode	32
2.10	Scheme of the typical linear damper with MRF [71]. Detailed picture presents cross-section of the piston with magnetic field system: 1 – coil, 2 – magnetorheological fluid, 3 – seal between piston and cylinder, 4 – cylinder, 5 – annular orifice, 6 – piston, 7 – external wires connecting power supply with coil, 8 – piston rod	33
2.11	Damper MRD-9000 for vibrations damping in civil structures [69]: (a) – the scheme with marked out: 1 – accumulator, 2 – three stage piston, 3 – MRF, (b) – general view	35
2.12	The scheme of rotary brake with MRF: 1 – sealing, 2 – gap, 3 – coil, 4 – housing, 5 – disc, 6 – shaft	36
2.13	The scheme of magnetorheological finishing: 1 – lens, 2 – outer clamped system, 3 – MRF, 4 – magnetic pole, 5 – moving surface . . .	37
2.14	Adaptive prosthesis SMART MAGNETIX: 1 – angle and velocity sensors, 2 – force and torque sensors, 3 – MRF damper [12]	40
2.15	Structural Bingham model for magnetorheological damper (a) and example of characteristics in coordinates $F - \dot{x}$ (b)	41
2.16	Structural Bouc-Wen model for magnetorheological damper – (a) and example of characteristics in coordinates $F - \dot{x}$ – (b)	42
3.1	Typically behavior of ferrofluids in strong magnetic field. Visible „needles” are arranged in accordance with vector of magnetic field. Picture obtained from dr. A. Vogt (University of Wroclaw, Department of Chemistry)	45

3.2	Scheme of the magnetics sealing: 1 – ferrofluid, 2 – housing, 3 – permanent magnet, 4 – magnetic field flow, 5 – rotating shaft . . .	46
4.1	Variable friction damper (LORD Corp.): 1 – hosing, 2 – MRC, 3 – coil, 4 – piston rod, 5 – wires connecting coils to external power supply, 6 – grips	50
4.2	Structural model of variable friction dampers	50
4.3	The scheme of internal structure of composite material. Matrix created by set of connected internal cells. Cell walls – 1 are covered by surface of MRF – 2. Rest of volume filled with air – 3	52
5.1	The scheme of the test stand for linear dampers with MRF tests: 1 – RD-1005-3 damper, 2 – MTS 810, hydraulic pulsator with control unit – 3, 4 – data acquisition system, 5 – PC computer, 6 – software collecting and processing measurement data, 7 – Wonder Box device controller, 8 – additional external power supply	59
5.2	General view of the test stand for linear dampers with MRF testing: 1 – damper, 2 – MTS 810, hydraulic pulsator with control unit – 3, 4 – Wonder Box device controller, 5 – PC computer with acquisition data system	59
5.3	Example results of force F and displacement x in function of time for tested RD-1003-5 damper. Control voltage $U_S = 3\text{ V}$, excitation frequency $f = 2,5\text{ Hz}$	61
5.4	Selected hysteresis loops in coordinates $F - x$ and $F - v$ for control voltage $U_S = 3\text{ V}$, excitation amplitude $x_a = 9\text{ mm}$ and frequency $f = 2,5\text{ Hz}$	61
5.5	Hysteresis loops in coordinates $F - x$ and $F - v$ for incremental values of control voltage U_S , constant excitation amplitude $x_a = 9\text{ mm}$ and frequency $f = 2,5\text{ Hz}$	62
5.6	Hysteresis loop field ΔW as a function of control voltage U_S – (a) and maximum force $F_{\max}$ as a function of control voltage U_S – (b), for constant excitation amplitude $x_a = 9\text{ mm}$ and frequency $f = 2,5\text{ Hz}$	63
5.7	Comparison of experimental results, obtained for $U_S = 2\text{ V}$, $x_a = 9\text{ mm}$ and $f = 2,5\text{ Hz}$, with the Bingham model. Model parameters: $c_0 = 2400\text{ kg/s}$, $f_c = 945\text{ N}$ and $f_0 = -180\text{ N}$	64
5.8	Values of the coefficients for Bingham model in function of controlled voltage U_S	64
5.9	Comparison of experimental results, obtained for $U_S = 2\text{ V}$, $x_a = 9\text{ mm}$ and $f = 2,5\text{ Hz}$, with Bouc-Wen model. Model parameters: $\alpha = 10,6\text{ N/m}$, $c_0 = 2500\text{ Ns/m}$, $\kappa = 50\text{ m}^{-2}$. Others depicted in the table 5.2	65
5.10	Values of the coefficients for Bouc-Wen model in function of controlling voltage U_S	66
5.11	The comparison of experimental data with Bouc-Wen model. A, B and C point areas with significant differences	67
6.1	The preparation of magnetorheological composites procedure. First stage: creating magnetorheological fluid – D by composing carbonyl iron powder – A, carrier fluid – B and additives – C. Second stage: soaking matrix (porous material) – E with magnetorheological fluid	70
6.2	Internal structure of the matrix – porous material. Visible net structure	72
6.3	The scheme of the specimen for cyclic shear tests: 1 – magnetic core, 2 – magnetorheological composite material, 3 – carrier plate, H – direction of the magnetic field vector, F – external shearing force	74

6.4	The scheme of the magnetorheological specimen deformation: x , y , z – outer dimensions, γ – deformation angle and F – external force .	74
6.5	Main part of the test stand for magnetorheological composites shearing – magnetic circuit with specimen. The scheme – (a): 1 – magnetic core, 2 – magnetic flux Φ in a core gap, 3a and 3b – coils. General view – (b)	75
6.6	The scheme of a mechanical part of the test stand: 1 – displacement sensor, 2 – shaker, 3 – piezoelectric force sensor, 4 – connector, 5 – specimen, 6 – magnetic core, 7 – coils, 8 – magnetic field sensor .	76
6.7	The scheme of an electrical part of the test stand: 1 – signal from the force sensor, 2 – signal from the displacement sensor, 3 – signal from the magnetic field sensor, 4 – coils on magnetic core, 5 – signal to the shaker, 6 – instrumental amplifiers, 7 – operational power amplifiers, 8 – acquisition system, 9 – PC computer, 10 – software for collecting and processing data, 11 – load signal generator	77
6.8	Characteristic of the magnetic circuit. Magnetic field strength value measured in a core gap (component of vector H perpendicular to the specimen surface) as a function of current intensity I	78
6.9	General view of the test stand	79
6.10	Signals $\tau(t)$ and $\gamma(t)$ for two extreme values of magnetic field strength ($H = 0$ and $H = 110 \text{ kA/m}$)	80
6.11	Set of hysteresis loops in coordinates $\tau - \gamma$, obtained for increasing values of magnetic field strength, from 0 to 110 kA/m (with a step equal to 10 kA/m), constant strain amplitude $\gamma_a = 0,084$ and excitation frequency $f = 10 \text{ Hz}$	81
6.12	Hysteresis loops obtained for increasing values of magnetic field strength, from 0 to 110 kA/m (with a step equal to 10 kA/m), and three constant strain amplitudes at excitation frequency $f = 10 \text{ Hz}$.	82
6.13	Changes of hysteresis loops field ΔW in function of magnetic field strength at frequency excitations 5 Hz and three strain amplitudes .	82
6.14	Hysteresis loops in coordinates $\tau - \gamma$ obtained for different values of excitation frequency and constant value of magnetic field strength [44]	83
6.15	Changes of stress amplitude in a function of excitation frequency at constant magnetic field strength value $H = 60 \text{ kA/m}$ and $\gamma_2 = 0,084$.	84
6.16	Changes of stress amplitude τ_a in function of excitation frequency for the increasing magnetic field strength values, $\gamma_2 = 0,084$	84
6.17	Changes of the hysteresis loop field in function of excitation frequency for constant magnetic field strength value $H = 60 \text{ kA/m}$ i $\gamma_2 = 0,084$	85
6.18	Changes of the hysteresis loop field in function of excitation frequency for the increasing magnetic field strength values, $\gamma_2 = 0,084$	85
7.1	The elastic-viscoplastic material model	89
7.2	Stress-strain function for ideal elastic-plastic material model	89
7.3	The scheme of the exemplary hysteresis loop with indicated points used for calculations	90
7.4	Dependence of dissipation energy ΔW_1 on excitation frequency	92
7.5	The elastic-plastic material model with kinematic linear hardening – (a) and exemplary hysteresis loop with indicated characteristic points (b)	94
7.6	Selected hysteresis loop with indicated parts used for calculating parameters G_1 and τ_{o2}	95

7.7	Values of G_1 parameter depending on magnetic field strength calculated with a use of the elastic-plastic material model with linear hardening	97
7.8	Values of τ_{o2} parameter depending on magnetic field strength calculated with a use of the elastic-plastic with linear hardening material model	97
7.9	Values of G_2 parameter in function of magnetic field strength	98
7.10	Hysteresis loops obtained from approximation with the elastic-plastic with linear hardening material model for increasing values of magnetic field strength H in a range from 0 to 100 kA/m with a step equal to 10 kA/m , for constant strain amplitude $\gamma_a = 0,084$	99
7.11	Comparison of hysteresis loops obtained from the elastic-plastic with linear hardening material model and experimental data at constant strain amplitude $\gamma_a = 0,084$	100
7.12	Comparison of hysteresis loops obtained from the experiment and from the elastic-plastic with linear hardening material model for three values of strain amplitude, $f=15\ Hz$ [111]	101
7.13	The scheme of numerical model solving	103
7.14	Criterion q in a function of η	105
7.15	Comparison of hysteresis loops obtained from experiment and from the elastic-viscoplastic material model for constant value of magnetic field strength $H = 60\ kA/m$ and $\gamma_a = 0,084$	107
8.1	The scheme of the damper with magnetorheological composite: 1 – transformer core, 2 – coils, 3 – line of the magnetic flux, 4 – magnetorheological composite inside a gap core [56]	109
8.2	General view of the damper with magnetorheological composite: 1 – MRC, 2 – connecting rod, place of the connection between the damper and vibrating construction, 3 – coils, 4 – magnetic core, 5 – damper mounts, 6 – coils connections to external power supply	110
8.3	The test stand: 1 – vibrating object, beam on two bearings, 2 – tested damper with magnetorheological composite, 3 – acquisition and processing data system, spectrum analyzer HP35639A, 4 – adjustable power supply, 5 – force sensor, 6 – accelerometer	111
8.4	Free vibrations observed at the end of the beam ($L = 3\ m$) for two values of current strength 0 and 2 A	113
8.5	Suppression time t_w of the beam free vibrations in a function of control current strength I for individual points on the beam	113
8.5	Comparisons of the influence of the damper on beam damping modes	115

List of tables

2.1	Typical properties of magnetorheological fluids that are used to create mechanical devices such as dampers, clutches [76]	21
5.1	Main parameters of the RD-1005-3 damper. Data provided by manufacturer – LORD Corp. [71]	58
5.2	Values of Bouc-Wen model coefficients	66
6.1	Chemical constitution of carbonyl iron powder, type CC, used for magnetorheological fluid and composites manufacturing [3]	71
7.1	Results of parameters G_1 and τ_{o2} identification	96
7.2	Results of parameter G_2 identification	99
7.3	Values of parameters used for identification procedure	105
7.4	Comparison of hysteresis loop fields calculated from experimental data and from the model for calculated value of parameter $\eta = 124 \text{ kN s/m}^2$	106
8.1	Average decrease of the amplitude of free vibrations for individual resonant frequencies	114

Podziękowania

Na koniec chciałbym wyrazić swoją wdzięczność osobom, które wsparły mnie swoją wiedzą i umiejętnościami, bez których pomocy powstanie tej pracy nie było by możliwe. Chciałabym im podziękować i okazać moje uznanie dla ich wiedzy i zdolności. Dziękuję:

☛ Mojemu promotorowi, dr. hab. inż. Jerzemu Kalecie za pomoc i wszechstronne wsparcie w realizacji doktoratu, otwartość na problemy, dyskusje oraz cały czas poświęcony mej osobie.

☛ Prof. Wacławowi Kasprzakowi za pokazanie „innej drogi”, inspiracje i zainteresowanie tematyką nowych materiałów, za wsparcie, zawsze ważne i trudne pytania.

☛ Dr. Grażynie Ziętek za pomoc i rzeczowe uwagi na temat pracy, szczególnie od jej strony matematycznej.

☛ Dr. Wojciechowi Myszce za dociekliwe pytania, wskazówki i pomoc w okiełznaniu różnorodnych programów komputerowych.

☛ Panom Janowi Orłowskiemu, Karolowi Baranowskiemu, Marianowi Ćmiekiewiczowi za pomoc w rozwiązywaniu wszelkich problemów natury technicznej oraz aparaturowo-sprzętowej.

☛ Przemkowi Wiewiórskiemu za wsparcie, pomoc w eksperymentach i cały ten czas spędzony razem.

☛ Wszystkim koleżankom i kolegom doktorantom za atmosferę do pracy i nie tylko w labie ☺.

☛ Magdzie za wszystko co w mej duszy gra i daje natchnienie do pracy.

Część pracy wykonana została w ramach realizacji projektu badawczego nr 5 T07A 008 22 finansowanego ze środków Komitetu Badań Naukowych.