

Politechnika Poznańska

Wydział Maszyn Roboczych i Transportu

Rozprawa doktorska

mgr inż. Mateusz Kukla

Kształtowanie cech materiałowych elastomerów magnetoreologicznych w budowie maszyn

Promotor: dr hab. inż. Ireneusz Malujda, prof. nadzw.

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Talaśka

SPIS TERŚCI

Sp	ois ważniejszych oznaczeń	3
St	reszczenie	5
1.	1.1 Wprowadzenie	0 6
	1.2 Uzasadnjenje podjetej tematyki i cel pracy	
2	Materiały magnetoreologiczne	,
	2.1. Ciecze magnetoreologiczne	
	2.1.1. Zastosowania cieczy magnetoreologicznych	11
	2.1.2. Modele cieczy magnetoreologicznych	15
	2.2. Ciecze ferromagnetyczne	17
	2.2.1. Zastosowania cieczy ferromagnetycznych	18
	2.3. Żele magnetoreologiczne	19
	2.4. Kompozyty magnetoreologiczne	20
	2.5. Elastomery magnetoreologiczne	21
	2.5.1. Właściwości elastomerów magnetoreologicznych	23
	2.5.2. Badania elastomerów magnetoreologicznych	25
	2.5.3. Zastosowania elastomerów magnetoreologicznych	31
	2.5.4. Matematyczne modele elastomerów magnetoreologicznych	34
3.	Badania elastomerów magnetoreologicznych	42
	3.1. Badania wstępne	42
	3.1.1. Metodyka badań wstępnych	43
	3.2. Badania statyczne	49
	3.2.1. Metodyka badań statycznych	51
	3.3. Badania w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych	55
	3.3.1. Metodyka wstępnych badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych	55
	3.3.2. Metodyka badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych	59
4.	Modelowanie właściwości reologicznych elastomerów magnetoreologicznych	63
	4.1. Model Kelvina-Voigta	
	4.2. Metodyka identyfikacji współczynników modelu Kevina-Voigta	
	4.3. Weryfikacja modelu Kelvina-Voigta	
	4.4. Zmodyfikowany model Kelvina-Voigta	
	4.5. Metodyka identyfikacji współczynników zmodyfikowanego modelu Kelvina-Vo	bigta 85
	4.6. Identyfikacja współczynników zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta	
_	4.7. Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta	
5.	Przykład zastosowania badanego elastomeru magnetoreologicznego	92
	5.2 Matodyka badań objektu rzeczywistogo	
	5.2. Model do obliczeń numerycznych	
6	Podsumowanie i uwagi końcowe	
J. Li	teratura	

Spis ważniejszych oznaczeń

Α	_	początkowe pole przekroju
A_r	_	rzeczywiste pole przekroju
В	_	indukcja pola magnetycznego
Ε	_	moduł Younga
E_s	_	współczynnik sprężystości
E_{mod}	_	zmodyfikowany moduł sprężystości
E'	_	moduł zachowawczy
<i>E</i> "	-	moduł stratności
E^*	-	zastępczy moduł sprężystości
ΔE_r	-	względny efekt magnetoreologiczny
f	-	częstotliwość wymuszenia
G	-	moduł Kirchhoffa
Н	-	natężenie pola magnetycznego
Ι	-	natężenie prądu
k	-	stała Boltzmanna
lo	-	początkowa długość próbki
l_r	-	rzeczywista długość próbki
m	_	liczba cykli (obciążenia próbki)
Ν	-	liczba łańcuchów w próbce polimeru
$\begin{array}{c} p, p_1, p_2, p_{11}, \\ p_{12}, p_{21}, p_{22} \end{array}$	_	drugie współczynniki kształtu pętli histerezy
Т	—	temperatura
t	_	czas
t_n	_	dowolna chwila czasowa
t_r	_	czas retardacji
v_{stab}	_	prędkość stabilizacji
$q, q_1, q_2, q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$	_	pierwsze współczynniki kształtu pętli histerezy
W	-	energia sprężysta (praca odkształcenia)
W_e	-	potencjał wysokoelastyczny
γ	-	odkształcenie postaciowe
Ϋ́	-	szybkość ścinania (prędkość odkształcenia postaciowego)
ΔG	—	bezwzględny efekt magnetoreologiczny
ΔW	—	energia rozproszona (praca tłumienia)

$\Delta \varphi_{max}(B)$	_	zakres zmiany kąta stratności w funkcji indukcji pola magnetycznego
$\varDelta \varphi_{sr}(f)$	_	zakres zmiany kąta stratności w funkcji częstotliwości
$\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$	_	zakres zmiany kąta stratności w funkcji odkształcenia
$\Delta\sigma(t_n)$	_	błąd zmodyfikowanego modelu numerycznego w danej chwili czasowej
Е	_	odkształcenie liniowe
ε_0	_	amplituda odkształcenia
Ė	_	szybkość odkształcania (prędkość odkształcenia liniowego)
η	_	lepkość dynamiczna
λ	_	stopień deformacji
ν	_	liczba Poissona
σ	_	naprężenie normalne
σ_0	_	amplituda naprężenia
σ_{max}	_	wartość naprężeń maksymalnych
σ_{rr}	_	rzeczywiste naprężenia rozciągające
σ_r	_	umowne naprężenia rozciągające
$\sigma_{num}(t_n)$	_	wartość naprężenia wyznaczona z modelu numerycznego w danej chwili czasowej
$\sigma_{rz}(t_n)$	_	wartość naprężenia rzeczywistego (zmierzonego) w danej chwili czasowej
τ	_	naprężenie styczne
arphi	_	(mechaniczny) kąt stratności
ψ	_	tłumienie względne (współczynnik dyssypacji energii)
ω	_	częstość kołowa (pulsacja)

Streszczenie

Temat pracy wiąże się z analizą właściwości mechanicznych elementów konstrukcyjnych maszyn wykonanych z materiałów magnetoreologicznych. Prace badawcze mają charakter poznawczy i zorientowane są na określenie wpływu stałego pola magnetycznego na wybrane właściwości mechaniczne rozpatrywanych kompozytów. W trakcie realizacji prac, wyznaczono niezbędne stałe materiałowe, które wykorzystano do sformułowania modelu reologicznego charakteryzującego ich właściwości mechaniczne. Umożliwiło to wykonanie niezbędnych, z naukowego i inżynierskiego punktu widzenia, analiz i symulacji. Na tej podstawie podjęto etap konstrukcyjny przykładowych elementów wykonanych z elastomerów magnetoreologicznych. Sformułowano zadania badawcze, których opis ujęto w sześciu kolejnych rozdziałach niniejszej rozprawy.

Rozdział pierwszy obejmuje wstęp do pracy i jest poprzedzony spisem ważniejszych oznaczeń wykorzystywanych w dalszej części dysertacji.

Rozdziały drugi stanowi rozpoznanie stanu wiedzy materiałów magnetoreologicznych i ich zastosowania w budowie maszyn. Zwrócono uwagę na wyniki badań zamieszczonych w publikacjach obcojęzycznych i krajowych. Przedstawiono szczegółowo charakterystykę najczęściej stosowanych modeli materiałowych. Ponadto, omówiono przykładowe zastosowania elementów konstrukcyjnych wykonanych z elastomerów magnetoreologicznych.

W rozdziale trzecim przedstawiono wykonane przez autora, prace projektowo-badawcze. Omówiono zagadnienia związane z doborem najbardziej efektywnego składu kompozytów, ze względu na technologiczność kształtowania parametrów geometrycznych wykonywanych próbek. Szczegółowo omówiono opis zaprojektowanego i wykonanego stanowiska badawczopomiarowego. Przedstawiono metodykę badań, ich harmonogram oraz szerokie omówienie wyników.

Rozdział czwarty obejmuje zagadnienia związanie ze sformułowaniem modelu reologicznego badanych kompozytów. Szczegółowo przedstawiono wybrany model reologiczny. Zamieszczono także sposób wyznaczania parametrów materiałowych stanowiących strukturę jego budowy, wykorzystując algorytm autorskiego oprogramowania. Do dalszych obliczeń posłużono się oprogramowaniem numerycznym, w celach symulacyjnych.

W rozdziale piątym opisano praktyczne wykorzystanie badanego elastomeru magnetoreologicznego, oraz konstrukcję stanowiska badawczego. Zamieszczono również wyniki badań oraz ich zestawienie z wynikami otrzymanymi na drodze numerycznego modelowania. Szczególną uwagę poświęcono porównawczej analizie dokładności odwzorowania rzeczywistych charakterystyk kompozytu z opracowanym matematycznym modelem materiałowym.

Podsumowanie oraz wnioski zawarto w rozdziale szóstym, zwracając szczególną uwagę na charakter otrzymanych wyników badań i symulacji. Zaproponowano również dalsze kierunki badań cech materiałowych oraz zjawisk zachodzących w magnetoreologicznych elastomerach. Pracę zakończono spisem wykorzystanej literatury.

1. Sformułowanie tematyki badawczej

1.1. Wprowadzenie

Pod pojęciem "smart materials" (materiały adaptacyjne, inteligentne) rozumie się szeroką grupę materiałów, którą cechuje zmiana właściwości fizycznych (np. lepkości) pod wpływem działania innego pola fizycznego (np. pole magnetyczne) [83, 90, 95, 155]. Cechują się one zdolnością do: wykrycia bodźców, ich przetworzenia, odpowiedzi oraz powrotu do stanu pierwotnego, w jak najkrótszym czasie. Łączą w sobie właściwości sensora, procesora, aktuatora oraz cechy działania w sprzężeniu zwrotnym [4]. Zrozumiałym jest, iż nie wszystkie materiały mogą cechować się każdą z wymienionych właściwości. W związku z tym wprowadzono podział struktur smart, który przedstawia rysunek 1.1. Jak wynika z zamieszczonej klasyfikacji, struktury inteligentne są pewną tylko częścią struktur o możliwościach sensorycznych i adaptacyjnych.



Rys. 1.1 Klasyfikacja struktur smart; opracowano na podstawie [4]

Ze względów konstrukcyjnych, na szczególną uwagę zasługują takie materiały, których właściwości umożliwiają spełnienie praktycznych funkcji użytkowych. Klasyczne materiały inżynierskie, są wykorzystywane głównie w sposób pasywny. W wyniku różnych procesów technologicznych nadaje się im właściwości dzięki którym spełniają jedno, rzadziej kilka, niezmiennych zadań. O przewadze materiałów smart świadczy to, iż mogą one spełniać różne zadania w zależności od zmieniających się warunków zewnętrznych [51]. Podział materiałów smart jest trudny do przeprowadzenia. Wynika to ze względu na dużą różnorodność grup poszczególnych materiałów, oraz specyficzne właściwości każdej z nich. Najbardziej odpowiedni wydaje się podział ze względu na fizyczny charakter wymuszenia i odpowiedzi danego materiału. Jeden z możliwych do wprowadzenia podziałów przedstawia tabela 1.1, opracowana na podstawie [51, 146, 166]. Przedstawiony podział nie jest kompletny. Należy go uzupełnić o takie grupy materiałów, jak: materiały samonaprawiające się, polimery przewodzące, materiały samogrupujące się. Ze względu na charakter zachodzących zjawisk nie ma możliwości ujęcia ich w przedstawionym podziałe.

	Wymuszenie Świetlne Termiczne Mechaniczne Flektryczne Magnetyczne Chemiczne											
		Świetlne	Termiczne	Mechaniczne	Elektryczne	Magnetyczne	Chemiczne					
	Kolor	Fotochromowe	Termochro- mowe	Mechano- chromowe	Elektro- chormowe		Chemo- chromowe					
	Światło	Fotolumine- scencyjne	Termolumi- nescencyjne	Mechano- luminescen- cyjne	Elektro- lumine- scencyjne		Chemo- lumine- scencyjne					
	Temperatura					Magneto- kaloryczny						
viedź	Deformacja	Fotomecha- niczne	Stopy z pamięcią kształtu		Elektro- strykcyjne	Magneto- strykcyjnne, Magnetyczne stopy z pa- mięcią kształtu						
vodbC	Naprężenie				Piezoele- ktryczne							
	Sztywność, Lepkość		Termofor- mowalne		Elektro- reologiczne	Magneto- reologiczne						
	Pole elektryczne	Fotowol- taiczne, Polimery fotoprze- wodzące	Termoele- ktryczne, Piroele- ktyczne									
	Pole magnetyczne			Piezoele- ktryczne	Elektro- pernamen- tne							
	Opór elektryczny		Materiały typu PTC									

Tab. 1.1 Podział materiałów z grupy smart; na podstawie [51, 146, 166]

1.2. Uzasadnienie podjętej tematyki i cel pracy

Przedmiotem badań jest elastomer magnetoreologiczny należący do szerszej podgrupy materiałów smart aktywowanych przy użyciu pola magnetycznego (ang.: Smart Magnetic Materials – SMM). Jest to nowa, dynamicznie rozwijająca się grupa materiałów. Trwające w różnych ośrodkach prace badawcze dotyczą metod wytwarzania, składu oraz kształtowania struktury elastomerów magnetoreologicznych. Dużo uwagi poświęca się również ich praktycznym zastosowaniom. Znaczny wzrost patentów, dotyczących samego materiału jak również jego zastosowań, można odnotować po roku 2000 [83]. Efektywne wykorzystanie materiałów z tej grupy, w procesie projektowania, nie jest możliwe bez odpowiedniego modelu materiałowego. Powstało wiele prac podejmujacych tematyke matematycznego powiazania właściwości magnetycznych i mechanicznych elastomerów magnetoreologicznych. Pomimo tego, w dalszym ciągu brakuje dokładnego modelu opisującego zachowanie się elastomerów magnetoreologicznych pod wpływem pola magnetycznego. Na podstawie analizy stanu wiedzy można stwierdzić, że zdecydowana większość autorów skupia się na badaniach odbywających się w warunkach obciążenia ścinającego. Takie podejście jest uzasadnione, ponieważ skala zmian modułu odkształcalności postaciowej G jest w materiałach tego rodzaju większa niż zmiana modułu odkształcalności liniowej E. Z tego powodu, w literaturze przedmiotu, mniej uwagi poświęca się zagadnieniom związanym z obciążeniami ściskającymi i rozciągającymi. Obciążenia osiowe są rzadko wykorzystywane w grupie materiałów smart aktywowanych polem magnetycznym. W przypadku cieczy magnetoreologicznych, podczas ściskania. występuje duża trudność w jej utrzymaniu pomiędzy powierzchniami współpracujących elementów. Poddanie płynu działaniu naprężenia ściskającego powoduje wzrost ciśnienia, co

skutkuje nieuniknionymi przeciekami. Ze względu na nieściśliwość cieczy magnetoreologicznych, możliwość uzyskania dużych przemieszczeń liniowych jest ograniczona. Wymienione powody są przyczynami ograniczającymi wykorzystanie omawianych materiałów w konstrukcji układów tłumiących, które stanowią znaczny obszar ich aktualnych zastosowań. Wymienione cechy nie dotyczą elastomerów magnetoreologicznych. Są one ciałami stałymi, w związku z tym nie występuje problem z przeciekami. Duża elastyczność materiału matrycy pozwala osiągać znaczne, w porównaniu z wymiarami kompozytu, odkształcenia. Z drugiej strony jednak, powoduje to znaczne zmiany przekroju poprzecznego. Skutkuje to niekorzystnym rozkładem naprężeń wewnątrz odkształcanego elementu, zwłaszcza podczas rozciągania. Ponadto, maksymalna wartość naprężeń oraz ich rozkład, są zależne od przyjętego kształtu obciążanego elementu. Całościowe ujęcie szeregu zachodzących zjawisk mechanicznych dla obciążenia osiowego jest skomplikowane. Dodatkową trudność stwarza ich zależność od pola magnetycznego, będąca cechą charakterystyczną elastomerów magnetoreologicznych.

Uwzględniając powyższy stan wiedzy, przyjęto następujący **cel pracy**: kształtowanie cech materiałowych elastomerów magnetoreologicznych zorientowane na identyfikacje i analizę zmian ich właściwości mechanicznych wywołanych polem magnetycznym w warunkach obciążenia ściskającego. Sformułowano równocześnie tezę, iż właściwości mechaniczne elastomeru magnetoreologicznego w warunkach cyklicznie zmiennych obciążeń ściskających, można opisać używając modelu matematycznego. Spełnienie tak sformułowanego celu pracy wymaga wykonania następujących cząstkowych zadań badawczych, do których należy:

- opracowanie metodyki wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych,
- określenie: składu kompozytów, warunków procesu wytwarzania, parametrów kształtowania geometrii próbek,
- zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego,
- zbudowanie układu pomiarowego,
- opracowanie metody pomiaru wybranych właściwości mechanicznych w warunkach obciążenia statycznego,
- opracowanie metody pomiaru wybranych właściwości mechanicznych w warunkach obciążenia cyklicznego,
- wyznaczenie i ocena wpływu indukcji magnetycznej na wybrane właściwości mechaniczne badanego kompozytu,
- opracowanie modelu matematycznego,
- identyfikacja współczynników wybranego modelu matematycznego,
- zaprojektowanie i wykonanie rzeczywistego stanowiska badawczego przystosowanego do możliwości zastosowania badanych materiałów w budowie maszyn,
- weryfikacja opracowanego modelu na drodze badań z wykorzystaniem rzeczywistego stanowiska badawczego.

2. Materiały magnetoreologiczne

Podział materiałów magnetoreologicznych

Materiały magnetoreologiczne to grupa materiałów typu smart. Charakteryzują się one zmianą właściwości reologicznych, takich jak lepkość lub sztywność pod wpływem pola magnetycznego. Do tej grupy należą:

- ciecze magnetoreologiczne,
- ciecze ferromagnetyczne,
- żele magnetoreologiczne,
- kompozyty magnetoreologiczne (porowata matryca wypełniona cieczą magnetoreologiczną),
- elastomery magnetoreologiczne [95].

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono charakterystykę wymienionych materiałów.

2.1. Ciecze magnetoreologiczne

Wstęp

Historycznie pierwszymi materiałami magnetoreologicznymi są ciecze magnetoreologiczne (magnetorheological fluid – MRF). Zostały one wytworzone i wykorzystane po raz pierwszy przez Jacoba Rabionowa, ponad 50 lat temu [126]. Są to substancje płynne, których właściwości można zmieniać dzięki polu magnetycznemu. W stanie niewzbudzonym swoim zachowaniem przypominają ciecz Newtonowską. Po przyłożeniu pola magnetycznego następuje znaczny wzrost lepkości pozornej. Można również zaobserwować pewną graniczną wartość naprężeń. Poniżej tej wartości materiał cechuje się sprężystością. Opisana zmiana zachodzi w czasie do kilkunastu milisekund i jest całkowicie odwracalna.

Ciecz magnetoreologiczna jest roztworem koloidalnym. Składa się z trzech rodzajów składników: cieczy nośnej, cząstek ferromagnetycznych oraz dodatków. Ciecz nośna musi być materiałem niemagnetycznym i elektrycznie obojętnym. Dodatkowo powinna spełniać takie kryteria jak: stabilność temperaturowa, niska lepkość oraz nietoksyczność [113]. Materiały najczęściej stosowane jako ciecze nośne to: oleje silikonowe, syntetyczne, mineralne, woda, nafta, glikol [143]. Celem polepszenia właściwości smarnych oraz zapobiegania sedymentacji czy też modyfikacji lepkości stosuje się perfluoropolyether, ponyphenylether lub multialkilowany cyklopentan [143]. Stosowane najcześciej materiały magnetyczne to żelazo, ferryty, stopy żelaza z kobaltem. Najszersze praktyczne zastosowanie ma jednak żelazo karbonylkowe. Jest ono tanie i łatwodostępne, jednocześnie posiada relatywnie wysoką indukcję nasycenia (około 2,1 T). Typowa zawartość cząsteczek ferromagnetycznych mieści się w zakresie 20-50% objętości cieczy magnetoreologicznej. Ich średnica zawiera się w przedziale od 0,1 µm do około 2,5 µm. Nie stosuje się cząstek o większych wymiarach, ponieważ sprzyja to ich osadzaniu się pod wpływem grawitacji. Z drugiej strony wykorzystanie cząstek mniejszych niż 0,1 µm jest nieefektywne, z powodu trudności w ich wytwarzaniu. Celem poprawienia właściwości materiału wprowadza się do jego wnetrza specjalne dodatki. Cząsteczki ferromagnetyczne pokrywa się środkami powierzchniowo aktywnymi. Taki zabieg ma na celu pokonanie sił Van der Waalsa oraz siły przyciągania magnetycznego. Jest to niezbędne do długiej i prawidłowej pracy cieczy magnetoreologicznej, ponieważ zapobiega aglomeracji czastek.

Zasade działania cieczy magnetoreologicznych tłumaczy się powstawianiem kolumnowych struktur cząsteczek ferromagnetycznych pod wpływem pola magnetycznego (rysunek 2.1). Kierunek rozłożenia momentów magnetycznych poszczególnych cząstek w stanie niewzbudzonym jest losowy (rysunek 2.1 a). W związku z tym wypadkowy wektor magnetyczny równy jest zeru. Cząsteczki są przypadkowo rozmieszczone w cieczy nośnej (rysunek 2.1 b). W stanie wzbudzonym indukują się dipole, które ustawiają się równolegle do linii zewnętrznego pola magnetycznego (rysunek 2.1 d). Cząsteczki zaczynają się grupować, tworząc kolumnową strukturę (rysunek 2.1 c). Na tej podstawie można wytłumaczyć nieliniowe zachowanie się cieczy magnetoreologicznej. Rozerwanie struktury powstałej, w wyniku działania pola magnetycznego, wymaga przyłożenia pewnego naprężenia, którego wartość nazywana jest granicą płynięcia lub granicą plastyczności τ_0 [95]. Właściwości cieczy magnetoreologicznej poniżej tej wartości są zbliżone do ciała stałego. Powyżej granicy plastyczności materiał zaczyna płynąć. Wymaga to jednak ciągłej obecności sił wywołujących naprężenie τ_0 . Jest to spowodowane tym, że oddziaływania pomiędzy cząsteczkami ferromagnetyka zanikają dopiero po zaniku pola magnetycznego. Ciecze magnetoreologiczne charakteryzuje bardzo dobra dynamika, ponieważ czas zachodzących zmian wynosi zazwyczaj kilka milisekund.



Rys. 2.1 Wpływ pola magnetycznego na ciecz magnetoreologiczną; opracowano na podstawie [113, 143]

2.1.1. Zastosowania cieczy magnetoreologicznych

Ciecze magnetoreologiczne znalazły liczne zastosowania, dzięki swoim unikatowym właściwościom, w urządzeniach mechanicznych w trzech podstawowych układach pracy (rysunek 2.2).



Rys. 2.2 Układy pracy cieczy magnetoreologicznej; a) zaworowy układ pracy, b) sprzęgłowy układ pracy, c) ściskający układ pracy; opracowano na podstawie [95, 113]

W zaworowym układzie pracy ciecz magnetoreologiczna przepływa pomiędzy dwoma nieruchomymi powierzchniami. Wektor przyłożonego pola magnetycznego H skierowany jest prostopadle do kierunku przepływu cieczy. Ciśnienie p powoduje ruch medium roboczego. Natężenie przepływu Q jest zależne od natężenia pola magnetycznego, geometrii szczeliny, wartości ciśnienia oraz początkowej lepkości. Taki układ pracy wykorzystują najczęściej sprzęgła, tłumiki, hamulce oraz urządzenia pozycjonujące [113].

W sprzęgłowym układzie pracy, jedna z powierzchni pomiędzy którymi znajduje się ciecz magnetoreologiczna, porusza się z prędkością v. Działające na ten układ pole magnetyczne powoduje zmianę siły oporu. Przeciwdziała ona sile F powodującej ruch powierzchni. Siła przeciwdziałająca ruchowi jest zależna od natężenia pola magnetycznego, geometrii szczeliny, lepkości cieczy oraz prędkości przemieszczania się powierzchni. Sprzęgłowy układ pracy wykorzystywany jest do konstrukcji tłumików drgań, hamulców oraz sprzęgieł [95, 113].

Ściskający układ pracy zakłada możliwość oddalania się od siebie powierzchni pomiędzy którymi znajduje się ciecz magnetoreologiczna. W tym przypadku, wektory pola magnetycznego H, siły zewnętrznej F oraz prędkości, są równoległe względem siebie. Dla niewielkiej wartości odkształcenia, wywołanego siłą graniczną F o małej wartości, są one odwracalne. Jeżeli jednak przekroczy ona wartość granicy plastyczności ciecz zaczyna płynąć. Opis matematyczny tego układu pracy jest trudny, ze względu na działanie i nakładanie się na siebie wielu zjawisk fizycznych [95, 113].

Ciecze magnetoreologiczne znalazły szerokie zastosowanie w urządzeniach służących do tłumienia drgań. Ze względu na swoje właściwości nie generują one dodatkowych sił w układzie. Mają jednak możliwość wygenerowania biernej siły oporu, która jest proporcjonalna do działającego pola magnetycznego. Z tego powodu, elementy tłumiące wykorzystujące ciecz magnetoreologiczną, określa się mianem półaktywnych [95]. Schemat budowy liniowego tłumika z tłoczyskiem jednostronnym przedstawia rysunek 2.3.



Rys. 2.3 Schemat tłumika z cieczą magnetoreologiczną; 1 – cewka, 2 – ciecz magnetoreologiczna, 3 – uszczelnienie, 4 – cylinder, 5 – szczelina. 6 – tłok, 7 – przewody zasilające, 8 – tłoczysko; opracowano na podstawie [95, 48, 113]

W przedstawionym rozwiązaniu ciecz magnetoreologiczna 2 wypełnia komorę roboczą w cylindrze 4. Tłok 6 i tłoczysko 8 poruszając się ruchem liniowym powodują przepływ medium przez szczelinę o pierścieniowym kształcie 5. Cewka 1, zasilana prądem poprzez przewody 7 generuje pole magnetyczne. Siła oporu jaką generuje tłumik jest zależna od wymiarów geometrycznych szczeliny oraz od natężenia pola magnetycznego. W celu minimalizacji przecieków wewnętrznych stosuje się uszczelnienia 3. W rozwiązaniach tego typu konieczne jest zastosowanie akumulatora, którego zadaniem jest kompensacja rozszerzalności cieplnej wykorzystanego medium oraz zmiany objętości komór roboczych. Zmiana ta wynika z aktualnego położenia tłoka i tłoczyska [113]. Tłumiki z cieczami magnetoreologicznymi szeroko stosowane są w przemyśle motoryzacyjnym [95].

W celu uzyskania efektywnej konstrukcji oraz algorytmu sterowania wykorzystuje się bezpośrednie modele tłumików z cieczami magnetoreologicznymi. Takie podejście jest bardziej racjonalne niż formułowanie modelu urządzenia w oparciu o model konstytutywny. Najczęściej stosowany jest model Bouc-Wena, którego schemat i charakterystykę przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4 Model Bouc-Wena; a) schemat strukturalny, b) przykładowa charakterystyka

Siłę tłumiącą opisuje zależność:

$$F = c\dot{x} + k(x - x_0) + \alpha z + F_a,$$
 (2.1)

zmienna z, odpowiedzialna za powstawanie histerezy, wyznaczana jest z rozwiązania równania różniczkowego o postaci:

$$\dot{z} = -\gamma z |\dot{x}| |z|^s - \beta \dot{x} |z^s| + \delta \dot{x}, \qquad (2.2)$$

gdzie: c – współczynnik tłumienia, k – współczynnik sprężystości, x_0 – początkowe przemieszczenie, x – przemieszczenie, \dot{x} – prędkość, α – współczynnik siły tłumienia skojarzony ze zmienną z, F_a – siła pochodząca od akumulatora (dla tłumika F_a = 0), z – zmienna ewolucyjna, β , γ , δ – współczynniki kształtu histerezy, s – stopień wielomianu [4].

Stosowane są również inne modele tłumików wykorzystujących ciecze magnetoreologiczne. Różnią się one budową oraz liczbą stałych, co wpływa na dokładność odwzorowania rzeczywistego urządzenia. Na podstawie badań literaturowych można wymienić między innymi modele: pierwotny i zmodyfikowany Gamota-Filisco, Li, zmodyfikowany Bouc-Wena, Mesinga, BingMax, Poerlla oraz Sprencera [4, 95].

Siły tłumiące, które można wygenerować za pomocą tłumików magnetoreologicznych, tworzą duży przedział. Komercyjne rozwiązania firmy Lord Corporation oferują zakresy do 2 kN dla tłumika RD-1005-3, do 2,5 kN dla tłumika RD-8040-1 oraz do 200 kN dla tłumika MRD-9000. Ostatnie z wymienionych rozwiązań wykorzystywane jest w budownictwie cywilnym do tłumienia drgań spowodowanych oddziaływaniami sejsmicznymi i obciążeniem wiatrem [138].

Ze względu na swoje unikatowe właściwości ciecze magnetoreologiczne znalazły szerokie zastosowanie jako ciecz robocza w hamulcach i sprzęgłach magnetoreologicznych. Schematyczne przedstawienie hamulca wykorzystującego ciecz magnetoreologiczną przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5 Schemat hamulca magnetoreologicznego; 1 – wał hamulca, 2 – wirnik ferromagnetyczny, 3 – uszczelnienia, 4 – ciecz magnetoreologiczna, 5 – cewka, 6 – korpus; opracowano na podstawie [4, 95, 113, 142]

Korpus hamulca 6 wykonany jest z materiału ferromagnetycznego. Wewnątrz znajduje się wirnik 2 osadzony na wale 1. Przestrzeń robocza wypełniona cieczą magnetoreologiczną 4 jest zabezpieczona uszczelnieniami 3. Opór jaki generuje hamulec tego typu jest zależny od lepkości medium roboczego. Jest ona funkcją pola magnetycznego. Dzięki temu istnieje możliwość bezstopniowej zmiany momentu oporowego. Jego wartość jest niezerowa nawet przy braku zasilania. Wynika to z tarcia w łożyskach, uszczelnieniach oraz początkowej lepkości cieczy magnetoreologicznej [142]. Istnieje kilka koncepcji budowy hamulców magnetoreologicznych. Wśród nich można wyróżnić: hamulec tarczowy jednostronny

i dwustronny, hamulec walcowy, hamulec wielotarczowy [113, 142]. Generowanie pola magnetycznego w tego typu urządzeniach może wykorzystywać układy klasyczne (cewka elektromagnetyczna) lub hybrydowe. Układ hybrydowy składa się z cewki pełniącej rolę uzwojenia sterującego oraz magnesu trwałego [142].

Praca sprzęgieł i hamulców z zastosowaniem cieczy magnetoreologicznych jest oparta na podobnej zasadzie działania. Zasadniczą różnicą jest to, że w sprzęgłach, zmieniające się właściwości cieczy służą przekazaniu napędu. Pełni ona więc funkcję elementu sprzęgającego. W hamulcach natomiast wykorzystywana jest w celu generowania momentu oporowego. Schemat sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną pokazano na rysunku 2.6.



Rys. 2.6 Schemat sprzęgła magnetoreologicznego; 1 – wał wejściowy, 2 – korpus, 3 – tarczowe części wałków, 4 – cewka, 5 – uszczelnienie, 6 – ciecz magnetoreologiczna, 7 – wał wyjściowy; opracowano na podstawie [4, 95, 113, 142]

W korpusie 2 osadzony jest wał wejściowy 1 oraz wał wyjściowy 7. Ich sprzęgnięcie jest możliwe dzięki cieczy magnetoreologicznej 6 znajdującej się w przestrzeni roboczej pomiędzy tarczowymi częściami wałów wykonanymi z ferromagnetyka 3. Jest ona zabezpieczona przed przeciekami za pomocą uszczelnień 5. Zasilenie cewki 4 powoduje wygenerowanie pola magnetycznego oddziałującego na ciecz roboczą i tym samym załączenie sprzęgła. W budowie maszyn stosowane są również sprzęgła o konstrukcji takiej, że zarówno wirnik jak i korpus są elementami ruchomymi. Ponieważ cewka, będąca źródłem pola magnetycznego, znajduje się w takim układzie wewnątrz korpusu należy rozwiązać problem zasilania jej uzwojeń [142]. Różnice pomiędzy omawianymi urządzeniami dotyczą warunków ich pracy. Hamulce pracują najczęściej w sposób ciągły lub przerywany. Układy sprzęgieł natomiast obciążane są przez długi czas przy częstych włączeniach [4].

Opisane powyżej aplikacje cieczy magnetoreologicznych należą do najczęściej stosowanych. Jednak sterowalna zmiana lepkości i granicy plastyczności spowodowały, iż znalazły one wiele innych zastosowań. Wśród nich można wymienić:

- urządzenia polerujące (narzędzie o zmiennych właściwościach) [4, 113],
- pralki (tłumienie drgań bębna) [4, 113],
- protezy i stabilizatory stawów (tłumienie drgań, stabilizacja) [4],
- haptyczne systemy dotykowe (generowanie zmiennej siły oporu) [4, 113],
- amortyzatory w przemyśle motoryzacyjnym (tłumienie drgań foteli i zawieszenia) [4, 136]
- broń palna (tłumienie odrzutu) [4, 136],
- mosty i maszty linii wysokiego napięcia (tłumienie drgań i przemieszczeń) [4],
- serwozawory (zmiana charakterystyki silnika momentowego) [136].

2.1.2. Modele cieczy magnetoreologicznych

Do opisu zachowania się cieczy magnetoreologicznych stosuje się najczęściej model Binghama. Składa się on z połączenia ciała sprężystego, lepkoplastycznego oraz plastycznego i został przedstawiony na rysunku 2.7. Równania dla tego modelu definiuje się następująco:

$$\tau = G\gamma \qquad \qquad \text{dla } \tau < \tau_0, \qquad (2.3)$$

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_0 \qquad \qquad \text{dla } \tau \ge \tau_0, \qquad (2.4)$$

gdzie: G – moduł Kirchhoffa, τ – naprężenie styczne, η – lepkość, γ – odkształcenie, $\dot{\gamma}$ – prędkość odkształcenia, τ_0 – granica plastyczności.



Rys. 2.7 Schemat modelu reologicznego ciała Binghama

Zastosowanie omawianego modelu do opisu zachowania się cieczy magnetoreologicznych wymaga wprowadzenia zależności pomiędzy granicą plastyczności, a polem magnetycznym. Ogólną charakterystykę tak zmodyfikowanego modelu przedstawiono na rysunku 2.8.



Rys. 2.8 Charakterystyka modelu Binghama używanego do opisu MRF, gdzie τ_0 to granica plastyczności

Jeżeli naprężenie styczne działające na ciecz magnetoreologiczną jest mniejsze niż granica plastyczności τ_0 , a odkształcenia nie przekraczają wartości 10⁻³, to obowiązuje zależność przedstawiona za pomocą równania (2.3). Materiał zachowuje się jak ciało sprężyste. Po przekroczeniu wartości τ_0 poszczególne warstwy cieczy zaczynają się przemieszczać względem siebie i materiał zaczyna płynąć, zgodnie z równaniem (2.4). Dla coraz większych wartości natężenia pola magnetycznego $H_2 > H_1$ obserwuje się wzrost granicy plastyczności $\tau_{02}(H) > \tau_{01}(H)$. Zależność pomiędzy parametrami H oraz τ_0 jest liniowa, tylko w pewnym przedziale [95]. Maksymalne naprężenie jakie może przenieść ciecz magnetoreologiczna jest zależne od indukcji nasycenia zastosowanych cząstek ferromagnetycznych. Przykładowe charakterystyki dostępnych, w komercyjnej dystrybucji, cieczy magnetoreologicznych firmy Lord Corporation przedstawiono na rysunku 2.9.



Rys. 2.9 Przykładowe charakterystyki dostępnych komercyjnie MRF; a) naprężenie w funkcji prędkości odkształcenia, b) granica plastyczności w funkcji natężenia pola magnetycznego, c) indukcja magnetyczna w funkcji natężenia pola magnetycznego; opracowano na podstawie [165, 167, 168]

Przedstawiony model reologiczny jest często stosowany do projektowania urządzeń wykorzystujących unikalne właściwości cieczy magnetoreologicznych. Jego największą zaletą jest prostota interpretacji. Rzeczywiste charakterystyki cieczy magnetoreologicznych udowadniają, że nie są one płynami doskonale lepkimi. W związku z tym, w niektórych przypadkach, model Binghama nie jest poprawny.

Zależność $\tau = f(\dot{\gamma})$ przestaje być liniowa dla małych wartości prędkości odkształcenia. Celem uwzględnienia tego zjawiska stosuje się model Crossa, przedstawiony wzorem:

$$\tau = \left[\eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \lambda \dot{\gamma}}\right] \dot{\gamma}, \tag{2.5}$$

gdzie: η_0 – lepkość dla małych prędkości odkształcenia, η_{∞} – lepkość dla dużych prędkości odkształcenia, λ – stała związana z przejściem materiału ze stanu "stałego" w ciekły [78].

Odmiennym podejściem jest formułowanie modeli, o strukturze mikroskali. Stwarza to możliwość wpływu budowy wewnętrznej zachowanie analizy na się cieczy magnetoreologicznych. Znając charakterystyki poszczególnych składników tworzy się modele uwzględniające oddziaływania zachodzące pomiędzy nimi, które następnie rozwiązuje się wykorzystując symulacje komputerowe. W dostępnej literaturze przedmiotu, autorzy uwzględniaja np.: siły dipolowe, siły Browna oraz opór wiskotyczny. Przeprowadzane na tej podstawie obliczenia pozwalają na określenie wpływu: pola magnetycznego, wielkości i ilości cząstek ferromagnetycznych na wartość naprężeń tnacych [70, 156]. W ten sposób badano również zależność wiążącą odległości pomiędzy cząstkami i przenikalność magnetyczną kompozytu [133]. Analizie poddano także przebieg procesu tworzenia się kolumnowych struktur oraz wynikający z tego, czas reakcji cieczy magnetoreologicznej na pole magnetyczne [132].

Symulacje komputerowe wykorzystujące modele o strukturze mikroskali wymagają skomplikowanych obliczeń. Pojawia się więc potrzeba ich uproszczenia. Najczęściej zakłada się, że cząstki ferromagnetyczne są nieodkształcalnymi, idealnymi sferami [70, 156]. Symulacje wykonuje się zwykle dla pewnej skończonej liczby cząstek obejmujących np.: jeden lub kilka łańcuchów. Jest to konieczne uproszczenie, ponieważ w jednym milimetrze sześciennym cieczy magnetoreologicznej, zawierającej 80% objętości cząstek o średnicy 5 μ m, może się ich znajdować do 12·10⁶ sztuk [95]. Istotnym zagadnieniem, w tego typu obliczeniach, jest dobór odpowiednych warunków początkowych, ponieważ mogą one mieć znaczący wpływ na otrzymywane wyniki [95].

2.2. Ciecze ferromagnetyczne

Wstęp

Ciecze ferromagnetyczne (ferrofluids – FF) to grupa materiałów będących koloidalną zawiesiną cząstek magnetycznych w niemagnetycznej cieczy nośnej. Swoją budową i właściwościami są bardzo podobne do cieczy magnetoreologicznych, występują jednak pomiędzy nimi znaczące różnice. Wymiary cząstek wykorzystywanych przy wytwarzaniu cieczy ferromagnetycznych mieszczą się w przedziale od 3 nm do 15 nm. Stosowanie mniejszych cząsteczek nie jest możliwe, ponieważ dalsze zmniejszenie ich średnicy skutkuje utratą właściwości magnetycznych. Materiały stosowane najczęściej jako cząstki ferromagnetyczne to: tlenek żelaza Fe₃O₄ [113], ale również magnetyt, tlenki kobaltu oraz inne tlenki materiałów ferromagnetycznych [95]. Jako ciecz nośną stosuje się: olej mineralny, estry, glicerynę, polifenyl i wodę [95, 113]. Typowa ciecz ferromagnetyczna składa się w 85% z cieczy nośnej. Znajduje się w niej 5% cząsteczek magnetycznych pokrytych powłoką ochronną, która stanowi 10% całego roztworu [113]. Maksymalne nasycenie magnetyczne cieczy ferromagnetycznych mieści się w przedziale od 0,005 T do 0,13 T. Jest ono kilkukrotnie mniejsze niż dla cieczy magnetoreologicznych.

Występuje kilka zasadniczych różnic pomiędzy cieczami ferromagnetycznymi i magnetoreologicznymi. W cieczach ferromagnetycznych nie obserwuje się wyraźnej granicy plastyczności [95]. Dodatkowo, praktycznie nie występuje zjawisko sedymentacji. Bardzo małe rozmiary cząstek ferromagnetycznych skutkują ciągłym mieszaniem się cieczy. Proces ten zachodzi dzięki fluktuacjom termicznym oraz ruchom Browna [95, 113].

2.2.1. Zastosowania cieczy ferromagnetycznych

Ze względu na małe wymiary cząstek, ciecze ferromagnetyczne znalazły wiele zastosowań w uszczelnianiu różnego rodzaju urządzeń. Schematyczne przedstawienie takiego uszczelnienia przedstawiono na rysunku 2.10.



Rys. 2.10 Rodzaje uszczelnień ferromagnetycznych; a) uszczelnienie wału z materiału magnetycznego,
b) uszczelnienie wału niemagnetycznego; 1 – wał, 2 – ciecz ferromagnetyczna, 3 – nabiegunnik, 4 – przebieg linii pola magnetycznego, 5 – magnes trwały, opracowano na podstawie [4, 113]

Wewnątrz korpusu maszyny znajduje się pierścieniowy układ nabiegunników 3, skojarzonych z magnesem trwałym 5. Pomiędzy nabiegunnikami i wałem 1 znajduje się pewna objętość cieczy ferromagnetycznej 2. Magnes generuje pole magnetyczne, którego linie 4, zamykają się przez ciecz roboczą i wał (2.10 a), lub poprzez ciecz roboczą i nabiegunniki (2.10 b). Dzięki siłom pochodzącym od pola magnetycznego ciecz ferromagnetyczna utrzymywana jest przez cały czas w tej samej pozycji. Do zalet uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną można zaliczyć: bardzo dobrą szczelność, małe opory tarcia, trwałość i niezawodność działania, małe straty mocy, brak grzania się uszczelnienia, małe wymagania dotyczące chropowatości powierzchni uszczelnienia [113]. Rozwiązania wykorzystujące ciecze ferromagnetyczne są z powodzeniem stosowane również w uszczelnień gazowych do ciśnienia 3,5 MPa, wdrożeń stosowanych w technice próżniowej, urządzeń pracujących z dużą prędkością obrotową, zespołów pamięci dyskowej w komputerach [113, 142].

Ciecze ferromagnetyczne stosuje się również w silnikach skokowych celem poprawy ich charakterystyk. Reakcja silnika krokowego na sygnał wymuszenia ma charakter oscylacyjny. Takie zachowanie wynika z jego zasady działania. Wirnik po wykonaniu zadanej liczby skoków wpada w drgania. Ich amplituda i czas trwania są zależne od momentu bezwładności napędzanego układu oraz tarcia. Jeżeli częstotliwość sygnału wymuszającego będzie zbliżona do częstości drgań własnych silnika może wystąpić zjawisko rezonansu. Skutkiem tego może być gubienie kroków lub całkowite zatrzymanie silnika skokowego. Wymienione wady można ograniczyć lub wyeliminować stosując ciecz ferromagnetyczną. Schemat takiego rozwiązania przedstawia rysunek 2.11. Ciecz ferromagnetyczna 2 jest wprowadzona w szczelinę pomiędzy wirnikiem 1 i stojanem 3 silnika skokowego. Utrzymana jest ona w miejscu pracy przez pole magnetyczne które jest generowane podczas pracy silnika. Zaletą takiego rozwiązania jest zwiększenie dokładności pozycjonowania silnika. Skróceniu ulega również czas potrzebny na ustalenie się położenia wirnika. Przedstawione rozwiązanie zwiększa trwałość silników, przy jednoczesnym obniżeniu głośności ich pracy [113].



Rys. 2.11 Schemat zastosowania cieczy ferromagnetycznej we wnętrzu silnika skokowego; 1 – wirnik, 2 – ciecz ferromagnetyczna, 3 – stojan; opracowano na podstawie [113]

Opisana metoda ma również pewne wady. W związku z lepkością cieczy ferromagnetycznej, jej wprowadzenie w szczelinę pomiędzy rotorem i stojanem jest powodem powstawania strat energetycznych. Ciecz przeciwstawia się obrotom wirnika. Z tego względu zwiększa się moment oporowy niezasilonego układu. Ograniczeniu ulega również moment wyjściowy silnika skokowego. Wpływ wymienionych wad można ograniczyć poprzez odpowiednie dobranie parametrów stosowanej cieczy [113]. Standardowe silniki skokowe są obecnie około 50% tańsze niż wersje w których zastosowano ciecz ferromagnetyczną [113].

Wśród innych zastosowań cieczy ferromagnetycznych można wymienić między innymi:

- zawory sterowane elektrycznie (nieposiadające elementów ruchomych) [4, 113],
- przekładnie zębate i łożyska (precyzyjne smarowanie) [4],
- głośniki (tłumienie drgań membrany) [4, 113],
- napędy CD i DVD (tłumienie drgań głowicy) [4, 113],
- metody zwalczania nowotworów (blokowanie dopływu krwi do chorych komórek) [4, 113].

2.3. Żele magnetoreologiczne

Kolejną grupę materiałów aktywowanych polem magnetycznym stanowią żele magnetoreologiczne (magnetorheological gels – MRG). Reprezentują one stan przejściowy pomiędzy cieczami i elastomerami magnetoreologicznymi [150]. Impulsem do opracowania omawianych kompozytów była chęć wyeliminowania podstawowych wad cieczy magnetoreologicznych, to jest sedymentacji cząstek oraz przecieków. Żel magnetoreologiczny powstaje dzięki połączeniu cząsteczek magnetycznych oraz polimerów o różnym stopniu usieciowania. Do takiego kompozytu wprowadza się rożne dodatki celem zmiany lepkości. Jest to bardzo korzystne, ponieważ daje możliwość efektywnej zmiany właściwości względem konkretnego zastosowania. Jako materiał matrycy wykorzystuje się najczęściej żele silikonowe [58, 151], poliuretanowe [58, 131, 150] oraz poliamidowe [58]. Stosowane materiały magnetyczne to: czyste żelazo [58] oraz żelazo karbonylkowe [2, 58, 151]. W nieobecności pola magnetycznego zachowanie MRG jest zbliżone do płynu Newtonowskiego. Po przyłożeniu pola magnetycznego obserwuje się słabe właściwości lepkosprężyste. Obecnie trwają prace nad zastosowaniem żeli magnetoreologicznych w urządzeniach tłumiących [150], absorberach uderzeń, sprzęgłach oraz elementach osadczych silników [58].

Omawiane materiały są również przedmiotem zgłoszeń patentowych. Patenty obejmują najczęściej skład, oraz technologię wytwarzania w zależności od ich oczekiwanych właściwości i cech użytkowych [57, 129, 162, 163].

2.4. Kompozyty magnetoreologiczne

Kompozyty magnetoreologiczne (magnetorheological composites – MRC) to grupa materiałów powstałych w wyniku połączenia cieczy magnetoreologicznych z porowatą matrycą. Schemat struktury takiego materiały przedstawiono na rysunku 2.12.



Rys. 2.12 Schematyczne przedstawianie struktury kompozytu magnetoreologicznego; 1 – ścianki matrycy, 2 – ciecz magnetoreologiczna, 3 – powietrze

Porowata matryca 1 wypełniona jest w pewnym stopniu cieczą magnetoreologiczną 2. Pozostałą objętość kompozytu wypełnia powietrze 3. Dzięki temu, zastosowana ciecz ma możliwość swobodnego przemieszczania się. Jako materiał matrycy stosuje się elastyczne materiały o strukturze porowatej. Mogą to być tkaniny, filc lub gąbki [83, 155]. Dzięki zastosowaniu matrycy istnieje możliwość kształtowania wymiarów zewnętrznych wytwarzanego materiału. Pozwala to uniknąć typowych wad cieczy magnetoreologicznych czyli sedymentacji cząstek oraz konieczności stosowania uszczelnień. Istotnym ograniczeniem aplikacyjności kompozytów magnetoreologicznych jest mechaniczna wytrzymałość materiału matrycy.

W literaturze przedmiotu można znaleźć opracowania dotyczące badań nad kompozytami magnetoreologicznymi. W pracach [83, 95] przedstawiono dane eksperymentalne otrzymane w warunkach czystego ścinania dla różnych parametrów pola magnetycznego. Wyznaczone przez autorów pętle histerezy w układzie naprężenie-odkształcenie przedstawiono na rysunku 2.13.



Rys. 2.13 Pętle histerezy uzyskane dla narastających wartości pola magnetycznego i trzech różnych wartości amplitud odkształcenia dla częstotliwości wymuszenia f = 10 Hz [95]

Wykazano, że wraz ze wzrostem częstotliwości odkształcenia i natężenia pola magnetycznego rośnie pole pętli histerezy, a więc zdolność do rozpraszania energii. Przyrost wielkości pól pętli histerezy zachodził liniowo wraz ze wzrostem wartości odkształcenia [83, 95].

W pracy [83] przedstawiono również wyniki badań kompozytów magnetoreologicznych w warunkach obciążeń udarowych. Przy wykorzystaniu specjalistycznego stanowiska próbkę kompozytu stymulowaną polem magnetycznym, uderzano za pomocą bijaka. Mierzono przy tym prędkości wejściowe i wyjściowe elementu uderzającego odpowiednio na wejściu i wyjściu z kompozytu. Maksymalny zarejestrowany spadek prędkości wynosił około 15% prędkości początkowej [83]. Dzięki przeprowadzonym badaniom wykazano możliwości kompozytów magnetoreologicznych do pochłaniania energii mechanicznej.

Przykładowym urządzeniem wykorzystującym właściwości kompozytów magnetoreologicznych jest tłumik drgań liniowych RD-1097-01 firmy Lord Corporation. Schemat tego urządzenia przedstawiono na rysunku 2.14.



Rys. 2.14 Tłumik drgań o zmiennym tarciu firmy LORD; 1 – obudowa, 2 – kompozyt magnetoreologiczny, 3 – tłok, 4 – cewki, 5 – tłoczysko, 6 – przewody zasilające, opracowano na podstawie [28, 107, 127]

Wewnątrz obudowy 1 znajduje się tłok 3, w którym umieszczone są cewki 4 generujące pole magnetyczne. Przewody zasilające 6 umiejscowione są w osi tłoczyska 5. Kompozyt magnetoreologiczny 2 zamocowany jest nieruchomo do tłoka i znajduje się pomiędzy nim a obudową. Zmiana natężenia pola magnetycznego powoduje zmianę siły tarcia generowanej pomiędzy kompozytem i obudową. Dzięki temu istnieje możliwość płynnej regulacji siły tarcia oraz, co za tym idzie, tłumienia całego układu [28, 107, 127].

Materiały z omawianej grupy stosuje się również w hamulcach, oraz w pochłaniaczach energii mechanicznej [95, 155].

2.5. Elastomery magnetoreologiczne

Wstęp

Elastomery magnetoreologiczne (ang. magnetorheological elastomers – MRE) to grupa materiałów kompozytowych, których właściwości mechaniczne ulegają zmianie pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego. Zmiana ta zachodzi w czasie wynoszącym do kilkunastu milisekund i jest w pełni odwracalna. Łączą one w sobie właściwości materiałów o różnych cechach, na przykład – elastyczne tworzywa sztuczne oraz metale o bardzo dobrych właściwościach magnetycznych.

Elastomer magnetoreologiczny jest kompozytem. Składa się z dwóch lub więcej składników: matrycy, cząstek ferromagnetycznych oraz dodatków. Podział elastomerów magnetoreologicznych przedstawiono w tabeli 2.1.

Tab. 2.1 Podział elastomerów magnetoreologicznych [6]

Rodzaje	magnetycznie miękkie (ferroelasty)	osnowa lita	osnowa izolacyjna	izotropowe
elastomerów	magnetycznie twarde (magnatoelasty)	osnowa porowata	osnowa przewodząca	anizotropowe
Kryteria klasyfikacji	Właściwości magnetyczne cząstek	Struktura osnowy	Właściwości elektryczne osnowy	Przestrzenny rozkład cząstek

Jako materiał osnowy stosuje się materiały elastyczne, najczęściej tworzywa sztuczne podatne na sprężyste odkształcenia. Są to na przykład: kauczuk silikonowy [104, 117, 119] lub butylowy, guma naturalna [60], poliuretan [14, 19]. Jako cząsteczki magnetyczne stosuje się: chemicznie czyste żelazo [111], stopy żelaza z kobaltem lub niklem, stop alnico [21, 95, 155]. Najczęściej stosowanym materiałem jest żelazo karbonylkowe [73, 135]. Cechuje się ono stosunkowo dużą indukcją nasycenia, jednocześnie jest tanie. Kształt stosowanych cząstek jest najczęściej sferyczny. Analizując literaturę przedmiotu można odnaleźć również zastosowania ferromagnetyków innej postaci, jak na przykład: o nieregularnym kształcie [64], czy też nanodrutów [137]. Wymiary wykorzystywanych najczęściej cząstek mieszczą się w przedziale od 10 µm do 0,5 mm.

Uzyskanie porowatej struktury kompozytu, może być osiągnięte dwoma sposobami. Do niespolimeryzowanego materiału matrycy dodaje się substancje poroforowe. W wyniku ich rozpadu powstają gazy, które po rozprężeniu tworzą pory. Kolejny sposób polega na dodaniu do nieusieciowanej mieszaniny cząstek soli. Usuwa się je ze spolimeryzowanego kompozytu w wyniku ugniatania w strumieniu wody [6]. Współczynniki porowatości elastomerów magnetoreologicznych zazwyczaj są mniejsze niż 0,3-0,4 przy wielkości porów z przedziału od 0,6 mm do 0,8 mm [6]. Wraz ze zwiększaniem się udziału porów w matrycy zmniejsza się jego sztywność. Pogorszeniu ulegają właściwości mechaniczne.

Celem uzyskania kompozytu przewodzącego prąd elektryczny do materiału osnowy wprowadza się różne dodatki. Stosowane domieszki to między innymi grafit lub srebro w formie pyłu [6].

Właściwości elastomerów magnetoreologicznych są zależne od ich struktury wewnętrznej. Kompozyty anizotropowe otrzymuje się wystawiając mieszaninę polimeryzującej osnowy i cząstek ferromagnetycznych na działanie pola magnetycznego. Cząsteczki ustawiają się zgodnie z rozkładem pola magnetycznego tworząc kolumnowe struktury [1, 112]. Tracą one możliwość przemieszczania się wraz z utwardzaniem się matrycy. Kompozyty izotropowe otrzymuje się w nieobecności pola magnetycznego. Równomierne rozmieszczenie cząstek ferromagnetycznych osiąga się najczęściej poprzez mechaniczne mieszanie nieusieciowej mieszaniny składników. Przykłady rzeczywistych struktur przedstawia rysunek 2.15. Schematyczną postać, możliwych do otrzymania struktur elastomerów magnetoreologicznych, przedstawia rysunek 2.16.



Rys. 2.15 Zdjęcia SEM mikrostruktury elastomeru magnetoreologicznego; a) materiał izotropowy o zawartości żelaza 30% vol – powiększenie 2000×, b) materiał anizotropowy o zawartości żelaza 30% vol – powiększenie 1100× [85]



Rys. 2.16 Przykładowe struktury MRE; a) izotropowa z litą osnową, b) izotropowa z porowatą osnową, c) anizotropowa z litą osnową, d) izotropowa z porowatą osnową przewodzącą (domieszkowaną); 1 – materiał matrycy, 2 – cząsteczki ferromagnetyczne, 3 – pory, 4 – cząsteczki zwiększające przewodnictwo elektryczne

2.5.1. Właściwości elastomerów magnetoreologicznych

Zasada działania anizotropowych elastomerów magnetoreologicznych jest zbliżona do zasady działania cieczy magnetoreologicznych. Podczas sieciowania osnowy kompozytu, w wyniku działania pola magnetycznego zachodzą dwa zjawiska. Cząsteczki ferromagnetyczne zawarte w osnowie zaczynają wzajemnie oddziaływać na siebie. W wyniku namagnesowania wykazują one tendencję do grupowania się w kolumny zgodne z kierunkiem działania przyłożonego pola magnetycznego. Ponadto, cząsteczki ferromagnetyczne dążą do tego, by ich kierunki łatwego namagnesowania były odpowiednio zorientowane w przestrzeni, to jest równolegle do linii działającego pola. Ich ułożenie jest wynikiem dażenia układu do osiągnięcia stanu minimum energetycznego. Późniejsze odkształcenie takiego materiału wymaga większej energii, czyli wykonania dodatkowej pracy, niż miałoby to miejsce przy odkształcaniu elastomeru magnetoreologicznego niepoddanego działaniu pola magnetycznego. Energia ta jest wykorzystana na przemieszczenie cząsteczek ferromagnetycznych z położeń o minimalnej energii. Ilość niezbędnej do dostarczenia pracy, zależna jest od natężenia działającego pola magnetycznego [6, 28]. Materiał taki cechuje się więc wzrostem efektywnego modułu Younga i modułu Kirchhoffa. Zasada działania izotropowych elastomerów magnetoreologicznych opiera się na tych samych zjawiskach fizycznych. Przypadkowo i równomiernie rozmieszczone w elastycznej matrycy cząsteczki wystawione są na działanie pola magnetycznego. W efekcie dążą do ustawienia się wzdłuż linii wektora pola magnetycznego. Jest to powodem deformacji materiału matrycy, co skutkuje zmianą modułu Kirchhoffa [144].

Elastomery magnetoreologiczne cechują się wieloma interesującymi pod względem naukowym właściwościami. Są one w znacznym stopniu zależne od składu i metod wytwarzania kompozytu. Jedną z ważniejszych i często omawianych cech, jest efekt magnetoreologiczny. Opisuje on zmianę właściwości rozważanych materiałów pod wpływem pola magnetycznego. Wyróżnić można bezwzględny efekt magnetoreologiczny. Jest on różnicą modułów zmierzonych w warunkach: nieobecności i maksymalnego natężenia pola magnetycznego (2.6). Pod pojęciem względnego efektu magnetoreologicznego rozumie się stosunek absolutnego efektu magnetoreologicznego i modułu zmierzonego w nieobecności pola magnetycznego (2.7). Wykorzystując moduł Kirchhoffa, oba wymienione efekty można przedstawić za pomocą wzorów:

$$\Delta G = G_{max} - G_0, \tag{2.6}$$

$$\Delta G_r = \frac{\Delta G}{G_0} \cdot 100\%, \tag{2.7}$$

gdzie: ΔG – bezwzględny efekt magnetoreologiczny, G_{max} – wartość modułu zmierzona przy maksymalnych parametrach pola magnetycznego, G_0 – wartość modułu zmierzona przy nieobecności pola magnetycznego, ΔG_r – względny efekt magnetoreologiczny.

Względny efekt magnetoreologiczny wynosi średnio 30-40% [5], jego maksymalne wartości mogą dochodzić nawet do 60% [160]. Efekt magnetoreologiczny jest zależny od wielkości cząstek ferromagnetycznych, ich rozmieszczenia oraz udziału w kompozycie [14]. Na jego wartość ma również wpływ amplituda i częstotliwość przyłożonego naprężenia.

Kolejnym, zachodzącym w elastomerach magnetoreologicznych zjawiskiem, jest magnetostrykcja. To zjawisko cechuje materiały, których osnowa przewodzi prąd elektryczny. Cząsteczki zawarte w kompozycie dążą do zajęcia określonych miejsc w przestrzeni w wyniku oddziaływania pola magnetycznego. Jeżeli materiał matrycy będzie charakteryzował się dostatecznie małą sztywnością, a adhezja pomiędzy powierzchniami cząsteczek i matrycą będzie dostatecznie duża, to może dojść do odkształcenia kompozytu [15, 64]. Odnotowane wartości współczynnika magnetostrykcji wynoszą nawet 10⁻² [9]. Zjawisko to cechuje występowanie histerezy. To znaczy, że zmiana wymiarów badanych próbek pod wpływem wzrastającego pola magnetycznego, ma inny przebieg niż ich powrót do wyjściowego kształtu wraz z malejącym polem magnetycznym. Tłumaczy się to zaburzeniami słabszych połączeń natury mechanicznej pomiędzy matrycą i cząstkami ferromagnetycznymi. Wiązania te powstają na skutek adhezji powierzchni cząstek do materiału matrycy w czasie wytwarzania kompozytu [9]. Materiały magnetostrykcyjne cechuje również zjawisko odwrotnej magnetostrykcji zwanej efektem Villariego. Polega ono na przemianie energii mechanicznej w magnetyczną. Przyłożenie obciążenia, np. w postaci siły, skutkuje zmiana magnetyzacji wokół materiału. Zjawisko to zachodzi w wyniku nagłej reorientacji domen magnetycznych pod wpływem sprężystego odkształcenia [83]. Na szczególna uwagę zasługują tutaj kompozyty wykorzystujące materiały o gigantycznej magnetostrykcji. Podczas ich wytwarzania zastępuje się żelazo stopami należącymi do grupy terfenoli (Tb_xDy_{1-x}Fe_y) [83]. Materiały z tej grupy, dzięki swoim unikatowym właściwościom mogą być stosowane w konstrukcji czujników, przetworników oraz generatorów drgań [6].

W literaturze przedmiotu można również odnaleźć wyniki badań innych zjawisk fizycznych jakie zachodzą w elastomerach magnetoreologicznych. Można wśród nich wyróżnić: efekt piezoindukcyjny [6, 7] oraz efekt magnetokaloryczny [83].

Elastomery magnetoreologiczne są często określanie jako odpowiedniki cieczy magnetoreologicznych w stanie stałym [22, 110]. Jednak pomiędzy tymi dwoma grupami materiałów występują pewne różnice. Najważniejszą z nich jest to, że w przypadku

kompozytów elastomerowych, cząsteczki magnetyczne mają ograniczone możliwości przemieszczania się w osnowie. Zmiana położenia cząsteczki, jest możliwa jedynie poprzez elastyczne odkształcenie, w tym przypadku – litego, materiału osnowy. Z uwagi na różnice strukturalne, elastomery magnetoreologiczne pracują w innym niż ciecze zakresie naprężeń, to jest poniżej granicy plastyczności [34]. To sprawia, że obydwa typy materiałów nie są kompetytywne, stanowią raczej swoje uzupełnienie. Schematyczne przedstawienie obszaru pracy MRE i MRF zamieszczono na rysunku 2.17. Elastomery magnetoreologiczne mają pewne zalety względem cieczy magnetoreologicznych. W związku z zastosowaniem litego materiału matrycy cząsteczki ferromagnetyczne nie mają możliwości sedymentacji [20, 42, 114, 145, 146]. Podczas projektowania urządzeń wykorzystujących ten rodzaj materiałów smart nie ma konieczności stosowania uszczelnień oraz zbiorników kompensujących. Dodatkowo istnieje możliwość nadawania określonej geometrii wytwarzanemu elementowi. Może się to odbywać poprzez np. wycięcie żądanego kształtu z większej próbki, lub na drodze odpowiedniego ukształtowania formy, w której polimeryzuje osnowa kompozytu.



Rys. 2.17 Porównanie zakresów pracy cieczy i elastomerów magnetoreologicznych

2.5.2. Badania elastomerów magnetoreologicznych

Szczegółowe porównanie wyników badań różnych zespołów naukowych nie jest w pełni możliwe. Wynika to z kilku przyczyn. Pierwsza z nich to różnorodność stosowanych do wytworzenia elastomerów magnetoreologicznych materiałów oraz sposobów ich łączenia. Kształty próbek do badań w poszczególnych warunkach są względnie ujednolicone. Pomimo tego, analizując literaturę przedmiotu można odnotować dużą różnorodność ich wymiarów geometrycznych. Kolejny problem to różne parametry pola magnetycznego, zarówno podczas sieciowania jak i przeprowadzania badań. Bardzo często autorzy prac przedstawiają wyniki badań jako funkcję natężenia pola magnetycznego (H [A/m]), indukcji magnetycznej (B [T]), czy wręcz prądu zasilającego cewkę generującą pole magnetyczne (I [A]). Bez znajomości szeregu dodatkowych wartości jak np.: przenikalność magnetyczna czy ilości zwojów cewki nie ma możliwości ich porównania. Należy również wspomnieć o różnych przedziałach częstotliwości obciążania wymuszającego oraz maksymalnych odkształceniach. Wyznaczone wartości modułów zachowawczego i stratności, są współczynnikami reologicznego modelu Kelvina-Voigta. Bardzo często jednak pomija się porównanie spójności otrzymanych danych z wyidealizowanym modelem materiałowym. Problem zgodności modeli reologicznych i wyników otrzymywanych w badaniach będzie szerzej omówiony w dalszej części pracy.

Opisywane materiały kompozytowe mają unikatowe właściwości. Z tego powodu często nie ma możliwości jednoznacznego określenia znormalizowanych warunków badań. Jednak ze względu na zbliżony charakter, najczęściej wykorzystywanych matryc, odpowiednim wydaje się odniesienie do norm dotyczących badań i oznaczania właściwości gumy. W kolejnych rozdziałach zamieszczono tabelaryczne zestawienie wybranych wyników badań. Ma ono charakter orientacyjny, z wymienionych powyżej powodów. Należy mieć również na uwadze to, że część wartości odczytano z różnego rodzaju charakterystyk i wykresów, z tego względu należy je traktować jako przybliżone.

Badania w warunkach naprężeń ścinających

Ze względu na unikalne właściwości elastomerów magnetoreologicznych, wielu badaczy skupia uwagę na ich zachowaniu się w polu magnetycznym. Najczęściej przeprowadzane badania dotyczą wyznaczania szeregu właściwości materiałowych związanych z obciążaniem kompozytu naprężeniem ścinającym. Schemat stanowisk do badań, w warunkach ścinania elastomerów magnetoreologicznych, przedstawia rysunek 2.18.



Rys. 2.18 Schematyczne przedstawienie próbek elastomeru magnetoreologicznego do badań w warunkach ścinania; 1 – elastomer magnetoreologiczny, 2 – warstwa adhezyjna, 3 – elementy mocujące, 4 – podstawa, *F* – siła wymuszająca, *H* – wektor natężenia magnetycznego

Próbka do badań składa się z prostopadłościennych bloków elastomeru magnetoreologicznego 1, połączonych za pomocą środka adhezyjnego 2 z płytkami mocującymi 3 wykonanego z materiału o dużej sztywności. Próbka zamocowana jest do nieruchomej podstawy 4. Taki układ jest obciążony siłą F o znanej wartości. Na próbkę działa pole magnetyczne H o zadanych parametrach.

Badaniu poddawano próbki w kształcie prostopadłościanów o zróżnicowanych wymiarach geometrycznych. Zakres ich wartości mieści się w przedziale od $20 \times 7,5 \times 1$ mm [80] do $30 \times 10 \times 6$ mm [62]. Materiały z których wykonywane były płytki mocujące to: aluminium [105], miedź [62], mosiądz [144], stal [80], ale również laminat z włókna szklanego [155]. Najczęściej stosowanymi środkami adhezyjnymi są kleje cyjanoakrylowe [105]. Próbki wykorzystywane w badaniach tego typu można odnieść do znormalizowanych próbek wykorzystywanych do oznaczania modułu przy ścinaniu ujętych w normie [124]. Norma określa badanie przy wykorzystaniu czterech powierzchni (zamiast dwóch jak przedstawiono na rysunku 2.18) jednak zasada pomiaru jest identyczna. Według [124] badane elementy powinny być prostopadłościanami o wymiarach: szerokość 20 mm ±5 mm, długość 25 mm ±5 mm, grubość 4 mm ±1 mm.

Wyznaczenie dynamicznych właściwości kompozytów wymaga przyłożenia zmiennej siły celem ich cyklicznego odkształcania. Zazwyczaj wykorzystuje się wymuszenie sinusoidalnie zmienne, o zadanej wartości amplitudy i częstotliwości generowanych odkształceń. Najczęściej stosowany zakres amplitud odkształcenia mieści się w przedziale od 0,6% do 2,5%, przy częstotliwości wymuszenia o przedziale od 1 Hz do aż 1250 Hz [105].

Do wyznaczania dynamicznych właściwości elastomerów magnetoreologicznych wykorzystuje się również reometry rotacyjne. Urządzenia tego rodzaju pozwalają na pomiar sił oporu powstających w materiale. Na podstawie takiego pomiaru można wyznaczyć wartość

modułu sprężystości oraz jego poszczególne składowe, to jest moduł zachowawczy i moduł stratności.

Tabela 2.2 zawiera zestawianie wybranych wyników z prac różnych autorów. Analiza przedstawionych danych pozwala odnotować znaczną rozbieżność otrzymywanych wartości. Można również zaobserwować bardzo dużą różnorodność stosowanych materiałów i warunków, w których przeprowadzano badania.

Tab. 2.2 Wybrane parametry badań i wyznaczone właściwości elastomerów magnetoreologicznych w warunkach ścinania; I – materiał matrycy, II – rodzaj cząsteczek ferromagnetycznych, III – wielkość cząsteczek ferromagnetycznych [µm], IV – zawartość ferromagnetyka [%], V – pole magnetyczne przy sieciowaniu, VI – odkształcenie γ [%], VII – częstotliwość wymuszenia f [Hz], VIII – zastosowane podczas badań pole magnetyczne, IX – moduł zachowawczy G' [MPa], X – maksymalna zmiana modułu zachowawczego $\Delta G'$ [MPa], XI – moduł stratności G'' [MPa], XII – maksymalna zmiana modułu stratności $\Delta G''$, XIII – źródło

I	II	Ш	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
poliuretan, elastomery uretanowe i uretanowo- mocznikowe	żelazo karbo- nylkowe	1÷2	11,5 vol	240 [kA/m]	10	10	480 [kA/m]	0,26	0,02	0,03	0,02	[18]
poliuretan, elastomery uretanowe i uretanowo- mocznikowe	proszek żelaza	70	11,5 vol	240 [kA/m]	10	10	480 [kA/m]	0,42	0,07	0,02	0,002	[18]
poliuretan, elastomery uretanowe i uretanowo- mocznikowe	żelazo karbo- nylkowe	6÷9	11,5 vol	240 [kA/m]	10	10	480 [kA/m]	0,33	0,06	0,03	0,017	[18]
guma silikonowa	żelazo karbo- nylkowe	5	70 wt	-	0,2	5	1 [T]	0,034	0,0075	0,011	0,003	[74]
silikon	proszek żelaza	40	35 vol	-	1	10	0,7 [T]	0,3	0,24	0,3	0,23	[26]
SEBS Tefabloc	ASC 300	42	82 wt	-	0,6	1	100 [kA/m]	1,97	0,2	0,29	0,051	[155]
Silikon typu RTV	proszek żelaza CN-HQ	2	30 vol	0,2 [T]	0,1	5	-	2,5	1,7	0,5	0,5	[11]
guma cis- polibutadienowa	żelzao CN	6	60 wt	1,3 [T]	0,03	10	1 [T]	0,25	0,19	0,06		[61]
poliuretan, elastomery uretanowe i uretanowo- mocznikowe	żelazo karbo- nylkowe	6÷9	33 vol	0,2 [T]	50	65	0,3 [T]	-	-	0,27	0,14	[17]
kopolimer blokowy Septon 4055 + mieszanina nasyconych węglowodorów	żelazo karbo- nylkowe	3,5	70 wt	brak	0,0667	1	0,7 [T]	0,053	0,099	-	-	[125]
kopolimer blokowy Septon 4055 + mie- szanina nasyconych węglowodorów + TC201	żelazo karbo- nylkowe	3,5	78,4 wt	1,4 [T]	0,0667	1	0,7 [T]	0,355	1,965	-	-	[125]
guma naturalna + sadza	żelazo karbo- nylkowe	1,7	33 vol	1 [T]	0,3	1	0,8 [T]	3,87	0,16	-	-	[31]
kauczuk nitrilowy + akrylonitryl	żelazo karbo- nylkowe	60	37,8	-	-	-	520 [kA/m]	0,7	0,9	-	-	[105]

guma naturalna	żelazo karbo- nylkowe	6	90 wt	1 [T]	0,3	5	-	4,2	4,5	-	-	[30]
SEBS	żelazo karbo- nylkowe	3÷5	70 wt	0,36 [T]	0,5	5	1 [T]	0,27	0,07	-	-	[108]
guma silikonowa 704	żelazo karbo- nylkowe	7	70 wt	1 [T]	0,2	13	1 [T]	0,41	0,155	-	-	[103]
poliuretan	żelazo karbo- nylkowe	2÷9	70 wt	1,2 [T]	0,1	1	1 [T]	2	0,1	-	-	[147]
poliuretan	żelazo karbo- nylkowe	3÷5	70 wt	0,9 [T]	0,2	1	1 [T]	6,38	0,22	-	-	[148]
guma silikonowa HTV	proszek żelaza CN	6	60 wt	0,35 [T]	2	10	1 [T]	0,29	0,02	-	-	[96]
poliuretan i kauczuk silikonowy	żelazo karbo- nylkowe	3÷5	67 wt	brak	-	-	-	-	0,15	-	-	[75]
poliuretan i kauczuk silikonowy + olej dimetylosilikonowy	żelazo karbo- nylkowe	3÷5	68 wt	brak	-	-	-	-	0,44	-	-	[75]
Kauczuk akrylonitrylo- butadienowy	żelazo ASC300	45	80 wt	-	1	11	520 [kA/m]	-	0,75	-	-	[106]

Badania w warunkach naprężeń ściskających

Wykonano również próby ściskania elastomerów magnetoreologicznych. Schemat takiego rodzaju badań przedstawia rysunek 2.19.

Badana próbka elastomeru magnetoreologicznego 3 znajduje się pomiędzy elementami mocującymi 2. Jeden z nich jest nieruchomo zamocowany do podstawy 1, drugi natomiast przekazuje siłę wymuszającą F. Na próbkę działa pole magnetyczne H o zadanych parametrach. Źródłem pola magnetycznego w tym przypadku może być cewka lub magnes stały.



Rys. 2.19 Schematyczne przedstawienie próbek elastomeru magnetoreologicznego do badań w warunkach ściskania; 1 – podstawa, 2 – elementy mocujące, 3 – elastomer magnetoreologiczny, F – siła wymuszająca, H – wektor natężenia magnetycznego

Badaniu poddawano głównie cylindryczne próbki o zróżnicowanych wymiarach geometrycznych. Ich wymiary mieściły się zazwyczaj w przedziale od 14×14 mm do 50×20 mm (średnica × wysokość) [54, 86]. Próbki tego typu wykorzystywane w badaniach można przykładowo odnieść do znormalizowanych próbek wykorzystywanych do oznaczania wartości tłumienia w gumie, ujętych normią [123]. Według [123], badany materiał powinien mieć kształt

walca o średnicy 35 mm ± 0.5 mm i wysokości 17,8 mm ± 0.2 mm. Można również odnieść się do normy [122], dotyczacej oznaczania odkształcenia w gumie podczas próby statycznego ściskania. Według [122] próbki do badań powinny mieć kształt walca o średnicy wynoszącej przynajmniej 16 mm. Stosunek wysokości do średnicy takiej próbki powinien mieścić się w przedziale od 0,5:1 do 1,5:1. Zalecane wymiary to: średnica 32 mm ±0,1 mm, wysokość 38 mm ±0,1 mm [122]. Badaniu poddawano próbki izotropowe [94] oraz anizotropowe [16, 65, 66] w kierunkach zgodnych i niezgodnych z kolumnowym rozkładem czastek [56].

Na podstawie badań literaturowych prób cyklicznego ściskania, można stwierdzić że stosowany zakres częstotliwości wymuszenia mieścił się najczęściej w przedziale od 0,1 Hz do 100 Hz [119, 128, 137, 139]. Amplituda odkształcenia najczęściej nie przekraczała 10% [137], jednak istnieją prace w których wartość odkształcenia osiągała nawet około 50% [81]. Zestawianie wybranych danych z badań różnych autorów zamieszczono w dalszej części pracy.

Badania w warunkach naprężeń rozciągających

Kolejnym rodzajem przeprowadzanych badań jest rozciąganie. Badania wykonywano w celu określenia naprężeń rozciągających próbek o różnym kształcie. W pracy [125] były to próbki w kształcie wiosełek. Prędkość rozciągania wynosiła 500 mm/min. W pracy [24] przedstawiono wyniki rozciągania walcowych próbek o wymiarach 10×15 mm (średnica × wysokość) z prędkością 0,05 mm/s i odkształceniem wynoszącym 6,6%. Z kolei, autorzy pracy [139] wykorzystali materiał w identycznym kształcie, jednak o wymiarach 4×10 mm. Zastosowane odkształcenie to 5%. Stosowano również próbki prostopadłościenne o wymiarach 10×10×3 mm. Były one poddane rozciąganiu z częstotliwością w zakresie od 0,1 Hz do 40 Hz. Amplituda odkształcenia mieściła się w przedziale od 0,1% do 40% [141]. Próbki tego typu wykorzystywane w badaniach można odnieść do znormalizowanych próbek wykorzystywanych do oznaczania właściwości gumy i kauczuku termoplastycznego w próbie rozciągania, ujętych w normie [121]. Zgodnie z wytycznymi, próbki powinny mieć kształt wiosełek, wśród których wyróżnia się kilka typów. Przykładowo, odcinek pomiarowy wiosełka typu 1 powinien mieć długość 25 mm ±0,5 mm i grubość 2 mm ±0,2 mm. Norma dopuszcza również stosowanie próbek w kształcie pierścieni [121]. Zestawianie wybranych danych z prac różnych autorów zamieszczono w tabeli 2.3.

Tab. 2.3 Wybrane parametry badań i wyznaczone właściwości elastomerów magnetoreologicznych w warunkach rozciągania; I – materiał matrycy, II – rodzaj cząsteczek ferromagnetycznych, III – wielkość cząstek ferromagnetycznych [µm], IV – zawartość ferromagnetyka [%], V – pole magnetyczne przy sieciowaniu, VIII – zastosowane podczas badań pole magnetyczne, XIV – osiągnięte odkształcenie ε [%], XV – moduł Younga E [MPa], XVI – maksymalne naprężenie σ_m [MPa], XIII – źródło

I	II	III	IV	V	VIII	XIV	XV	XVI	XIII
kauczuk silikonowy + olej silikonowy	żelazo karbo- nylkowe	(23÷35) ·10 ⁻³	10 wt	brak	0,7 [T]	650	60	400	[116]
kauczuk silikonowy + olej silikonowy	żelazo karbo- nylkowe	(23÷35) ·10 ⁻³	30 wt	brak	1,4 [T]	575	120	700	[116]
kauczuk silikonowy + olej silikonowy	żelazo karbo- nylkowe	(23÷35) ·10 ⁻³	50 wt	brak	2,2 [T]	475	180	900	[116]
guma silikonowa	-	4 i 50	-	-	1,8 [T]	6,6	0,11		[24]
kopolimer blokowy Septon 4055 +	żelazo karbo- nylkowe	3,5	70 wt	brak	-	1150	-	1,5	[125]

mieszanina nacyconych węglowodorów									
kopolimer blokowy Septon 4055 + mieszanina nacyconych węglowodorów + TC201	żelazo karbo- nylkowe	3,5	78,4 wt	brak	-	1400	-	1,82	[125]
SIEL	żelazo karbo- nylkowe	3÷5 i 50÷80	36 vol	brak	0,29 [T]	30	0,11	-	[139]
dwuskładnikowy kauczuk silikonowy	żelazo karbo- nylkowe	3,8	27 vol	0,18 [T]	brak	30	-	1,6	[54]

Inne badania

Z przeglądu literatury wynika, że przeprowadzane są również inne badania elastomerów magnetoreologicznych. W pracy [12] zamieszczono wyniki badań próbek wykonanych na bazie kauczuku silikonowego, proszku żelaza karbonylkowego, nanocząsteczek grafenu oraz innych dodatków. Badano zmianę rezystywności kompozytu dla natężenia pola magnetycznego $H \le 65$ kA/m i naprężenia ściskającego $\sigma \le 14,4$ kPa. Udowodniono, że wraz ze wzrostem pola magnetycznego oraz obciążenia maleje opór badanego materiału. Wzrost wymienionych współczynników od zera do wartości H = 60 kA/m i $\sigma = 3,8$ kPa spowodował spadek rezystancji

o 14,8% [12].

W pracach [3, 77] autorzy zamieścili wyniki badań dotyczące zmian rezystywności elastomerów magnetoreologicznych pod wpływem pola magnetycznego. Wykorzystywano w tym celu próbki w kształcie prostopadłościanów. Do wytworzenia kompozytu, poza dodatkami, wykorzystano silikonową matrycę oraz cząsteczki żelaza. Autorzy skupiają się na opracowaniu efektywnego składu i modelowaniu badanach materiałów. Celem badań jest zaproponowanie nowych rozwiązań w dotyczących czujników pola magnetycznego.

Właściwości mechaniczne tworzyw sztucznych są zależne od temperatury. Zasadnym jest więc zbadanie wpływu tego parametru na zachowanie się elastomerów magnetoreologicznych, co ma miejsce na przykład w pracy [158]. Autorzy badali szereg próbek anizotropowych o różnym składzie i udziale poszczególnych składników. Zastosowano gumę naturalną, syntetyczną, cząsteczki żelaza karbonylkowego oraz dodatki, w tym sadzę. Wykazano, że wraz ze wzrostem wartości temperatury maleje sztywność badanych kompozytów.

W pracy [68] autorzy badali zmianę wartości siły normalnej generowanej przez elastomer magnetoreologiczny. Była ona wynikiem: działania wstępnego obciążenia próbki, pola magnetycznego oraz dostarczanego ciepła. Rosnąca temperatura powodowała wzrost mierzonej siły, do pewnej wartości. Dalsze zwiększanie temperatury skutkowało jej spadkiem. Autorzy uważają, że takie zachowanie się kompozytu jest wynikiem zmiany jego sztywności oraz magnetyzacji [68]. Wartość mierzonej siły wzrastała wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego. Badaniu poddano izotropowe i anizotropowe próbki, które otrzymano poprzez połączenie kauczuku silikonowego i żelaza karbonylkowego.

Kolejnym zagadnieniem, któremu poświęca się coraz większą uwagę, jest badanie zjawiska magnetostrykcji. Autorzy publikacji [64] badali próbki izotropowe o różnej zawartości cząstek ferromagnetycznych, oraz próbki o różnych kierunkach anizotropowości. Składały się one z kauczuku silikonowego i żelaza karbonylkowego. Odnotowano zależność magnetostrykcji od zawartości oraz rozmieszczenia ferromagnetyka. Największa zmierzona wartość wynosiła $\lambda_m = 184 \cdot 10^{-6}$ dla natężenia pola magnetycznego wynoszącego H = 636 kA/m [64].

Zagadnieniu magnetostrykcji poświęcona jest również praca [36]. Wytworzono anizotropowe elastomery magnetoreologiczne, których osnową była syntetyczna guma. Jako

cząstki ferromagnetyczne wykorzystano żelazo karbonylkowe. Mierzono względne wydłużenie w zależności od przyłożonego pola magnetycznego, ale również wstępnego naprężenia. Wykorzystywano w tym celu zarówno naprężenia ściskające jak i rozciągające. Zauważono, że zachodząca magnetostrykcja nie jest symetryczna względem znaku wstępnego naprężenia [36]. Świadczy to o silnie nieliniowym wpływie wstępnego naprężenia na zachodzące zjawisko. Największe odnotowane wartości przyrostu względnego wydłużenia wynoszą $\Delta \varepsilon = 0,34\%$ bez wstępnego obciążenia, $\Delta \varepsilon = 0,48\%$ dla wstępnego obciążenia $\sigma/G = -0,288$ (naprężenia rozciągające), oraz około $\Delta \varepsilon = 0,6\%$ dla wstępnego obciążenia $\sigma/G = 0,288$ (naprężenia ściskające) [36].

W pracy [83] przedstawiono wyniki kompleksowych badań nad magnetostrykcją zachodzącą w elastomerach magnetoreologicznych. Wytworzono szereg próbek o strukturze izotropowej i anizotropowej. Jako materiał matrycy zastosowano żywicę epoksydową. Zawierały one Terfenol-D oraz proszek żelaza karbonylkowego w różnych proporcjach. Celem badań było określenie wpływu składu, pola magnetycznego, wstępnego naprężenia i polaryzacji na zmianę magnetostrykcji. Otrzymane wyniki zestawiono z wynikami otrzymanymi dla czystego Terfenolu-D. Największa zmierzona wartość zmiany magnetostrykcji wynosiła około $\Delta \lambda_m = 640 \cdot 10^{-6}$ dla natężenia pola magnetycznego wynoszącego H = 175 kA/m przy naprężeniu wstępnym $\sigma = 1$ MPa [83].

Na szczególną uwagę zasługują badania, których wyniki są zawarte w pracy [63]. Autorzy wytworzyli walcowe próbki do badań ściskających o średnicy d = 38,1 mm i wysokości z przedziału od 6,35 mm do 25,4 mm. Do badań związanych ze ścinaniem wytworzono prostopadłościenne próbki o wymiarach podstawy 22,45 mm × 12,7 mm i identycznym przedziałem wysokości. Materiał osnowy stanowił kauczuk dwuskładnikowy. Zastosowano także żelazo karbonylkowe, którego procentowa zawartość, w poszczególnych próbkach, mieściła się w zakresie od 30% wt do 70% wt. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zachodzące zmiany modułów są niezależne od grubości wykorzystywanych próbek. Są one zależne jedynie od natężenia pola magnetycznego i koncentracji cząstek żelaza w kompozycie [63].

2.5.3. Zastosowania elastomerów magnetoreologicznych

Podobnie jak ciecze, elastomery magnetoreologiczne znalazły szerokie zastosowanie w układach tłumienia lub pochłaniania drgań. Wykorzystanie materiałów mogacych zmieniać swoje właściwości pod wpływem zewnętrznych czynników, daje niespotykane dotychczas możliwości. Umożliwia bowiem, skonstruowanie tłumika drgań o sterowalnej charakterystyce. Układ wykorzystujący urządzenie tego typu jest zdolny do zmiany swojej częstotliwości rezonansowej. Dzięki odpowiedniemu algorytmowi sterującemu tłumienie może być w czasie rzeczywistym dostosowywane do częstotliwości wzbudzenia. Przykładem urządzenia tego typu jest omawiany w pracach [39, 103] aktywny tłumik drgań, przedstawiony schematycznie na rysunku 2.20. W obudowie 4 zamkniętej za pomocą pokrywy 1 znajduje się korpus 4 wykonany z materiału ferromagnetycznego i elektromagnes 6. Prowadnik 8, współpracuje z elastomerem magnetoreologicznym 7 i trzpieniem prowadzacym 2 zamontowanym w łożysku liniowym 3. Całość osadzona jest na podstawie 9. Zmianę parametrów urządzenia uzyskuje się dzięki zmianie warunków zasilania elektromagnesu. Generowane przez niego pole magnetyczne stymuluje elastomer magnetoreologiczny, pracujący w warunkach obciażeń ścinających. Według badań przeprowadzonych przez autorów pracy [39], zakres częstotliwości drgań własnych urządzenia mieści się w przedziale wartości od 27,5 Hz do 40 Hz.



Rys. 2.20 Schemat adaptacyjnego tłumika drgań; 1 – pokrywa, 2 – trzpień prowadzący, 3 – łożysko liniowe, 4 – korpus, 5 – obudowa, 6 – elektromagnes, 7 – elastomer magnetoreologiczny, 8 – prowadnik, 9 – podstawa; opracowano na podstawie [39, 40]

W pracach [71, 73, 114] przedstawiono konstrukcję aktywnego tłumika drgań skrętnych. W urządzeniu wykorzystano elastomer magnetoreologiczny pracujący w warunkach ścinania. Celem zastosowania opisywanego urządzenia jest tłumienie drgań układów napędowych różnego rodzaju pojazdów. Schemat opisywanego tłumika zamieszczono na rysunku 2.21. Obracający się wał 2 skojarzony jest z wewnętrzną tuleją 1. Pomiędzy tuleją wewnętrzną i zewnętrzną 6 znajduje się elastomer magnetoreologiczny 5, który pełni rolę sprężyny skrętnej. Wypusty 3, znajdujące się na obydwu tulejach, wywołują powstawanie sił sprężystych w podatnym elemencie. Dzięki temu mają one możliwość wykonywania wibracji względem siebie. Zastosowane w układzie cewki elektromagnetyczne 4 generują pole magnetyczne, wpływające na sterowanie właściwościami zastosowanego elastomeru magnetoreologicznego.



Rys. 2.21 Schemat tłumika drgań skrętnych; 1 – tuleja wewnętrzna, 2 – wał, 3 – wypust, 4 – cewka elektromagnetyczna, 5 – elastomer magnetoreologiczny, 6 – tuleja zewnętrzna

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że zaproponowany układ może przy odpowiednich warunkach zapewnić dziesięciokrotny wzrost częstotliwości względnej (od około 7 do 70 Hz) [114]. Dzięki właściwemu sterowaniu, istnieje możliwość zmiany częstotliwości własnej układu napędowego. Przesunięcie jej wartości względem częstotliwości wymuszenia pozwala zmniejszyć wartość drgań ustalonych.

W pracy [140] opisano konstrukcję tłumika drgań wykorzystującego elastomer magnetoreologiczny w trybie ściskania. Schemat urządzenia tego typu przedstawia rysunek 2.22. W podstawie 7 zamontowano prowadnice 1 i współpracujące z nimi łożyska liniowe 2. Zapewniają one właściwe prowadzenie dla rdzenia ferromagnetycznego 4, do którego wprowadzono elastomer magnetoreologiczny 6. Układ skonstruowany jest w taki sposób, że strumień pola magnetycznego 3 zamyka się poprzez oba wymienione elementy. Za pomocą cewki 5 generowane jest pole magnetyczne, które oddziałując na element podatny zmienia jego sztywność. W ten sposób realizowana jest zmiana częstotliwości własnej tłumika. Efektywność takiego rozwiązania konstrukcyjnego jest wysoka, ponieważ większość elementów układu spełnia funkcję masy dynamicznej. Na podstawie eksperymentu, autorzy pracy [140] dowiedli, że częstotliwość drgań własnych jest sterowalna i mieści się w zakresie od 37 Hz do 67 Hz.



Rys. 2.22 Schemat absorbera wykorzystującego magnetoreologiczny elastomer w trybie ściskania; 1 – prowadnica, 2 – łożysko liniowe, 3 – strumień magnetyczny, 4 – rdzeń ferromagnetyczny, 5 – cewka, 6 – elastomer magnetoreologiczny, 7 – podstawa; opracowano na podstawie [140]

Zastosowanie elastomeru magnetoreologicznego do kontroli i redukcji drgań siedzisk pojazdów przedstawiają autorzy prac [46, 98]. Schemat omawianego izolatora przedstawiono na rysunku 2.23. Do podstawy 7 przymocowana jest obudowa 6. Wewnątrz znajduje się cewka 5, zamontowana w specjalnym uchwycie 3. Pomiędzy uchwytem i rdzeniem 1 przekazującym obciążenie umieszczony jest elastomer magnetoreologiczny 2. Układ składa się również z pierścieni 4 wykonanych z niemagnetycznego materiału. Wymusza to zamknięcie się strumienia magnetycznego poprzez rdzeń. Dodatkowo pierścienie odciążają elastomer magnetoreologiczny z siły odpowiadającej masie cewki [46]. Przedstawiona konstrukcja układu sprawia, że element podatny obciążony jest naprężeniem, zarówno ściskającym jak i ścinającym. Eksperymentalne badania wykazały, że urządzenie tego typu pozwala wyraźnie zwiększyć tłumienie układu. Zastosowanie odpowiedniego algorytmu sterowania zwiększa jego efektywność względem pasywnego układu tłumiącego [98].



Rys. 2.23 Schemat magnetoreologicznego izolatora siedziska; 1 – rdzeń, 2 – magnetoreologiczny elastomer, 3 – uchwyt cewki, 4 – pierścień, 5 – cewka, 6 – obudowa, 7 – podstawa; opracowano na podstawie [46, 98]

Opisane powyżej aplikacje elastomerów magnetoreologicznych należą do najpopularniejszych. Badania dotyczące omawianych kompozytów i układów tłumiących, z ich wykorzystaniem, można dodatkowo odnotować w pracach [38, 52, 102, 134, 152, 149]. Jednak ich unikatowe właściwości spowodowały, iż poszukuje się również innych zastosowań. Wśród nich można wyróżnić:

- tuleje dla przemysłu motoryzacyjnego (redukcja przemieszczeń liniowych i skrętnych kół) [59],
- tłumiki drgań (tłumienie drgań budowli cywilnych) [10, 100, 101],
- czujniki siły (element detekcyjny) [161],
- czujniki magnetorezystancyjne (element detekcyjny) [13],
- mikroukłady elektromechaniczne do pomiaru pola magnetycznego (element detekcyjny) [45],
- zawory pneumatyczne (zmiana wielkości szczelin) [25],
- aktuatory (element generujący przemieszczenie) [87],
- zawieszenia samochodów (pomiar sił i przemieszczeń) [50],
- aktywne bariery tłumiące (tłumienie drgań mechanicznych okien i ścian) [55],
- chwytaki (elementy chwytne) [93, 115].

2.5.4. Matematyczne modele elastomerów magnetoreologicznych

Podział modeli matematycznych elastomerów magnetoreologicznych wynika z uwzględnienia różnych czynników. Pierwszy z nich odnosi się do izotropowej lub anizotropowej struktury materiału. Kolejnym z nich jest skala opisu materiału. Analiza oddziaływania pojedynczych cząstek ferromagnetycznych lub ich struktur ze sobą i materiałem matrycy, odnosi się do mikroskali. Alternatywą jest grupa modeli dotyczących opisu w makroskali. Ich podstawą jest określenie zależności pomiędzy zadanym charakterem wymuszenia i odpowiedzią rozpatrywanego materiału.

Wyróżnić można jeszcze jedną, odrębną grupę modeli. Stanowią ją zależności wiążące zjawiska o charakterze elektrycznym, magnetycznym, elastycznym i rzadziej – termicznym. Wykorzystując równania Maxwella, mechaniczne zasady zachowania, prawa termodynamiki, czy równania Lagrange'a, można otrzymać zależności opisujące rozważany ośrodek ciągły. Pozwala to na przeprowadzenie numerycznych obliczeń i symulacji zachowania się elastomerów magnetoreologicznych w zależności od różnych parametrów. Zagadnienia związane z przedstawionym podejściem do modelowania omawiane są między innymi w pracach [23, 27, 43, 44, 82, 109].

Modele skali mikro

Pierwsze modele opisujące zachowanie elastomerów magnetoreologicznych powstały na podstawie badań dotyczących cieczy magnetoreologicznych. Modele tego rodzaju opierają się na analizie oddziaływania sąsiadujących ze sobą cząstek. Z tego względu nazywa się je modelami dipolowymi.

W pracy [79] przedstawiono jednowymiarowy quasi-statyczny model oparty na dipolowym oddziaływaniu cząstek wewnątrz ustalonej struktury. Założono, że cząsteczki ferromagnetyczne są idealnymi, jednorodnymi sferami, które są ułożone w idealne łańcuchowe struktury z równymi odległościami pomiędzy ich poszczególnymi środkami. Dzięki temu sformułowano model, uwzględniający zachodzące wewnątrz materiału nieliniowe zjawiska magnetyczne, który opisuje zależność:

$$\Delta G \simeq \frac{\phi B_s^2}{2\mu_r \mu_0 \left(\frac{r_0}{d}\right)^3} \qquad \qquad \text{dla } \varepsilon < 0,1, \qquad (2.8)$$

gdzie: B_s – indukcja nasycenia, ϕ – udział objętościowy cząstek ferromagnetyka, μ_r – względna przenikalność magnetyczna cząstek, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, r_0 – początkowa odległość pomiędzy środkami cząstek, d – średnica cząstki.

W pracy [37], przyjmując podobne założenia, przeprowadzono symulacje komputerowe, których celem było wyznaczanie efektywnej zawartości cząstek ferromagnetycznych w kompozycie. Do obliczenia modułu sztywności materiału magnetoreologicznego w stanie niewzbudzonym wykorzystano zależność (2.9) opisaną dokładniej w [69]. Wykazano, że zawartość objętościowa materiału ferromagnetycznego wynosząca 27% jest najbardziej efektywna. Dla takiej wartości obserwuje się największą skalę efektu magnetoreologicznego. Zostało to potwierdzone dużą ilością wyników eksperymentalnych. Wykorzystując wyrażenia opisujące oddziaływania pomiędzy dipolami wyprowadzono zależność (2.10). Dla pojedynczego łańcucha cząsteczek różni się ona od zależności (2.8) o współczynnik liczbowy wynoszący 1,202 [37].

$$G_0 = (1 + 1,25\phi + 14,1\phi^2) \cdot G_m, \tag{2.9}$$

$$\Delta G \cong \frac{3\phi\mu_0 M_s^2}{5\left(\frac{r_0}{d}\right)^3},\tag{2.10}$$

Wyprowadzono również zależności opisujące oddziaływania pomiędzy dipolami w całym łańcuchu cząstek. Model tego typu przedstawiono w pracach [53, 130, 157], w postaci równań (2.11) i (2.12).

$$\Delta G = \frac{9\phi C m_1^2 (4 - \gamma^2)}{8\pi^2 r_0^2 a^3 \mu_0 \mu_r (1 + \gamma^2)^{\frac{7}{2}}},$$
(2.11)

$$\Delta G = 3\phi\mu_0\mu_r\beta^2 H^2 \left(\frac{a}{r_0}\right)^3 C \left[\left(\frac{10}{A^2} + \frac{2}{B^2}\right) + \frac{48\beta C}{A^3} \left(\frac{a}{r_0}\right)^3 \right],$$
(2.12)

gdzie: $A = 1 - 4\beta \cos^3 \gamma \left(\frac{a}{r_0}\right)^3 \cdot C$, $B = 1 + 2\beta \cos^3 \gamma \left(\frac{a}{r_0}\right)^3 \cdot C$, $\beta = \frac{\mu_r - \mu_e}{\mu_p + 2\mu_e}$, m_1 – dipolowy moment cząstki, a – promień cząstki, γ – odkształcenie postaciowe, C – współczynnik, μ_e – względna przenikalność magnetyczna matrycy elastomerowej. Schemat struktury elastomeru magnetoreologicznego wraz z naniesionymi wymiarami przedstawia rysunek 2.24.



Rys. 2.24 Schemat struktury elastomeru magnetoreologicznego; 1 – cząstka ferromagnetyczna, 2 – materiał matrycy; opracowano na podstawie [53, 130, 157]

Wyniki uzyskane z rozwiązania modeli matematycznych (2.11) i (2.12) dają zbliżone rezultaty. Jednak dla małych odległości pomiędzy cząstkami (parametr r_0), model (2.12) osiąga znacznie większe wartości zmiany modułu Kirchhoffa. Uwzględnia on wzajemne oddziaływanie zbliżonych do siebie cząstek ferromagnetycznych znajdujących się w polu magnetycznym [53].

Powstające w elastomerach magnetoreologicznych kolumnowe rozkłady cząstek są wynikiem działania pola magnetycznego podczas sieciowania. Jakość i rozkład tych struktur są zależne od natężenia przyłożonego pola. Przedstawiony w pracy [32] model matematyczny uwzględnia to zjawisko, co schematycznie przedstawiono na rysunku 2.25.



Rys. 2.25 Schematyczne przedstawienie struktur powstających w magnetoreologicznych elastomerach pod wpływem działania pola magnetycznego; a)-c) widok równoległy do kolumn, d)-f) widok prostopadły do kolumn; a) i d) bez pola magnetycznego, b) i e) pole magnetyczne o niewielkim natężeniu, c) i f) pole magnetyczne o dużym natężeniu, opracowano na podstawie [32]

Model (2.13) sformułowano na podstawie trzech założeń. Kompozyt może być podzielony na poszczególne bloki o identycznej objętości i o wymiarach $m_2 \times m_2 \times L$. Dodatkowo, w każdym bloku można wyróżnić czworoboczne kolumny o identycznej grubości – n_1 .
Założono również, iż każda z kolumn zawiera jednakową objętość cząstek ferromagnetycznych.

Dla próbek przygotowanych przez autorów, w polu magnetycznym o niewielkim natężeniu wyniki wyznaczone z zależności (2.13) dają zbliżone wartości do wyników otrzymanych z równań (2.8) i (2.10) [32]. Wynika to z założenia idealnej łańcuchowej struktury, co nie jest zgodne z rzeczywistością. Omawiany model ma szerokie możliwości zastosowania do opisu zależności pomiędzy mikrostrukturą i właściwościami kompozytu.

$$\Delta G = \frac{(\mu_{\parallel} - \mu_{\perp})H^2 \sin \gamma \cdot \cos \gamma}{\gamma},$$
(2.13)

gdzie: μ_{\parallel} – przenikalność magnetyczna bloku równoległego do osi kolumny, μ_{\perp} - przenikalność magnetyczna bloku prostopadłego do osi kolumny.

Wielkość cząstek ferromagnetycznych, zastosowanych przy wytwarzaniu kompozytu ma wpływ na jego właściwości. W pracy [159] przedstawiono model (2.14) uwzględniający wielkość cząstek ferromagnetycznych oraz ich magnetyczne nasycenie. Różni się on od modeli omówionych wcześniej. Założono, że cząsteczki żelaza są pokryte magnesowalną warstwą, na którą składa się żel polimerowy i proszek ferrytowy o wielkości cząstek w skali nano. Schemat struktury takiego kompozytu przedstawiono na rysunku 2.26. Podobnie jak we wcześniejszych modelach, założono idealną sferyczność drobin materiału ferromagnetycznego oraz ich idealną strukturę łańcuchową. Według przedstawionego modelu, dodatkowa obecność nanocząsteczek, powoduje wzrost wyznaczonej wartości modułu odkształcalności postaciowej.



Rys. 2.26 Struktura elastomeru magnetoreologicznego zawierającego nanocząstki; 1 – żel polimerowy, 2 – nanocząsteczka, 3 – cząsteczka; opracowano na podstawie [159]

$$\Delta G = \frac{3}{4} \frac{\phi \mu_0 \mu_r \left(\frac{d}{r_0}\right) H^2 (\mu_r - \mu_e)^2 \cdot \left[\frac{4r_0}{d} (\phi_n - 1) - 3\phi_n\right]^2}{\sqrt{1 + \gamma^2} \left\{3\sqrt{1 + \gamma^2} (\mu_r + \mu_e) + \left[\frac{4r_0}{d} (\phi_n - 1) - 3\phi_n\right] (\mu_r - \mu_e)\right\}^2}, \quad (2.14)$$

gdzie: ϕ_n – udział objętościowy nanocząstek.

W pracy [97] przedstawiono model matematyczny elastomeru magnetoreologicznego zawierającego ferromagnetyczne cząsteczki o różnych wymiarach geometrycznych (2.15) i (2.16). Wyznaczano zmianę sztywności kompozytu w zależności od stosunku zawartości mniejszych cząstek względem całkowitego udziału ferromagnetyka. Efektywna zawartość wynosiła 23,2%, przy średniej średnicy dużych cząstek dziesięciokrotnie większej niż średniej średnicy cząstek małych [97].

$$\Delta G \approx \frac{(73,64x - 17,12)\phi\mu_0 H^2}{(9\mu_0 H + 2,72)^2} + \frac{0.908(1 - x)\phi\mu_0 H^2}{(\mu_0 H + 0,091)^2} \qquad \qquad \text{dla} \qquad (2.16)$$

gdzie: $x = \frac{\phi_s}{\phi_s + \phi_l}$, ϕ_s – udział objętościowy małych cząstek, ϕ_l – udział objętościowy dużych cząstek.

Modele skali makro

Kolejna grupa modeli odnosi się do makroskali. Powstają one na drodze szeregowego lub równoległego łączenia matematycznych modeli reologicznych: ciała Hooke'a (2.17), ciała St. Venanta (2.18) i płynu Newtona (2.19). Opisują one trzy rodzaje odkształceń idealnych, kolejno: sprężystych, plastycznych oraz przepływu. Równania konstytutywne powstałe w wyniku wykorzystania wymienionych modeli reologicznych wiążą ze sobą zależności pomiędzy naprężeniem, odkształceniem oraz czasem. Schemat i charakterystykę podstawowych modeli reologicznych przedstawia rysunek 2.27. Z połączenia ciała sprężystego i lepkiego otrzymuje się dwa modele, które uznać można za podstawowe. Są to ciało: Kelvina-Voigta i ciało Maxwella. Za ich pomocą można scharakteryzować materiał o właściwościach lepkosprężystych. Będą one szerzej omówione w dalszej części pracy.

$$\sigma = E\varepsilon, \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \dot{\gamma} = 0 \\ |\dot{\gamma}| > 0 \end{aligned} \qquad \begin{array}{l} \text{gdy } |\tau| < \tau_0, \\ \text{gdy } |\tau| = \tau_0, \end{aligned} \tag{2.18}$$

(2.19)

$$= n\dot{\nu}.$$

τ



Rys. 2.27 Schemat i charakterystyka podstawowych modeli reologicznych; a) ciało Hooke'a, b) płyn Newtona, c) ciało St. Venanta

W pracy [89], w celu zamodelowania zachowania się izotropowego kompozytu magnetoreologicznego podczas cyklicznego ściskania, zastosowano zmodyfikowany model ciała Kelvina-Voigta. Klasyczny element sprężysty zastąpiono elementem mającym nieliniową

charakterystykę. Schemat modelu zamieszczono na rysunku 2.28, jest on opisany zależnością (2.20).



Rys. 2.28 Model elastomeru magnetoreologicznego z nieliniowym elementem sprężystym; opracowano na podstawie [89]

$$F = c_0 \dot{x} + f(x), (2.20)$$

gdzie: $c_0 = c_{0a} + c_{0b} \cdot B$, $f(x) = k_0 x^2 + k_1 x = k_{oa} + k_{0b} \cdot B$, $k_1 = k_{1a} + k_{1b} \cdot B$; $c_{0a}, c_{0b}, k_{oa}, k_{0b}, k_{1a}, k_{1b}$ – współczynniki modelu.

W pracy [49] zaproponowano połączenie modelu Maxwella oraz modelu Ramberga-Osgooda. Celem pierwszego modelu jest opis wiskoelastycznych właściwości elastomeru magnetoreologicznego, drugiego natomiast – zamodelowanie jego nieliniowych właściwości. Schemat modelu przedstawia rysunek 2.29. Zależność (2.21) opisuje zachowanie się modelu Ramberga-Osgooda podczas obciążania materiału, natomiast zależność (2.22) podczas jego odciążania. Model Maxwella opisany przy użyciu siły i przemieszczenia przedstawia (2.23). Całkowita siła wynikająca z równoległego połączenia obydwu modeli dana jest zgodnie z równaniem (2.24).



Rys. 2.29 Model elastomeru magnetoreologicznego z nieliniowym modelem Ramberga-Osgooda; opracowano na podstawie [49]

$$x = \frac{F_r}{k_0} + \frac{F_r}{k_0} \left(\frac{F_r}{F_y}\right)^{r-1},$$
 (2.21)

$$x - x_{i} = \frac{F_{r} - F_{i}}{k_{0}} + \frac{F_{r} - F_{i}}{k_{0}} \left| \frac{F_{r} - F_{i}}{2F_{y}} \right|^{r-1},$$
(2.22)

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{k_m} \frac{dF_m}{dt} + \frac{F_m}{c_m},\tag{2.23}$$

$$F = F_r + F_m, \tag{2.24}$$

gdzie: x – przemieszczenie, F_r – siła obciążająca model Ramberga-Osgooda, k_0 – sztywność ścinania, r – współczynnik kształtu histerezy, F_y – siła odpowiadająca granicy plastyczności, F_i – graniczna wartość siły, x_i – graniczne przemieszczenie, F_m – siła obciążająca model Maxwella, k_m – współczynnik sprężystości, c_m – współczynnik tłumienia, F – całkowita siła.

W pracach [84, 95] przedstawiono model stanowiący połączenie ciała Maxwella i ciała sprężysto idealnie plastycznego (rysunek 2.30).



Rys. 2.30 Schemat modelu ciała sprężysto-lepkoplastycznego; opracowano na podstawie [95]

Dla tak przyjętego modelu zależności wiążące naprężenie i odkształcenie dane są wzorami (2.25) i (2.26).

$$\tau + \frac{\eta}{G_1}\dot{\tau} = G_2 \left(\gamma + \eta \dot{\gamma} \frac{G_1 + G_2}{G_1 G_2} \right) - G_2 \gamma_k + \tau_{02} sign\dot{\tau},$$
(2.25)

$$\tau + \frac{\eta}{G_1}\dot{\tau} = \eta\dot{\gamma} + \tau_0 sign\dot{\tau} \qquad \text{gdy } \tau_2 = \tau_0 sign\dot{\tau}, \qquad (2.26)$$

gdzie: τ_0 – naprężenie ścinające, τ_0 – granica plastyczności ciała idealnie plastycznego, $\dot{\tau}$ – prędkość naprężenia, η – lepkość, G_1 , G_2 – moduły sprężystości postaciowej, γ – odkształcenie postaciowe, γ_k – wartość odkształcenia w momencie rozpoczęcia odciążania w elemencie idealnie plastycznym, $\dot{\gamma}$ – prędkość odkształcenia.

Z kolei w pracy [155] oraz zaproponowano uproszczenie powyższego modelu. Zaobserwowano, że w pewnym zakresie częstotliwości wymuszenia, zmiany zachodzące w materiale są niewielkie. Zakładając ich niezmienność wyeliminowano element lepki z modelu. Dzięki temu znacznie ułatwiono analizę i proces modelowania badanego kompozytu. Schemat otrzymanego w ten sposób ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym przedstawia rysunek 2.31.



Rys. 2.31 Schemat ciała sprężysto-plastycznego z kinematycznym wzmocnieniem liniowym

Związki konstytutywne opisujące jego zachowanie to równania (2.27) i (2.28).

$$\tau = \gamma (G_1 + G_2) - G_2 \gamma_k + \tau_0 sign\dot{\tau}, \qquad (2.27)$$

$$\tau = \gamma G_1 + \tau_0 sign \dot{\tau} \qquad \qquad \text{gdy } \tau_2 = \tau_0 sign \dot{\tau}. \tag{2.28}$$

Na uwagę zasługuje model przedstawiony w pracy [33]. Uwzględnia on właściwości wiskoelastyczne materiału matrycy, zmianę właściwości kompozytu wywołaną polem magnetycznym oraz wzajemne przemieszczanie się cząstek ferromagnetycznych względem matrycy. Do określenia wpływu pola magnetycznego na zachowanie się elastomeru magnetoreologicznego wykorzystano zależność (2.8), którą wyznaczono we wcześniej opisywanej pracy [79]. Dotyczy ona modelu dipolowego i zakłada między innymi kolumnowy

rozkład cząstek. Schemat opisywanego modelu przedstawia rysunek 2.32, natomiast równania konstytutywne opisują zależności od (2.29) do (2.34).



Rys. 2.32 Reologiczny model rozpatrujący dynamiczne właściwości MRE; opracowano na podstawie [33]

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4, \tag{2.29}$$

$$\tau_1 = G_1 \gamma, \tag{2.30}$$

$$\tau_2 = \eta \dot{\gamma}_1 = G_2 \gamma_2 \qquad \qquad \text{gdzie } \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \qquad (2.31)$$

$$\tau_3 = \frac{27\phi^2\mu_0(\mu_r - 1)^2 M_s^2 H^2 \gamma (4 - \gamma^2)}{4\pi^2\mu_e\mu_0(1 + \gamma^2)^{\frac{5}{2}}}$$
(2.32)

$$\dot{\tau}_4 = G_4 \dot{\gamma}$$
 gdy $-\tau_0 < \tau < \tau_0$, (2.33)

$$\tau_4 = \tau_0 \operatorname{sign} \dot{\gamma} \qquad \qquad \operatorname{gdy} - \tau_0 \ge \tau \\ \operatorname{lub} \tau_0 \ge \tau. \qquad (2.34)$$

Przedstawione przykłady, nie wyczerpują całkowicie zagadnienia związanego z wykorzystaniem modeli reologicznych do opisu elastomerów magnetoreologicznych. Problematyka ta poruszany jest również, między innymi, w pracach [67, 99, 117, 153].

3. Badania elastomerów magnetoreologicznych

Wstęp

Prace badawcze związane z elastomerami magnetoreologicznymi podzielono na kilka etapów. Celem pierwszego z nich jest określenie wpływu składu i metod wytwarzania badanych kompozytów na zmianę ich właściwości mechanicznych wywołanych polem magnetycznym [92]. Wyniki badań pozwoliły na zdobycie niezbędnej wiedzy i umiejętności do zaplanowania kierunku dalszych badań. Dotyczą one udoskonalenia składu i metody wytwarzania próbek oraz dodatkowo rozszerzenia programu przeprowadzanych eksperymentów. Na podstawie wybranych parametrów wybrano najbardziej efektywne próbki i przeprowadzono szczegółowe badania. Realizacja tego celu pozwoliła na wyznaczenie szeregu współczynników materiałowych. Dzięki temu możliwe było, zrealizowanie następnego etapu związanego z rozważaniami teoretycznymi i praktycznymi. które dotyczyły zaproponowania i implementacji reologicznego modelu materiałowego. To zagadnienie szerzej omówiono w dalszej części pracy.

3.1. Badania wstępne

Charakterystyka próbek do badań wstępnych

W początkowej części badań skupiono się na opracowaniu najbardziej efektywnego składu i metod otrzymywania elastomeru magnetoreologicznego. Przygotowano dwa rodzaje próbek różniących się zawartością poszczególnych materiałów ferromagnetycznych. Miało to na celu określenie wpływu różnic w składnie na skalę zmian właściwości mechanicznych. Jako materiał osnowy zastosowano dwuskładnikowy kauczuk silikonowy - GUMOSIL B, dostarczony przez firmę Silikony Polskie. Jako cząsteczki ferromagnetyczne zastosowano: proszek żelaza o ziarnistości 325 mesh i czystości 97% oraz proszek krzemu o ziarnistości 325 mesh i czystości 99%, firmy Sigma Aldrich. Próbki do badań wykonano mieszając w atmosferze ochronnej argonu, kauczuk silikonowy z cząsteczkami ferromagnetycznymi. Następnie dodano katalizator OL-1 i przeprowadzono ponowne mieszanie. Tak przygotowaną mieszaninę przelano do wcześniej przygotowanych form. Sieciowanie próbek odbywało się w temperaturze pokojowej bez wpływu pola magnetycznego. Wytworzone w taki sposób próbki powinny cechować się izotropowością. Wynika ona z równomiernego rozmieszczenia ferromagnetyka uwarunkowanego mieszaniem oraz nieobecnościa czastek pola magnetycznego. Charakterystykę wykonanych próbek zawiera tabela 3.1, a mikroskopowe zdjęcia struktury próbek przedstawia rysunek 3.1. Ich analiza pozwala zaobserwować przypadkowy rozkład czasteczek ferromagnetyka, który jest widoczny jako jasne pola.

Tab. 3.1 Charakterystyka wykonanych próbek do badań; I – materiał matrycy, II – rodzaj cząsteczek ferromagnetycznych, IV – łączna zawartość ferromagnetyków [%], XVII – stosunek zawartości ferromagnetyków [%] Fe/Si, XVIII – rodzaj próbki

Ι	П	IV	XVII	XVIII
kauczuk silikonowy	proszek żelaza, proszek krzemu	30 wt	50/50	U
kauczuk silikonowy	proszek żelaza, proszek krzemu	30 wt	85/15	W



Rys. 3.1 Mikroskopowe zdjęcia próbek; a) próbka U, b) próbka W

Tak wykonany kompozyt miał kształt prostopadłościenny, co wynikało z geometrii przygotowanej formy. W następnym kroku wycięto, bryły o postaci walca, będące próbkami do badań. Do tego celu wykorzystano specjalistyczne wykrojniki z ostrzami stałymi, które wykonano zgodnie z normą [120]. Otrzymana w ten sposób kompozytowa próbka miała postać walca o średnicy d = 35 mm, oraz wysokości h = 18 mm.

3.1.1. Metodyka badań wstępnych

Podjęte badania dotyczyły statycznej próby ściskania w warunkach temperatury pokojowej. Użyto w tym celu maszyny wytrzymałościowej firmy MTS. Ściskanie odbywało się z prędkością v = 0.5 mm/min do maksymalnej wartości naprężeń wynoszących 0,66 MPa. Ustabilizowaną próbkę obciążano siłą osiową. Początkowo bez pola magnetycznego, a następnie siłami o coraz większych wartościach, odpowiednio do rosnącego natężenia pola magnetycznego. W ten sposób uzyskano pięć punktów pomiarowych. Dla każdego punktu wykonano po pięć prób. W czasie trwania eksperymentu mierzono wartość siły oraz przemieszczenia. Jako estymator szukanej wartości wybrano średnią wartość krzywej naprężenie-odkształcenie dla poszczególnych wartości pola magnetycznego. Schemat stanowiska pomiarowego oraz jego widok przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3.2 i 3.3.



Rys. 3.2 Schemat stanowiska pomiarowego; 1 – elementy mocujące, 2 – element przenoszący obciążenie, 3 – cewka, 4 – elastomer magnetoreologiczny



Rys. 3.3 Widok stanowiska pomiarowego; 1 – elementy mocujące, 2 – element przenoszący obciążenie, 3 – cewka

Elementy mocujące 1 są zamontowane w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Pomiędzy nimi umieszczona jest próbka elastomeru magnetoreologicznego 4 oraz element przenoszący obciążenie 2. Kompozyt znajduje się wewnątrz cewki 3 generującej pole, którego natężenie jest zależne od parametrów zasilania. Maszyna wytrzymałościowa generuje siłę ściskającą *F* zbliżając do siebie szczęki z zadaną prędkością. Celem określenia wartości indukcji magnetycznej, generowanej przez zastosowany układ, wyznaczono jego charakterystykę w funkcji parametrów zasilania. Wykorzystano w tym celu teslomierz LZ641H firmy Enes Magnesy wyposażony w sondę osiową. Umieszczono ją w centrum cewki, następnie mierzono wartość indukcji magnetycznej dla wzrastających wartości natężenia prądu elektrycznego. Otrzymano w ten sposób liniową charakterystykę przedstawioną na rysunku 3.4.



Rys. 3.4 Zależność pomiędzy natężeniem prądu i indukcją magnetyczną stanowiska pomiarowego

Charakterystyki ściskania elastycznych tworzyw sztucznych są nieliniowe. Podczas ściskania zachodzi deformacja o charakterystycznym przebiegu. Próbki elastomeru pod wpływem działania siły osiowej, zmieniają swój kształt z walcowego na baryłkowy. Jest to spowodowane tym, że w środkowej części próbki materiał nie ma możliwości przemieszczenia się bez zmiany swojej objętości. Naprężenia rozkładają się nierównomiernie, ponieważ tak odkształcona próbka znajduje się w stanie wielokierunkowego ściskania. Skala zachodzącej deformacji jest zależna od kształtu badanego elementu (dla walcowej próbki można odnieść się przykładowo do stosunku średnicy do wysokości) oraz wartości względnego odkształcenia.

W związku z tym, istotnym staje się zagadnienie jednoznacznego określenia stałych materiałowych wyznaczonych na podstawie wykresu naprężenie-odkształcenie dla ściskania.

Celem zestawienia i porównania otrzymanych danych dla różnych próbek, przyjęto ujednolicony sposób wyznaczania współczynnika sprężystości E_s . Jest on określony jako współczynnik kierunkowy prostej, która jest wynikiem regresji liniowej pewnej części wykresu naprężenie-odkształcenie. Do określania jego wartości wybrano zakres od 0 do 0,78 maksymalnego odkształcenia osiągniętego w czasie eksperymentu. Dla założonego przedziału, otrzymane w wyniku badań krzywe, cechowały się największą prostoliniowością. Współczynniki determinacji osiągały wartości przekraczające 0,99. Sposób wyznaczania współczynnika sprężystości przedstawiono na rysunku 3.5.



Rys. 3.5 Zasada wyznaczania współczynnika sprężystości z otrzymanych wyników badań

Wyniki badań wstępnych

Zbiór otrzymanych wyników dla próbek U i W (tabela 3.2) zamieszczono na rysunkach 3.6 oraz 3.9. Celem dokładniejszego pokazania skali zachodzących zmian, odpowiednie powiększenia wybranych części wykresów przedstawiają rysunki 3.7, 3.8, 3.10, 3.11.



Rys. 3.6 Wyniki próby ściskania dla próbki U



Rys. 3.7 Wyniki próby ściskania dla próbki U – 1



Rys. 3.8 Wyniki próby ściskania dla próbki U – 2



Rys. 3.9 Wyniki próby ściskania dla próbki W



0,184 0,1888 0,1936 0,1984 0,2032 0,208 Odkształcenie ε [-]

Rys. 3.11 Wyniki próby ściskania dla próbki W – 2

Analiza przedstawionych charakterystyk pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego średnia wartość naprężenia, niezbędna do uzyskania identycznego odkształcenia, wzrasta. Jest to związane z efektem magnetoreologicznym. Skala tego zjawiska jest zależna od parametrów przyłożonego pola magnetycznego. Celem dokładnej analizy, uzyskanych wyników, wyznaczono współczynniki sprężystości dla badanych materiałów jako funkcje pola magnetycznego. Wyznaczono również wartości względnego i bezwzględnego efektu magnetoreologicznego, zgodnie z wzorami (2.6) oraz (2.7). Otrzymane wyniki przedstawiają rysunki 3.12 oraz 3.13. Ich tabelaryczne zestawienie zamieszczono w tabeli 3.2.



Rys. 3.12 Zmiana współczynnika sprężystości E_s w funkcji indukcji pola magnetycznego dla próbki U



Rys. 3.13 Zmiana współczynnika sprężystości E_s w funkcji indukcji pola magnetycznego dla próbki W

	Próbka U		Próbka W		
<i>B</i> [mT]	E _s [MPa]	<i>R</i> ²	E _s [MPa]	<i>R</i> ²	
0	3,2738	0,9963	2,9843	0,9976	
12	3,3040	0,9966	3,0277	0,9974	
25,3	3,3050	0,9962	3,0338	0,9975	
37,5	3,3131	0,9963	3,0373	0,9975	
50	3,3350	0,9964	3,0534	0,9975	
	ΔE_s [MPa]	ΔE_r [%]	ΔE_s [MPa]	ΔE_r [%]	
	0,0612	1,869	0,0691	2,315	

Tab. 3.2 Zestawienie wyników badań dla próbki U oraz W

Na podstawie przestawionych danych (tabela 3.2) można stwierdzić, że współczynnik sprężystości dla każdej z próbek wzrasta wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego. Jednak skala zachodzących zmian jest niewielka. Znajduje to potwierdzenie w analizie współczynnika względnego efektu magnetoreologicznego ΔE_r . Jego maksymalna wartość wynosi zaledwie 2,3% – jest on większy dla próbki W. Taki stan rzeczy można wytłumaczyć większą zawartością czystego żelaza. Próbka typu W charakteryzuje się również niższą wartością początkowego współczynnika sprężystości. Ma to wpływ na otrzymane wyniki,

ponieważ efekt magnetoreologiczny jest zależny od sztywności kompozytu, a w szczególności materiału matrycy [15, 106].

Na podstawie badań wstępnych zgromadzono doświadczenie i umiejętności niezbędne do dalszej analizy omawianego zagadnienia. Zebrano również szereg uwag i spostrzeżeń, które należało uwzględnić celem poprawy efektywności prowadzonych prac. Za kluczowe uznano:

- dobranie właściwego składu wytwarzanych elastomerów magnetoreologicznych, to jest, połączenie matrycy o względnie małej sztywności z materiałem ferromagnetycznym o możliwie najlepszych właściwościach magnetycznych,
- dobranie odpowiednich parametrów geometrycznych próbek do badań wyniki odkształcania elementów wykonanych z materiałów elastycznych obciążeniem ściskającym są zależne w znacznym stopniu od przyjętego kształtu,
- przygotowanie takiej ilości oraz rodzajów próbek, która umożliwi analizę i ocenę wpływu metod wytwarzania na badane właściwości mechaniczne,
- wytworzenie anizotropowych próbek elastomerów magnetoreologicznych, co pozwoli na zwiększenie efektu magnetoreologicznego,
- skonstruowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego uzyskanie możliwie największych parametrów pola magnetycznego.

3.2. Badania statyczne

Charakterystyka próbek do badań

Do dalszej części badań przygotowano po cztery próbki trzech rodzajów. Poszczególne rodzaje próbek różniły się metodami wytwarzania. Sieciowanie odbywało się dla różnych parametrów pola magnetycznego, z zakresu od 0 mT do wartości 300 mT. Jako materiał osnowy zastosowano poliuretan będący mieszaniną polioli VORALUX HF 505 i 14922 izocyjanianu HB 6013 firmy DOW Chemical Company. Materiał ten cechuje względnie niska twardość i sztywność. Zastosowanym materiałem ferromagnetycznym jest proszek żelaza karbonylkowego o średnicy cząstek 6-9 µm, produkcji Fluka. Ma on bardzo dobre właściwości magnetyczne, jest również łatwodostępny. Poszczególne składniki poddano mechanicznemu wymieszaniu, a następnie odgazowaniu i umieszczeniu w specjalnej formie. Jej konstrukcję przedstawiono na rysunku 3.14.



Rys. 3.14 Schemat układu formy do wytwarzania próbek MRE; 1 – pokrywy formy, 2 – elementy mocujące pokrywy, 3 – elastomer magnetoreologiczny, 4 – forma, 5 – elementy mocujące formę

Pomiędzy dwoma pokrywami 1 wykonanymi ze stali, znajduje się forma 4 wykonana ze stopu aluminium. Wewnątrz niej znajdują się kanały nadające elastomerowi magnetoreologicznemu 3 wymagane cechy geometryczne. Forma jest przymocowana do pokrywy za pomocą śrub 5. Szczelne zamknięcie form przez pokrywy 1 zapewniają odpowiednio napięte śruby 2 wykonane ze stopu aluminium. Podczas sieciowania próbek forma poddana jest działaniu pola magnetycznego wzdłuż ich osi. Odpowiedni dobór zastosowanych materiałów sprawia, że strumień pola magnetycznego zamyka się poprzez wytwarzane próbki. Dzieje się tak, ponieważ zastosowany stop aluminium oraz powietrze, mają znacznie mniejsze współczynniki przenikalności magnetycznej niż pokrywy formy i sam kompozyt magnetoreologiczny. Tak skonstruowana forma przystosowana jest do wielokrotnego użytku. Jej zaletą jest również to, że zapewnia możliwość wytworzenia próbek o różnych cechach geometrycznych. Można je zmieniać poprzez odpowiednie kształtowanie kanałów, w których sieciuje kompozyt.

Uzyskane próbki miały kształt walców o średnicy d = 20 mm oraz wysokości h = 20 mm. Ich parametry przedstawia tabela 3.3. Dodatkowo wytworzono próbki z czystego materiału matrycy. Mikroskopowe zdjęcia struktury próbek przedstawiono na rysunku 3.15.

Tab. 3.3 Charakterystyka wykonanych próbek do badań; I – materiał matrycy, II – rodzaj cząsteczek ferromagnetycznych, IV – zawartość ferromagnetyka [%], VIII – pole magnetyczne przy sieciowaniu [mT], XVIII – rodzaj próbki

Ι	П	VIII	XVIII	
poliuretan	proszek żelaza karbonylkowego	33 vol	brak	Х
poliuretan	proszek żelaza karbonylkowego	33 vol	100	Y
poliuretan	proszek żelaza karbonylkowego	33 vol	300	Z







Rys. 3.15 Mikroskopowe zdjęcia próbek; a) próbka Z (pole magnetyczne podczas sieciowania – 300 mT), b) próbka Y (pole magnetyczne podczas sieciowania – 100 mT), c) próbka X (brak pola magnetycznego podczas sieciowania)

Dla próbki X, której sieciowanie odbywało się bez pola magnetycznego (rysunek. 3.15 c)) nie zaobserwowano wyraźnej struktury rozmieszczenia cząstek ferromagnetycznych. Należy więc stwierdzić, że charakteryzują się one przypadkowym rozkładem. Próbkę Y, poddaną działaniu pola magnetycznego o indukcji B = 100 mT, cechuje nieznaczne ukierunkowanie cząstek ferromagnetyka, co można zaobserwować na rysunku 3.15 b). Analiza rysunku 3.15 c) pozwala stwierdzić wyraźnie ukierunkowaną strukturę rozkładu cząstek widocznych jako jasne pola. Ich rozkład jest zgodny z kierunkiem pola magnetycznego działającego podczas sieciowania próbki.

3.2.1. Metodyka badań statycznych

Do wykonania zaplanowanych badań, zaprojektowano i zbudowano specjalistyczne stanowisko pomiarowe. Jako dane wejściowe do procesu projektowania, wykorzystano zbiór wniosków i uwag będących efektem badań wstępnych. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 3.16.



Rys. 3.16 Schemat stanowiska do badań; 1 – element przenoszący siłę nacisku, 2 – obudowa, 3 – badana próbka, 4 – cewka, 5 – podstawa

Obudowę 2 wraz z pokrywami, wykonano ze specjalnego stopu żelaza cechującego się dobrymi właściwościami magnetycznymi. Po obróbce mechanicznej, elementy obudowy poddano wyżarzaniu, celem uzyskania jednakowych właściwości w całym ich przekroju. Wewnątrz obudowy znajduje się cewka indukcyjna 4 wraz z próbką elastomeru magnetoreologicznego 3. Całość przytwierdzona jest do podstawy 5 wykonanej z niemagnetycznej stali austenitycznej. Zapewnia to zamknięcie przepływającego strumienia magnetycznego poprzez badaną próbkę. Celem określenia wartości indukcji magnetycznej wytwarzanej przez stanowisko, wyznaczono jego charakterystykę w funkcji parametrów zasilania. Zastosowano przy tym metodykę opisaną w rozdziale 3.1.1. Otrzymaną liniową charakterystykę, przedstawiono na rysunku 3.17.



Rys. 3.17 Zależność pomiędzy natężeniem prądu i indukcją magnetyczną stanowiska do badań

Maksymalne natężenie prądu zasilania było ograniczone uwarunkowaniami cieplnymi. Po przekroczeniu natężenia prądu o wartości I = 8 A, następuje wzrost temperatury cewki indukcyjnej, co wywołuje podgrzanie badanej próbki. Ten stan rzeczy uniemożliwiał prowadzenie dalszych pomiarów, ponieważ charakterystyki materiałów elastomerowych są silnie zależne od wartości temperatury. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.18.



Rys. 3.18 Schemat układu pomiarowego; 1 – czujnik siły, 2 – stanowisko pomiarowe, 3 – czujnik temperatury, 4 – przetwornik temperatury, 5 – zasilacz laboratoryjny, 6 – wzmacniacz pomiarowy, 7 – czujnik przemieszczenia, 8 – komputer

Maszyna wytrzymałościowa generuje wymuszenie w postaci przemieszczenia zgodnie z zadanymi parametrami. Do pomiaru wartości siły zastosowano czujnik 1 (C9C 1 kN firmy HBM). Poprawne przeprowadzenie próby ściskania wymaga współosiowości obciążenia i badanej próbki. Celem spełnienia tego warunku zastosowano dedykowany do wykorzystywanego czujnika zespół przenoszenia siły [91]. Do określenia wartości przemieszczenia wykorzystano czujnik przemieszczeń liniowych 7 (WA 20 mm firmy HBM). Cewka indukcyjna stanowiska badawczego jest zasilana napięciem o zadanej wartości z zasilacza laboratoryjnego 5. Kontrola temperatury układu przeprowadzana jest za pomocą sensora 3, współpracującego z przetwornikiem 4 wyposażonym w wyświetlacz. Wartości

zmierzonych przez czujniki sygnałów przekazywane są do wzmacniacza pomiarowego 6, który współpracuje z komputerem klasy PC 8. Wzmacniacz pomiarowy oraz komputer wyposażony w specjalistyczne oprogramowanie, stanowią wirtualny przyrząd pomiarowy. Pomiar siły i przemieszczenia oraz znajomość wymiarów badanej próbki pozwalają na wyznaczenie wartości naprężenia oraz odkształcenia.

Pomiary siły i przemieszczenia wykonywano początkowo bez zasilania, a następnie dla rosnących nastaw wartości indukcji magnetycznej. Dla statycznej próby ściskania wyznaczono po pięć krzywych dla każdego punktu pomiarowego, z których obliczono wartość średnią. Akwizycja danych odbywała się z częstotliwością f = 30 Hz. Badania wykonywano w temperaturze pokojowej. Próbki ściskano z prędkością v = 5 mm/min, do odkształcenia wynoszącego $\varepsilon = 30\%$. Powyżej tej wartości odkształcenia próbki ulegały zniszczeniu. Otrzymane w wyniku eksperymentu charakterystyki wykorzystano do obliczenia wartości współczynnika sprężystości E_s oraz zakresu jego zmian wywołanych polem magnetycznym. Zastosowano przy tym procedurę opisaną w rozdziale 3.1.1.

Wyniki badań statycznych

Zbiór otrzymanych wyników dla próbek X, Y, Z, przedstawiono na rysunkach 3.19 i 3.20, zmianę współczynnika sprężystości E_s w funkcji indukcji pola magnetycznego dla próbek X, Y, Z przedstawia rysunek 3.22, natomiast ich zestawienie zamieszczono w tabeli 3.4.



Rys. 3.20 Wyniki próby ściskania dla próbki Y



Rys. 3.21 Wyniki próby ściskania dla próbki Z



Rys. 3.22 Zmiana współczynnika sprężystości E_s w funkcji indukcji pola magnetycznego dla próbek X, Y, Z

	Próbk	a X	Próbk	a Y	Prół	oka Z
<i>B</i> [mT]	E_s [MPa]	R^2	E_s [MPa]	R^2	ΔE_s [MPa]	R^2
0	2,4609	0,9871	2,7419	0,9823	3,1285	0,9737
32	2,5174	0,9875	2,812	0,9792	3,1676	0,9718
64	2,6073	0,9875	2,8714	0,973	3,235	0,9648
95	2,6868	0,9881	2,9485	0,966	3,3214	0,9609
127	2,7516	0,9838	2,9762	0,9434	3,466	0,914
	ΔE_s [MPa]	ΔE_r [%]	ΔE_s [MPa]	ΔE_r [%]	ΔE_s [MPa]	ΔE_r [%]
	0,2907	11,812	0,2343	8,545	0,3375	10,788

Tab. 3.4 Zestawienie wyników badań dla próbek X, Y, Z

Na podstawie przestawionych danych można stwierdzić, że współczynnik sprężystości dla każdej z próbek wzrasta wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego. Z analizy otrzymanych wartości wynika że, wraz ze wzrostem pola magnetycznego podczas sieciowania próbek wzrasta początkowa wartość współczynnika sprężystości E_s . Jakość powstałej kolumnowej struktury cząstek ferromagnetycznych w kompozycie jest decydującym czynnikiem, ponieważ próbki nie różniły się pomiędzy sobą zawartością i rodzajem zastosowanych materiałów. Skala zachodzących zmian wrasta wraz ze wzrostem pola magnetycznego podczas sieciowania. Największą jednak zmianą względnego efektu

magnetoreologicznego cechuje się próbka X. Można to wytłumaczyć niższą wartością początkowego współczynnika sprężystości. Na szczególną uwagę zasługuje to, iż zmiana współczynnika sprężystości w funkcji indukcji pola magnetycznego jest liniowa. Jest to niezwykle korzystne, z punktu widzenia zarówno matematycznego opisu jak i praktycznego zastosowania materiałów z tej grupy.

3.3. Badania w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych

3.3.1. Metodyka wstępnych badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych

Następnym etapem prac było wykonanie badań quasi-statycznego cyklicznego ściskania. Odbywały się one w warunkach ciągłego, powtarzającego się obciążania i odciążania próbek siłą osiową z niewielką częstotliwością. Do badań tego typu wykorzystano aparaturę i układ pomiarowy przedstawione wcześniej w rozdziale 3.2.1. W celu wyboru najbardziej efektywnego składu próbek, przeprowadzono początkowo badania cykliczne dla każdego ich rodzaju. Ściskanie przeprowadzono dla wartości maksymalnego odkształcenia $\varepsilon = 30$ %, przy częstotliwości siły wymuszającej f = 0,04 Hz, dla rosnących parametrów pola magnetycznego. Pomiary odbywały się w temperaturze pokojowej. Próbki obciążano naprężeniem wstępnym, a dla każdej próby rejestrowano po pięć cykli obciążenie-odciążenie, z których następnie wyznaczono wartość średnią.

Jak pokazuje praktyka, w badaniach cyklicznych niezwykle istotna jest stabilizacja wykorzystywanych próbek. wpływem obciążania Pod elementów wykonanych z elastomeru, maleje wartość siły niezbędnej do uzyskania zadanego odkształcenia. W efekcie, podczas badań, wraz ze wzrostem liczby cykli maleje wartość amplitudy rejestrowanej siły. Zjawisko to nazywa się efektem Mullinsa [29]. Występuje ono w tworzywach polimerowych zawierających wypełniacze. Takie zachowanie materiału tłumaczy się odrywaniem cząsteczek wypełniacza od polimeru, który je otacza [35]. Po zaniku naprężeń, następuje częściowa odbudowa połączeń. Ponowne przyłożenie obciążenia powoduje dalsze rozwarstwianie się kompozytu. Po dostatecznie dużej ilości cykli, następuje stabilizacja mierzonej wartości siły maksymalnej. Jest to wynikiem zniszczenia większości połączeń pomiędzy polimerem i wypełniaczem. Zminimalizowanie wpływu opisanego zjawiska na wyniki badań wymaga określenia zmiany maksymalnej wartości siły w funkcji ilości cykli m. W tym celu zrealizowano badania cyklicznego obciążania z prędkością $v_{stab} = 0.5$ mm/s, do maksymalnego odkształcenia wynoszącego $\varepsilon = 30$ %. Wykorzystano w nich nowe, nie odkształcane wcześniej próbki. Zestawienie wyników pomiarów dla próbek X, Y, Z przedstawia rysunek 3.23.



Rys. 3.23 Wartość siły maksymalnej w funkcji ilości cykli dla próbek X, Y, Z

Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że zmiana amplitudy siły maleje w znacznym stopniu wraz ze wzrostem ilości cykli. Powyżej trzydziestego cyklu obciążenia spadek maksymalnej wartości siły, potrzebnej do odkształcenia badanego kompozytu, jest pomijalnie mały. Oczywistym staje się wpływ historii obciażenia na wyniki otrzymywane podczas badań cyklicznych. Celem minimalizacji wpływu opisanego zjawiska na rejestrowane dane, niezbędne było opracowanie odpowiedniego planu badań. Kolejne eksperymenty wykonywano w ściśle określonej kolejności. Dzięki temu każda z badanych próbek była odkształcana w identycznej kolejności – taką samą ilość razy, przy jednakowych wartościach częstotliwości wymuszenia, odkształcenia maksymalnego, oraz parametrach pola magnetycznego. Taki sposób gwarantuje możliwość określenia zmian właściwości materiału będących wynikiem działania pola magnetycznego z pominięciem historii obciążania. Przed każdą serią pomiarów, próbki wstępnie stabilizowano wykonując m = 50 cykli obciążenia z prędkością $v_{stab} = 5$ mm/min.

Próbki badano sterując profilem odkształcenia, który zarówno podczas stabilizacji jak i właściwego eksperymentu miał charakter trójkątny. Schematyczne przedstawienie zadanego profilu odkształcenia przedstawia rysunek 3.24



Rys. 3.24 Profil odkształcenia quasi-statycznego

Porównanie i wybór najefektywniejszego składu próbek wymaga określenia współczynników opisujących badany kompozyt. Za najbardziej istotne uznano: maksymalną wartość naprężeń σ_{max} , wartość energii rozproszonej W (praca tłumienia), wartość energii sprężystej ΔW (praca odkształcenia) oraz tłumienie względne ψ . Wymienione wielkości fizyczne można obliczyć z pola powierzchni pętli histerezy (rysunek 3.25) w cyklu obciążenie-

odciążenie. Wartość energii rozproszonej przedstawia się jako pole całej pętli histerezy W (pole zakreskowane poziomo). Wartość energii sprężystej ΔW to pole trójkąta A, B, C (pole zakreskowane pionowo). Jest on zdefiniowany za pomocą trzech odcinków. Są to: odcinek AB łączący minimalną i maksymalną wartość odkształcenia (przechodzący przez początek układu współrzędnych), odcinek BC równoległy do osi naprężeń, łączący maksymalne odkształcenia z odpowiadającym im punktem leżącym na pętli histerezy oraz część osi odkształceń domykającej pole trójkąta, którą zdefiniowano jako odcinek AC. Na podstawie wymienionych wartości można wyznaczyć tłumienie względne ψ . Współczynnik ten jest jednym ze wskaźników dyssypacji energii. Wymienione wartości można przedstawić za pomocą wzorów:

$$W = \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} \vec{\sigma} \, d\varepsilon - \int_{\varepsilon_{max}}^{\varepsilon_{min}} \vec{\sigma} \, d\varepsilon, \qquad (3.1)$$

$$\Delta W = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{max}} \int_0^{\varepsilon_{max}} \varepsilon \, d\varepsilon, \qquad (3.2)$$

$$\psi = \frac{\Delta W}{W},\tag{3.3}$$

gdzie: ε_{min} – najmniejsza wartość odkształcenia, ε_{max} – największa wartość odkształcenia, $\vec{\sigma}$ – zmiana naprężeń w przedziale od ε_{min} do ε_{max} , $\tilde{\sigma}$ – zmiana naprężeń w przedziale od ε_{max} do ε_{min} , σ_1 – naprężenie odpowiadające odkształceniu ε_{max} .



Rys. 3.25 Schematyczna pętla histerezy w cyklu naprężenie-odkształcenie dla ustabilizowanej próbki; opracowano na podstawie [118]

Wyniki wstępnych badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych

Zbiór przykładowych charakterystyk dla próbek X, Y, Z przedstawiono na rysunku 3.26. Otrzymane charakterystyki energii rozporoszonej i współczynnika tłumienia w funkcji indukcji pola magnetycznego zamieszczono na rysunkach 3.27 oraz 3.28.



Rys. 3.26 Przykładowe charakterystyki dla próbek X, Y, Z dla indukcji magnetycznej B = 127 mT



Rys. 3.27 Zmiana wartości energii rozproszonej w funkcji indukcji magnetycznej dla próbek X, Y, Z



Rys. 3.28 Zmiana tłumienia względnego w funkcji indukcji magnetycznej dla próbek X, Y, Z

Analiza wykresów przedstawionych na rysunku 3.26 pozwala zaobserwować położenie pętli histerezy dla różnych próbek. Jak wynika z otrzymanych danych położenie oraz kształt poszczególnych wykresów są zależne od rodzaju próbki, a więc sposobu ich wytwarzania. Najbardziej zbliżony do idealnej elipsy jest wykres dla próbki typu X. Wraz ze wzrostem wartości indukcji pola magnetycznego wzrastają pola powierzchni poszczególnych pętli histerezy. Dokładny przebieg tego zjawiska widoczny jest na rysunku 3.27. Zaobserwować można również wzrost wartości naprężeń maksymalnych σ_{max} dla każdej kolejnej próby. Należy więc stwierdzić, że wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego średnia wartość amplitudy naprężenia wzrasta. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że kąt nachylenia przekątnych otrzymanych pętli histerezy będzie zmienny. Jak wynika z wykresu (rysunek 3.28) wartość tłumienia względnego maleje wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego. Taki stan jest spowodowany wzrostem sztywności próbek pod wpływem działającego pola magnetycznego. Celem porównania poszczególnych próbek, zamieszczono obliczone wartości badanych wielkości fizycznych w tabeli 3.5.

	Próbka X	Próbka Y	Próbka Z
$\Delta \sigma_{max}$ [%]	0,215	0,579	1,047
<i>∆W</i> [%]	13,773	11,014	16,793
$\Delta(\Delta W)$ [%]	4,955	5,817	3,145
Δψ [%]	16,461	15,160	17,071

Tab. 3.5 Zestawienie wyników badań cyklicznych dla próbek X, Y, Z

Na podstawie otrzymanych wyników (tabele 3.4 oraz 3.5) można stwierdzić, że najbardziej efektywnym składem oraz metodami kształtowania cechują się próbki typu Z. W związku z tym, za najbardziej zasadne uważa się wykonanie szczegółowych badań tylko dla próbek tego rodzaju.

3.3.2. Metodyka badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych

Badania cykliczne próbek, wybranego wcześniej rodzaju, zostały przeprowadzone zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 3.3.1. Wykorzystano w tym celu stanowisko i układ pomiarowy opisany w rozdziale 3.2.1. Celem kompleksowego wyznaczenia właściwości badanych elastomerów magnetoreologicznych opracowano program badań dla czterech próbek typu Z. Próbki ściskano do maksymalnego odkształcenia wynoszącego kolejno $\varepsilon = 10\%$, 20%, 30%. Badania wykonano sterując profilem odkształcenia, zarówno podczas stabilizacji jak i właściwego eksperymentu miał on przebieg trójkątny. Częstotliwość wymuszenia wynosiła kolejno f = 0,04 Hz, 0,1 Hz, 0,25 Hz, 0,5 Hz. W pierwszym etapie, następowała stabilizacja próbek dla m = 50 cykli z prędkością $v_{stab} = 5$ mm/min. Celem przeprowadzenia pomiarów próbki obciążano naprężeniem wstępnym, a następnie wykonywano i rejestrowano po pięć cykli obciążania i odciążania z prędkością zależną od założonej częstotliwości wymuszenia, z których następnie wyznaczano wartość średnią. Pomiary wykonywano dla różnych wartości indukcji pola magnetycznego, kolejno B = 0 mT, 32 mT, 64 mT, 95 mT, 127 mT. Dalsze eksperymenty wykonywane były w ścisłej kolejności, tak aby każda próbka miała identyczną historię obciążania. Łącznie zarejestrowano 1200 pętli histerezy. Schemat programu badań zamieszczono na rysunku 3.29. Przedstawia on szczegółowo jedną próbę dla parametrów badania f = 0.04 Hz, $\varepsilon = 10$ %, B = 0 mT (brak pola magnetycznego).



Wyniki badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych

Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 3.30, natomiast zbiór wyznaczonych pętli histerezy przedstawia rysunek 3.31. Zestawienie pętli histerezy dla całego zakresu odkształcenia zamieszczono na rysunku 3.32.



Rys. 3.30 Przykładowe wyniki pomiarów dla próbki Z3, $\varepsilon = 30\%$, f = 0,1 Hz, B = 32 mT, m = 2



Rys. 3.31 Zbiór wyznaczonych pętli histerezy; $\varepsilon = 10$ %, f = 0,25 Hz



Rys. 3.32 Zestawienie pętli histerezy dla całego zakresu odkształcenia; f = 0,5 Hz, B = 127 mT

Z analizy wykresu przedstawionego na rysunku 3.30 wynika zmiana wartości naprężenia ściskającego σ oraz odkształcenia ε w funkcji czasu. Można zauważyć, że wartości szczytowe obydwu krzywych występują dla różnych wartości czasu. Nie są więc idealnie zgodne w fazie. Oznacza to, że badany materiał cechuje się właściwościami wiskoelastycznymi. Skalę zmian zachodzących w elastomerze magnetoreologicznym wywołana wpływem pola magnetycznego przedstawiają pętle histerezy zamieszczone na rysunku 3.31. Widoczny jest wyraźny wzrost kąta nachylenia przekątnych oraz pola powierzchni otrzymanych pętli histerezy w funkcji indukcji pola magnetycznego. Analiza charakterystyk przedstawionych na rysunku 3.32 pozwala stwierdzić, że zmiana maksymalnego odkształcenia badanej próbki powoduje zmianę kształtu krawędzi pętli histerezy. Im większe odkształcenie maksymalne, tym bardziej otrzymany wykres różni się od idealnej elipsy. Poszczególne części pętli histerezy charakteryzują się coraz większym stopniem progresywności, a przyrost naprężenia jest coraz bardziej nieliniowy względem odkształcenia. Dzieje się tak dlatego, że wraz ze wzrostem odkształcenia rośnie nierównomierność rozkładu naprężeń. Jest to związane z dużą podatnością materiału matrycy, a co za tym idzie, istotnymi zmianami przekroju próbek w wyniku działania obciążenia.

Uwagi końcowe

Wykonano szereg próbek elastomerów magnetoreologicznych różniących się składem oraz metodyką wytwarzania. Określono wymagania, zaprojektowano oraz skonstruowano stanowisko i układ pomiarowy.

- Wykorzystując dostępne na rynku materiały wykonano próbki izotropowego elastomeru magnetoreologicznego różniące się proporcjami zastosowanego wypełnienia ferromagnetycznego. Opisano je w pracy przy wykorzystaniu oznaczeń: próbka U oraz próbka W.
- Na podstawie zdobytego doświadczenia oraz dostępnej literatury określono wymagania dotyczące składu kompozytów, warunków procesu wytwarzania oraz parametrów kształtowania geometrii próbek.
- Wykorzystując zebraną wiedzę uzyskano szereg próbek o identycznym składzie, różniących się jednym z parametrów wytwarzania, to jest indukcją magnetyczną pola magnetycznego działającego podczas ich sieciowania. Opisano je w pracy przy wykorzystaniu oznaczeń: próbki X, próbki Y oraz próbki Z.

- Wykorzystując zebraną wiedzę określono szereg wymagań i założeń, na podstawie których skonstruowano i zbudowano oryginalne stanowisko pomiarowe. Przeprowadzono badania statyczne i cykliczne w warunkach obciążenia ściskającego. Zastosowanie odpowiedniego oprzyrządowania dało możliwość kontroli parametrów badań, takich jak: amplituda i prędkość odkształcenia oraz indukcji magnetycznej działającej na próbki podczas trwania eksperymentu.
- Zaprojektowano, dobrano elementy i wykonano układ pomiarowy umożliwiający akwizycję mierzonych sygnałów niosących informację o przemieszczeniach (ściśnięciu) oraz siłach jakim poddawane były próbki w trakcie badań. Na podstawie zmierzonych wielkości fizycznych wyznaczono wartości naprężenia oraz odkształcenia.
- Celem kontroli warunków w jakich przeprowadzano eksperymenty, stanowisko pomiarowe wyposażono w czujniki odpowiedzialne za pomiar temperatury układu.

Ostatecznie, należy stwierdzić że sformułowano metodykę i opracowano technologię wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych w zakresie wymaganym do przeprowadzenia badań materiałowych. W tym celu zastosowano również niezbędne metody badawcze.

Przeprowadzono wiele serii badań oraz wyznaczono szereg właściwości mechanicznych elastomerów magnetoreologicznych podczas prób statycznego i cyklicznego ściskania dla różnych parametrów amplitudy i prędkości odkształcenia oraz indukcji pola magnetycznego.

- Opracowano metodykę i przeprowadzono badania wstępne. Przedstawiono sposób wyznaczania współczynnika sprężystości podczas próby statycznego ściskania próbek W oraz U. Wykazano zmianę właściwości mechanicznych pod wpływem działania pola magnetycznego.
- Opracowano metodykę i przeprowadzono badania statyczne. Przedstawiono sposób wyznaczania współczynnika sprężystości podczas statycznego ściskania próbek X, Y oraz Z. Wykazano zmianę właściwości mechanicznych pod wpływem działania pola magnetycznego. Wykazano, że zachodzące zmiany cechują się dużą liniowością.
- Opracowano metodykę i przeprowadzono wstępne badania cykliczne. Przedstawiono sposób wyznaczania wartości naprężeń maksymalnych, wartości energii rozproszonej podczas jednego cyklu naprężenie-odkształcenie, oraz wartości tłumienia względnego.
- Na podstawie wyznaczonych współczynników dokonano analizy i oceny próbek X, Y, Z.
- Wykorzystano wymienione kryteria do wyboru próbek cechujących się najbardziej efektywnym składem oraz metodami kształtowania (próbki typu Z).
- Opracowano metodykę i przeprowadzono badania cykliczne. Przedstawiono sposób wyznaczania uśrednionych pętli histerezy. Wykazano w ten sposób zmianę właściwości wiskoelastycznych badanego materiału zależnych od zmian pola magnetycznego.
- Zbiór uzyskanych wyników stanowi podstawę do wyznaczenia współczynników reologicznych modeli materiałowych.

Ostatecznie, należy stwierdzić że wykazano istotność zaprojektowanego stanowiska i układu pomiarowego do badań zarówno statycznych jak i cyklicznych, w warunkach obciążenia ściskającego.

4. Modelowanie właściwości magnetoreologicznych

reologicznych

Wstęp

Kolejny etap prac dotyczy opisu matematycznego właściwości badanych materiałów. Istotnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniego modelu. Powinien on zapewniać dostatecznie dokładne odwzorowanie zaobserwowanych zjawisk zachodzących w elastomerach magnetoreologicznych pod wpływem pola magnetycznego.

Badany materiał kompozytowy stanowi elastomerowa matryca oraz rozproszone w niej cząsteczki ferromagnetyczne. Można założyć, że czysty elastomer charakteryzuje się właściwościami izotropowymi. Jego struktura molekularna jest podobna do gumy. Z tych względów zaproponowano wykorzystanie modelu, powszechnie stosowanego do opisu właściwości gumy na początkowym etapie rozważań teoretycznych. Przemawiają za tym również właściwości lepkosprężyste badanego kompozytu, co zostało wykazane w rozdziale 3. Uwzględniając powyższe przyjęto, iż pierwszy etap prac dotyczyć będzie weryfikacji opisu badanego typu elastomerów magnetoreologicznych za pomocą modelu Kelvina-Voigta. Z analizy literatury dotyczącej rozważanego zagadnienia wynika mnogość modeli matematycznych stosowanych do opisu materiałów tego rodzaju. Jednak zdecydowanie najczęściej stosowanym jest model Kelvina-Voigta. Nierzadko jest on dodatkowo modyfikowany, w celu uzyskania jak największej zbieżności wyników uzyskanych z eksperymentu i procesu modelowania. Dzięki takiemu wyborowi istnieje możliwość, przynajmniej ogólnego, porównania otrzymanych danych z wynikami opublikowanymi przez inne zespoły badawcze.

Drugim składnikiem kompozytu jest wypełnienie ferromagnetyczne. Wpływa ono znacząco na globalne właściwości kompozytu. Jak wykazano w poprzednich rozdziałach pracy, udział wypełniacza podnosi początkową wartość modułu sprężystości. Wzajemne oddziaływanie matrycy i cząsteczek ferromagnetycznych nie może być pominięte w rozważaniach teoretycznych. Z tego względu w drugim etapie prac podjęto uwzględnienie wpływu pola magnetycznego na ferromagnetyk, a w efekcie na cały materiał kompozytowy.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano również konieczność uwzględnienia wpływu zmian przekroju poprzecznego próbki zachodzących podczas odkształcania elastomeru. Zaproponowano modyfikację klasycznego modelu Kelvina-Voigta, w taki sposób, aby możliwe było matematyczne opisanie zaobserwowanych zjawisk. W kolejnym etapie prac, przeprowadzono analizę zaproponowanych modyfikacji, a następnie wyznaczono współczynniki modelu. W ostatniej części tego rozdziału skupiono się na prezentacji i analizie otrzymanych wyników oraz ich omówieniu.

4.1. Model Kelvina-Voigta

Model Kelvina-Voigta opisuje zachowanie się ciała liniowo lepkosprężystego. Parametry reologiczne takiego ciała są zależne od czasu. Model ten pozwala na jakościowy opis niektórych właściwości ciał stałych, które są wynikiem ich nieidealnej sprężystości. Można do nich zaliczyć: pętlę histerezy mechanicznej, zanikanie drgań swobodnych, opóźnienie sprężyste oraz pełzanie [41]. Model Kelvina-Voigta składa się z równoległego połączenia ciała doskonale sprężystego i płynu doskonale lepkiego. Struktura modelu oparta jest na module sprężystości podłużnej *E* oraz lepkość η . Schemat modelu Kelvina-Voigta przedstawia rysunek 4.1. Jego fizyczne równanie stanu przedstawia zależność (4.1).



Rys. 4.1 Schemat modelu ciała Kelvina-Voigta (lepkosprężystego)

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}. \tag{4.1}$$

Model Kelvina-Voigta może posłużyć do opisu pełzania. Zjawisko to charakteryzuje materiały lepkosprężyste. Jego przejawem jest postępujący w czasie przyrost deformacji podczas działania stałej wartości naprężenia. Matematyczny opis tego zjawiska, można zdefiniować całkując równanie (4.1), zakładając warunki początkowe (4.2).

$$\sigma(t) = \sigma_0 = const, \, \varepsilon(0) = \varepsilon_0. \qquad \text{dla } t = 0 \qquad (4.2)$$

Po scałkowaniu otrzymujemy:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E}\right) e^{-t\frac{E}{\eta}}.$$
(4.3)

Uwzględniając warunki początkowe odkształcenie opisuje równanie:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-t\frac{E}{\eta}} \right). \tag{4.4}$$

Zakładając, że $t \to \infty$, otrzymujemy $\varepsilon(t) \to \frac{\sigma_0}{E}$. Wynika z tego, że wartość odkształcenia zmienia się wraz z przyrostem czasu i dąży do stałej wartości. Prędkość odkształcenia jest zmienna i dąży do zera. Dodatkowo, można wprowadzić pojęcie czasu retardacji – t_r . Jest to czas po jakim odkształcenie osiągnie około 63% swojej całkowitej wartości. Podstawiając $t = \frac{E}{n} = t_r$, otrzymuje się:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-1}) \cong \frac{\sigma_0}{E} \cdot 0,63.$$
(4.5)

Funkcję nawrotu dla modelu lepkosprężystego po całkowitym odciążeniu w chwili $t = t_1$, można przedstawić jako:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(e^{-\frac{E}{\eta}t_1} - 1 \right) e^{-t\frac{E}{\eta}}.$$
(4.6)

Wykres obrazujący zachowanie się modelu Kelvina-Voigta dla rozważanego przypadku obciążenia przedstawia rysunek 4.2.



Rys. 4.2 Zachowanie się ciała lepkosprężystego obciążonego stałym naprężeniem; opracowano na podstawie [41]

Model Kelvina-Voigta nie opisuje zjawiska relaksacji. Poddanie ciała lepkosprężytego działaniu stałego odkształcenia nie powoduje zmian naprężenia wraz z przyrostem czasu.

Charakterystyczne dla tego modelu jest to, że funkcje odkształcenia i naprężenia nie są zgodne w fazie dla obciążeń harmonicznych. Jeżeli ciało Kelvina-Voigta poddamy działaniu odkształcenia $\varepsilon(t)$ danego funkcją sinusoidalnie zmienną, to wywołane nim naprężenie $\sigma(t)$ będzie przesunięte w fazie o kąt φ (rysunek 4.3). Kąt przesunięcia fazowego φ , jest również nazywany mechanicznym kątem stratności. Jest on, obok tłumienia względnego ψ , jednym ze współczynników służących do oceny dyssypacji energii w materiale [47].



Rys. 4.3 Wykres naprężenia i odkształcenia w funkcji czasu dla ciała Kelvina-Voigta przy wymuszeniu sinusoidalnie zmiennym

Szczegółową analizę modelu Kelvina-Voigta można przeprowadzić zakładając znany profil odkształcenia lub naprężenia. Zakładając, że odkształcenie ciała dane będzie równaniem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t), \tag{4.7}$$

to w takim przypadku jego pochodna będzie równa:

$$\dot{\varepsilon} = \omega \varepsilon_0 \cos(\omega t). \tag{4.8}$$

Odpowiedź rozpatrywanego materiału opisuje zatem równanie:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi). \tag{4.9}$$

Po zastosowaniu odpowiednich zależności trygonometrycznych, równanie (4.9) przyjmie postać:

$$\sigma = \sigma_0[\sin(\omega t)\cos\varphi + \cos(\omega t)\sin\varphi]. \tag{4.10}$$

Podstawiając zależności (4.7), (4.8) oraz (4.10) do równania (4.1) otrzymuje się:

$$\sigma_0[\sin(\omega t)\cos\varphi + \cos(\omega t)\sin\varphi] = E\varepsilon_0\sin(\omega t) + \eta\omega\varepsilon_0\cos(\omega t).$$
(4.11)

Porównując powyższe wyrażenie stronami, uzyskuje się układ równań:

$$\begin{cases} \sigma_0[\sin(\omega t)\cos\varphi] = E\varepsilon_0\sin(\omega t)\\ \sigma_0[\cos(\omega t)\sin\varphi] = \eta\omega\varepsilon_0\cos(\omega t). \end{cases}$$
(4.12)

Po uproszczeniu układu równań (4.12) przyjmuje on postać:

$$\begin{cases} \sigma_0 \cos \varphi = E\varepsilon_0 \\ \sigma_0 \sin \varphi = \eta \omega \varepsilon_0. \end{cases}$$
(4.13)

Ostateczna postać przekształconego układu jest następująca:

$$\begin{cases} E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi \\ \eta = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \sin \varphi \,. \end{cases}$$
(4.14)

Jak wynika z powyższych równań, współczynniki ciała Kelvina-Voigta *E* oraz η są zależne od kąta stratności φ . W celu wykorzystania zaproponowanego modelu niezbędne jest wyznaczenie wielkości fizycznych pozwalających na określenie jego wartości. Opisanie zdolności materiału do gromadzenia i rozpraszania energii wymaga wprowadzenia dwóch dodatkowych wielkości fizycznych. Są to: moduł zachowawczy *E'* (sprężystość), oraz moduł stratności *E''* (lepkość). Dokonując podstawienia:

$$E' = E \text{ oraz } E'' = \eta \omega, \tag{4.15}$$

można zapisać równanie (4.13) jako:

$$\begin{cases} \sigma_0[\sin(\omega t)\cos\varphi] = E'\varepsilon_0\sin(\omega t)\\ \sigma_0[\cos(\omega t)\sin\varphi] = E''\varepsilon_0\cos(\omega t). \end{cases}$$
(4.16)

W takim przypadku otrzymuje się:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi = E' \\ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi = E''. \end{cases}$$
(4.17)

Jak łatwo wykazać, zależność pomiędzy modułem zachowawczym i modułem stratności można przedstawić następująco:

$$tg(\varphi) = \frac{E''}{E'} = \frac{\eta}{E}\omega$$
 lub $\varphi = \arctan\frac{\eta}{E}\omega.$ (4.18)

Matematyczny zapis modelu Kelvina-Voigta można również przedstawić w uproszczonej postaci, wprowadzając pojęcie zastępczego modułu sprężystości E^* :

$$\sigma(t) = E^* \varepsilon_0 \sin(\omega t + \varphi). \tag{4.19}$$

Zastępczy moduł sprężystości w postaci zespolonej definiuje się za pomocą zależności:

$$E^* \equiv E' + iE'', \tag{4.20}$$

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}.$$
(4.21)

Wyznaczone współczynniki reologicznego modelu Kelvina-Voigta można zinterpretować graficznie za pomocą mechanicznej pętli histerezy. Ich wartości będą odpowiadać nachyleniu prostych które tworzą jej punkty charakterystyczne. Graficzną interpretację współczynników modelu Kelvina-Voigta przedstawia rysunek 4.4. Jak wynika z powyższych równań, zdefiniowanie współczynników analizowanego modelu wymaga wyznaczenia wartości kąta stratności φ . Można go obliczyć na podstawie wzajemnego przesunięcia rzeczywistych wykresów naprężenia i odkształcenia (rysunek 4.3). Istnieje możliwość określenia wartość kąta φ przy wykorzystaniu zależności (4.18) poprzez wyznaczenie wartości modułów *E'* i *E''*, na przykład, za pomocą reometru. Bezpośredni pomiar mechanicznej pętli histerezy pozwala również obliczyć poszukiwaną wartość wprost z jej punktów charakterystycznych lub pola powierzchni.



Rys. 4.4 Graficzna interpretacja współczynników modelu Kelvina-Voigta; opracowano na podstawie [41, 47, 95, 155]

Wartości modułów E' i E'' oraz funkcji kąta stratności $tg(\varphi)$ wykorzystuje się do oceny właściwości lepkosprężystych danego materiału. Jeżeli wyznaczone wartości $tg(\varphi)$ dla danego materiału są większe od jedności, oznacza to, że cechuje się on całkowicie lepkimi właściwościami. Dla takiego przypadku spełniona jest zależność E'' > E'. Zerowa wartość tangensa kąta stratności świadczy o tym, że rozpatrywane ciało jest idealnie sprężyste. W ostatnim możliwym przypadku zachodzi zależność $0 < tg(\varphi) < 1$. Taki materiał cechuje się dominacją właściwości sprężystych nad lepkimi. Obrazuje to nierówność zapisana w postaci E' > E''. Powstawanie pętli histerezy mechanicznej w materiale lepkosprężystym jest związane z nieodwracalną dyssypacją energii deformacji. Zachodzenie tego zjawiska tłumaczy się tarciem wewnętrznym [15, 41, 47].

4.2. Metodyka identyfikacji współczynników modelu Kevina-Voigta

niezbednych współczynników modelu Wyznaczenie wymagało opracowania odpowiedniej metodyki. Rozwiązanie modelu Kelvina-Voigta przedstawione w poprzednim rozdziale zakłada zadany profil odkształcenia opisanego funkcją sinusoidalnie zmienną. Jednak w przeprowadzonych badaniach, z racji na ich quasi-statyczny charakter, zastosowano profil odkształcenia o przebiegu trójkątnym (rysunek 3.24). Z tego względu nie było możliwe bezpośrednie wyznaczanie wartości kąta stratności φ na podstawie otrzymanych przebiegów. W związku z tym podjęto prace mające na celu wyznaczenie poszukiwanego współczynnika na podstawie punktów charakterystycznych otrzymanych petli histerezy. Przemawia za tym również to, iż zgodnie z wcześniejszymi obserwacjami otrzymane charakterystyki nie tworzą idealnej elipsy. Zaproponowano więc autorski algorytm pozwalający wyznaczyć wartość kąta φ . Sposób jego wyznaczania przedstawiono na rysunku 4.5, wykorzystując przy tym, jedną z rzeczywistych pętel histerezy.



Rys. 4.5 Zasada wyznaczania kąta stratności φ na podstawie punktów charakterystycznych rzeczywistej pętli histerezy

Metoda wyznaczania szukanej wartości opiera się na wyznaczeniu lokalnego układu współrzędnych, stanowiącego środek otrzymanej pętli, o początku w punkcie *C*. Zmierzona podczas eksperymentu pętla histerezy definiowana jest przy wykorzystaniu globalnego układu współrzędnych $\sigma - \varepsilon$. Wyznaczenie lokalnego układu współrzędnych $\sigma' - \varepsilon'$ wymaga jednoznacznego obliczenia położenia punktów *A*, *B*, *C*, *D*. W pierwszej kolejności program łączy poszczególne punkty pomiarowe, tworząc zamkniętą krzywą. Operacja ta odbywa się na zasadzie metody trapezów – jednej z numerycznych metod wyznaczania wartości całek oznaczonych. Algorytm wyznacza zbiory punktów $A_1, A_2, ..., A_n$ oraz $B_1, B_2, ..., B_n$ które powstają w wyniku przecięcia pętli histerezy prostymi równoległymi do osi ε . Następnie przeszukując powstały zbiór, wyznacza się położenie najdłuższego odcinka, zgodnie z warunkiem $|A_n B_n| \rightarrow max$. Punkty *E* i *D* wyznaczane są poprzez prostą równoległą do osi σ przechodzącą przez punkt $\varepsilon_0 / 2$. Znajomość położenia punktów *A*, *B*, *E*, *D* pozwala wyznaczyć punkt *C*. Dzieli on odcinek *AB* na połowę. Na podstawie wcześniejszych rozważań, można stwierdzić, iż długość odcinka *CB* dana jest znaną zależnością (rysunek 4.4):

$$\varepsilon_0 \sin \varphi = |CB| = \frac{1}{2} |AB|, \qquad (4.22)$$

skąd otrzymuje się:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{|AB|}{2\varepsilon_0}\right). \tag{4.23}$$

Wartości kąta stratności wyznaczono dla poszczególnych pętel histerezy. Jako estymator szukanej wartości przyjęto średnią wartość φ dla pięciu pomiarów. Jako błąd obliczonej wartości zdefiniowano odchylenie standardowe z średniej arytmetycznej. Na tej podstawie można obliczyć pozostałe współczynniki modelu Kelvina-Voigta zgodnie ze wzorami (4.14). Należy jednak mieć na uwadze ważną konsekwencję wynikającą z zaproponowanej metody. Jest ona skutkiem zastosowania zależności będących wynikiem rozwiązania modelu Kelvina-Voigta przy założeniu zadanego profilu odkształcenia o funkcji sinusoidalnie zmiennej. Zaproponowany sposób wyznaczania wartości kąta φ wynika z rzeczywistych zależności otrzymanych w wyniku pomiarów. Odnosi się on jednak w istocie do pewnej funkcji sinusoidalnie zmiennej. Przy tym, nie jest to funkcja sinus stanowiąca przybliżenie wykorzystywanej funkcji trójkątnej. Jest to funkcja odpowiadająca wartościami kąta φ , pod względem: pola powierzchni i punktów charakterystycznych pętli histerezy, zastosowanej funkcji trójkątnej (zadana funkcja przemieszczenia). Przedstawiona metoda zakłada wprowadzenie pewnego przybliżenia. Poprawność tak przyjętego uproszczenia jest omówiona w dalszej części pracy. Algorytm wyznaczania wartości kąta φ przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.6 Algorytm metody wyznaczania wartości kąta stratności φ

Wyniki identyfikacji współczynników modelu Kelvina-Voigta

Zgodnie z przedstawioną metodyką wyznaczono wartości kąta stratności φ dla wszystkich wykonanych prób. W kolejnym etapie prac poddano analizie wpływ poszczególnych wielkości definiujących charakter wymuszenia na zbiór otrzymanych wyników. Rysunki od 4.7 do 4.9 przedstawiają wartości kąta stratności φ jako funkcję indukcji magnetycznej *B* dla przeprowadzonych prób. Ponadto na rysunku 4.9 zaprezentowano regresję liniową otrzymanych danych dla wybranych prób. Zestawienie wartości współczynnika determinacji R^2 oraz maksymalnej skali zmian kąta stratności $\Delta \varphi_{max}(B)$ w zależności od indukcji magnetycznej *B* przedstawiono w tabeli 4.1.



Rys. 4.7 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji indukcji magnetycznej $B, \varepsilon = 10\%$



Rys. 4.8 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji indukcji magnetycznej B, $\varepsilon = 20\%$



Rys. 4.9 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji indukcji magnetycznej B, $\varepsilon = 30\%$

Tab. 4.1 Zestawienie wartości współczynnika determinacji R^2 oraz maksymalnego zakresu zmian kąta stratności $\Delta \varphi_{max}(B)$ w zależności od indukcji magnetycznej

-						
	$\varepsilon = 30\%$		$\varepsilon = 20\%$		$\varepsilon = 10\%$	
<i>f</i> [Hz]	R^2	$\Delta \varphi_{max}(B)$ [%]	R^2	$\Delta \varphi_{max}(B)$ [%]	R ²	$\Delta \varphi_{max}(B)$ [%]
0,04	0,872	18,17	0,843	12,53	0,990	14,92
0,1	0,958	7,58	0,937	14,91	0,996	21,45
0,25	0,887	7,53	0,918	10,04	0,998	21,95
0,5	0,899	11,92	0,911	17,45	0,951	27,63

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że wartość kąta stratności φ zmienia się wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej *B* działającej na badane próbki. Zaobserwowane zjawisko wynika z oddziaływań pomiędzy cząsteczkami ferromagnetyka wewnątrz kompozytu. Wynikają one z działania pola magnetycznego i są zależne od jego natężenia. Zachodząca zmiana ma charakter liniowy. Jakość odwzorowania otrzymanych wyników opisuje wartość współczynnika determinacji R^2 . W związku z tym, że wartości współczynnika R^2 są bliskie jedności, należy stwierdzić bardzo dobre liniowe odwzorowanie. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że nie jest ona tak bliska jedności dla wyników prób cyklicznych, jak dla wyników w próbach statycznych (tabela 4.1 oraz 4.2). Może to świadczyć o wpływie właściwości lepkich na zmianę wartość kąta stratności. Największa odnotowana skala zmian kąta stratności w zależności od indukcji magnetycznej $\Delta \varphi_{max}(B)$ wynosi 27,63%.

Rysunki od 4.10 do 4.12 przedstawiają zmianę wyznaczonych wartości kąta stratności φ jako funkcję całkowitego odkształcenia ε podczas próby. Na rysunku 4.11 przedstawiono liniową regresję otrzymanych danych dla wybranych prób. Tabela 4.2 przedstawia zestawienie wartości współczynnika determinacji R^2 oraz maksymalnej skali zmian kąta stratności $\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$ w zależności od odkształcenia ε .



Rys. 4.10 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji odkształcenia ε , B = 0 mT



Rys. 4.11 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji odkształcenia ε , B = 64 mT



Rys. 4.12 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji odkształcenia ε , B = 127 mT
	f = 0.04 Hz		f = 0,1 Hz		f	F = 0,25 Hz	f = 0.5 Hz		
<i>B</i> [mT]	R^2	$\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$ [%]	R^2	$\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$ [%]	R^2	$\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)[\%]$	<i>R</i> ²	$\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$ [%]	
0	0,996	47,88	0,998	35,89	0,982	30,49	0,882	14,68	
32	0,995	46,98	0,999	41,68	0,985	33,44	0,916	15,73	
64	0,997	53,43	0,997	45,08	0,999	36,74	0,944	22,28	
95	0,999	50,52	0,996	47,96	0,999	42,79	0,973	22,03	
127	0,972	43,81	0,998	53,41	0,997	47,98	0,994	30,78	

Tab. 4.2 Zestawienie wartości współczynnika determinacji R^2 oraz maksymalnej skali zmian kąta stratności $\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$ w zależności od odkształcenia

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że wartość kąta stratności φ zmienia się wraz ze wzrostem odkształcenia ε jakiemu poddawany jest kompozyt. Przyczyn tego zjawiska należy doszukiwać się w znacznych zmianach przekroju poprzecznego jakich doznają walcowe próbki elastomeru magnetoreologicznego obciążonego siłą osiową. Są one efektem działania siły ściskającej pod wpływem której, próbka zmienia swój kształt z walcowatego na baryłkowaty. Takie zachowanie się materiału wynika z działania sił tarcia pomiędzy powierzchniami próbki oraz elementów utwierdzających i przekazujących obciążenie, których nie da się całkowicie wyeliminować. Skutkuje to nierównomiernym rozkładem naprężeń, co znacząco wpływa na zewnętrzne właściwości badanego materiału. Zestawienie widoku obciążonej i nieobciążonej próbki przedstawia rysunek 4.13.



Rys. 4.13 Widok walcowych próbek użytych do badań; a) próbka poddana odkształceniu $\varepsilon = 20\%$, b) nieodkształcona próbka

Jak wynika z otrzymanych danych, dla zastosowanego przedziału odkształceń ($\varepsilon \leq 30\%$), zachodząca zmiana ma charakter liniowy. Największa odnotowana zmiana kąta stratności, w zależności od indukcji magnetycznej $\Delta \varphi_{max}(\varepsilon)$ wynosi 53,43%.

Rysunki od 4.14 do 4.16 przedstawiają zmianę wyznaczonych wartości kąta stratności φ jako funkcję częstotliwości wymuszenia f podczas próby. Na podstawie dostępnej literatury przewiduje się zmianę modułów dynamicznych wraz ze zmianą częstotliwości. Sztywność usieciowanych materiałów elastomerowych wykazuje tendencję wzrostową wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia [118, 155]. Na podstawie otrzymanych wyników nie można jednak jednoznacznie zdefiniować charakteru zachodzących zmian. Analiza zamieszczonych wykresów pozwala zauważyć, iż zmiana kąta stratności φ w funkcji częstotliwości f ma charakter przemienny i oscyluje wokół pewnej średniej wartości. Takie zachowanie się kompozytu może być spowodowane niewielkimi wartościami stosowanych częstotliwości wymuszenia ($f \leq 0.5$ Hz). Na rysunku 4.16 pokazano położenie poszczególnych wyznaczonych wartości kąta stratności względem obliczonych średnich $\varphi_{sr_1}, \varphi_{sr_2}, \varphi_{sr_3}$. Tabela 4.3 przedstawia zestawienie średniej wartości $\varphi_{sr}(f)$ oraz maksymalnej skali zmian kąta stratności średniej kąta stratności w zależności od częstotliwości wymuszenia. Największe odchylenie od wartości średniej kąta stratności w zależności od częstotliwości wymuszenia. Sajwiększe odchylenie od wartości średniej kąta stratności w zależności od częstotliwości wymuszenia.



Rys. 4.14 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji częstotliwości wymuszenia, $\varepsilon = 30\%$



Rys. 4.15 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji częstotliwości wymuszenia, $\varepsilon = 20\%$



Rys. 4.16 Zbiór otrzymanych wartości kąta stratności φ w funkcji częstotliwości wymuszenia, $\varepsilon = 10\%$

	Е	= 30%	ε	= 20%	$\varepsilon = 10\%$		
<i>B</i> [mT]	$\varphi_{sr}(f)$	$\Delta \varphi_{sr}(f)$ [%]	$\varphi_{sr}(f)$	$\Delta \varphi_{sr}(f)$ [%]	$\varphi_{sr}(f)$	$\Delta \varphi_{sr}(f)$ [%]	
0	0,244	5,91	0,286	1,29	0,322	8,80	
32	0,253	8,31	0,302	2,10	0,338	5,85	
64	0,258	8,92	0,314	3,50	0,358	4,81	
95	0,264	6,69	0,319	1,81	0,371	5,08	
127	0,272	6,51	0,325	4,58	0,390	3,22	

Tab. 4.3 Zestawienie średniej wartości $\varphi_{sr}(f)$ oraz maksymalnej skali zmian kąta stratności $\Delta \varphi_{sr}(f)$ w zależności od częstotliwości

4.3. Weryfikacja modelu Kelvina-Voigta

W celu weryfikacji zaproponowanego modelu materiałowego, obliczono jego współczynniki *E'* oraz *E''* na podstawie wzorów (4.17) oraz wyznaczonych wartości kąta stratności φ . Dzięki temu możliwe było wyznaczenie pętli histerezy będących wynikiem rozwiązania modelu Kelvina-Voigta oraz porównanie ich z pętlami otrzymanymi podczas badań empirycznych. Rysunki 4.17 i 4.18 przedstawiają przykładowe wartości wyznaczonych wartości modułu zachowawczego *E'* oraz modułu stratności *E''*.



Rys. 4.17 Moduł zachowawczy E' w funkcji indukcji magnetycznej B dla różnych wartości częstotliwości f, $\varepsilon = 20\%$



Rys. 4.18 Moduł stratności E'' w funkcji indukcji magnetycznej B dla różnych wartości częstotliwości f, $\varepsilon = 20\%$

Na podstawie otrzymanych zależności można stwierdzić, że przyrost modułu *E'* wywołany polem magnetycznym, jest znacznie większy niż wahania jego wartości w funkcji częstotliwości wymuszenia. Identyczną zależność można zaobserwować dla współczynnika *E''*. Ostatecznie można stwierdzić, że zdolność materiału do gromadzenia energii, przedstawiona za pomocą modułu zachowawczego rośnie wraz ze wzrostem pola magnetycznego. Ten sam związek zachodzi dla ilości energii dyssypowanej podczas jednego cyklu obciążanie-odciążanie, co wyraża zmiana wartości modułu stratności.

Zestawienie otrzymanych wyników oraz wybranych danych z prac różnych autorów przedstawia tabela 4.4. Do przedstawionych danych odnoszą się takie same uwagi, jak przytoczone w rozdziale 2.5, dotyczące eksperymentów przeprowadzanych w innych warunkach obciążenia. Jak wynika z przedstawionego porównania, otrzymane w efekcie badań własnych wartości znajdują się w przedziale wartości wyznaczonych przez innych badaczy i zamieszczonych w literaturze. Można również odnotować bardzo dużą różnorodność stosowanych materiałów i warunków, w których wykonywano badania.

Tab. 4.4 Wybrane parametry badań i wyznaczone właściwości elastomerów magnetoreologicznych w warunkach ściskania; I – materiał matrycy, II – rodzaj cząsteczek ferromagnetycznych, III – wielkość cząstek ferromagnetycznych [µm], IV – zawartość ferromagnetyka [%], V – pole magnetyczne przy sieciowaniu, VI – częstotliwość wymuszenia *f* [Hz], VII – zastosowane podczas badań pole magnetyczne, VIII – odkształcenie γ [%], IX – moduł zachowawczy *E'* [MPa], X – maksymalna zmiana modułu zachowawczego $\Delta E'$ [MPa], XI – współczynnik sprężystości *k* [kN/m], XII – maksymalna zmiana współczynnika sprężystości Δk [kN/m], XIII – źródło

Ι	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
poliuretan, elastomery uretanowe i uretanowo- mocznikowe	żelazo karbo- nylkowe	6÷9	11,5 vol	240 [kA/m]	10	480 [kA/m]	10	-	0,75	-	-	[18]
guma silikonowa	proszek żelaza	5	60 wt	0,5 [T]	36	0,15 [T]	0,1	0,0186	-	-	-	[119]
Poli(dimetylo- siloksan) (PDMS)	proszek tlenku żelaza	8,4	3,5 wt	-	100	brak	0,5	0,81	-	-	-	[128]
poliuretan	żelazo karbo- nylkowe	7÷9,5	27 vol	0,55÷0,61 [T]	-	0,7 [T]	50	7,24	2,58	-	-	[81]
silikon dwuskładni- kowy	żelazo karbo- nylkowe	2÷8	70 wt	1 [T]	-	1,8 [T]	0,2	1,4	0,35	-	-	[63]
poliuretan	żelazo karbo- nylkowe	6÷9	33 vol	0,3 [T]	0,04	0,13 [T]	10	3,9	0,96	-	-	własne
dwuskładni- kowy kauczuk silikonowy	żelazo karbo- nylkowe i tlenek żelaza	2,5 i 0,2	30 wt	0,4 [T]	-	0,4 [T]	-	0,55	0,31	-	-	[56]
poliuretan	żelazo karbo- nylkowe	3,8÷5,3	27 vol	0,5 [T]	-	0,56 [T]	15	5,9	1,6	146	37	[66]
silikon	żelazo	5	30 vol	0,8÷1 [T]	15	0,35 [T]	-	-	-	1020	90	[85]

Rysunek 4.19 przedstawia rodzinę pętli histerezy dla wszystkich nastaw wartości indukcji pola magnetycznego. Analiza otrzymanych charakterystyk pozwala zauważyć zbliżone przyrosty kąta nachylenia poszczególnych pętli histerezy. Wynika to z dużej liniowości otrzymanych wartości kąta stratności w funkcji indukcji magnetycznej. Rysunki 4.20 oraz 4.21 przedstawiają zestawienie wyników eksperymentu i modelowania dla wybranych prób. Analiza charakterystyk przedstawionych na rysunku 4.20 pozwala stwierdzić, że pomimo pewnych różnic odwzorowanie rzeczywistego przebiegu przy wykorzystaniu modelu Kelvina-Voigta dla małej wartości odkształcenia jest na dobre.

Pozwala to stwierdzić, że założenia upraszczające dotyczące metodyki wyznaczania kąta stratności φ , na podstawie otrzymanych przebiegów omówione w rozdziale 4.3, są poprawne. Autorska metoda wyznaczania współczynników modelu Kelvina-Voigta na podstawie charakterystycznych punktów pętli histerezy wykazuje przydatność podczas jej stosowania z wykorzystaniem zadanego profilu odkształcenia opisanego funkcją trójkątną.

Różnice pomiędzy wyznaczonymi i zarejestrowanymi charakterystykami zwiększają się wraz ze wzrostem amplitudy odkształcenia. Skrajny przypadek przedstawiono na rysunku 4.21. Nasuwa się więc wniosek, że zmiana rozkładu naprężeń w badanym kompozycie, wywołana wpływem amplitudy nie może być pominięta. Model lepkosprężysty nie uwzględnia usztywniania się materiału, wynikającego ze zmian jego przekroju wywołanych przyłożonym obciążeniem. Należy więc stwierdzić, że klasyczny model Kelvina-Voigta nie nadaje się do opisu badanego kompozytu.



Rys. 4.19 Otrzymane w wyniku modelowania pętle histerezy, $\varepsilon = 10\%$, f = 0.25 Hz



Rys. 4.20 Zestawienie wyników eksperymentu i modelowania, $\varepsilon = 10\%$, f = 0.04 Hz



Rys. 4.21 Zestawienie wyników eksperymentu i modelowania, $\varepsilon = 30\%$, f = 0.04 Hz

4.4. Zmodyfikowany model Kelvina-Voigta

W poprzednim rozdziale wykazano konieczność wyboru innego, badź zmodyfikowania przyjętego, modelu reologicznego. Za kluczowe uznano uwzględnienie wpływu progresywnej ściskanego charakterystyki elastomeru magnetoreologicznego oraz wpływu pola magnetycznego na wartość naprężeń. Wykonane badania miały charakter quasi-statyczny. Zastosowano częstotliwości z przedziału nie przekraczającego f = 0.5 Hz. Na podstawie otrzymanych wyników nie ma możliwości jednoznacznej oceny wpływu tego współczynnika na otrzymywane wyniki. Jak wykazano w poprzednim rozdziale, uśrednienie wartości kąta stratności przedstawionego jako funkcja częstotliwości, skutkuje odchyleniem od średniej nie przekraczającym 9%. Mając na uwadze wymienione czynniki, wpływ częstotliwości wymuszenia zostaje pominięty.

Analizując rozważania teoretyczne zamieszczone w pracy [118] stwierdzono, że istnieje możliwość zastosowania zawartych w niej wytycznych dotyczących obliczania elementów gumowych. Wpływ wartości odkształcenia na utwardzanie się badanych próbek można uwzględnić wykorzystując potencjał wysokoelastyczny W_e , przy założeniu, że materiał osnowy kompozytu jest nieściśliwy. Oznacza to, że zachowuje on niezmienną objętość niezależnie od przyłożonego stanu naprężenia. Z tak przyjętego założenia wynika, że w rozpatrywanym przypadku liczba Poissona wynosić będzie $\nu = 0,5$. Różnice w kierunkowych właściwościach fizycznych elastomeru są mniejsze niż dokładność wykonywanych obliczeń, toteż na potrzeby dalszej analizy przyjmuje się, że materiał osnowy cechuje się izotropią [118].

Rzeczywiste naprężenie w rozciąganej próbce σ_{rr} można zdefiniować jako stosunek siły rozciągającej F_r do rzeczywistego pola przekroju A_r :

$$\sigma_{rr} = \frac{F_r}{A_r}.$$
(4.24)

W związku z trudnościami związanymi z pomiarem rzeczywistego pola przekroju próbki podczas wykonywania eksperymentu, w praktyce inżynierskiej wykorzystuje się umowną wartość naprężeń σ_r zdefiniowaną za pomocą początkowego pola powierzchni *A*:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A}.\tag{4.25}$$

Wykorzystując rzeczywistą i początkową długość próbki można zapisać związek:

$$A_r l_r = A l_0. aga{4.26}$$

Wprowadzając stopień deformacji λ jako stosunek długości rzeczywistej l_r do długości początkowej l_0 otrzymuje się:

$$A_r = A \frac{l_0}{l_r} = \frac{A}{\lambda}.$$
(4.27)

Wykonując podstawienie zależności (4.25) oraz (4.27) do wzoru (4.24) można wyznaczyć zależność wiążącą naprężenia rzeczywiste σ_{rr} i umowne σ_r :

$$\sigma_{rr} = \sigma_r \lambda. \tag{4.28}$$

Przyjmując wartości λ_1 , λ_2 , λ_3 jako stopnie odkształceń, w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, można zapisać wartość potencjału wysokoelastycznego jako zależność:

$$W_e = \frac{1}{2} NkT (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3).$$
(4.29)

Występujący w wyrażeniu (4.29) iloczyn można uprościć uwzględniając, że:

$$G = NkT. (4.30)$$

Rozpatrując jednoosiowy stan obciążenia materiału (na przykład rozciąganie), który przedstawiono na rysunku 4.22, można zapisać:



Rys. 4.22 Model jednoosiowego rozciągania próbki elastomerowej; opracowano na podstawie [118]

Po wstawieniu równań (4.30) oraz (4.31) do wyrażenia (4.29), otrzymuje się:

$$W_e = \frac{1}{2} G\left(\frac{\lambda^3 - 3\lambda + 2}{\lambda}\right). \tag{4.32}$$

Zależność wiążącą naprężenie i odkształcenie można otrzymać z warunku:

$$\sigma_r = \frac{\partial W_e}{\partial \lambda} = G\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right). \tag{4.33}$$

Podstawiając równanie (5.28) do wyrażenia (5.33), otrzymuje się:

$$\sigma_{rr} = G\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right). \tag{4.34}$$

Stopień deformacji λ można również przedstawić jako zależność:

$$\lambda = \varepsilon + 1. \tag{4.35}$$

Jeżeli wartość stopnia deformacji λ jest bliska jedności, to w wyrażeniu (4.35) wartość ε jest bardzo mała. Według [118] do obszaru dużych odkształceń zalicza się stopień deformacji

mieszczący się w przedziale $\lambda \in (1,75 \div 3,75)$. W analizowanym przypadku, w wykonanych badaniach doświadczalnych, maksymalna wartość stopnia deformacji wynosiła $\lambda \le 1,3$. Przyrównując równania (4.34) oraz (4.28), po uprzednim podstawieniu do nich zależności (4.35), otrzymuje się:

$$\sigma_r = \frac{3G\varepsilon}{(1+2\varepsilon+\varepsilon^2)}.$$
(4.36)

Wykorzystując teorię sprężystości można zapisać dla materiału izotropowego następującą zależność:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1. \tag{4.37}$$

Wykorzystując założony wcześniej warunek nieściśliwości, dla wartości $\nu = 0.5$ równanie (4.37) upraszcza się do poniższej postaci:

$$E = 3G. \tag{4.38}$$

W równaniu (4.36) odrzuca się człony wyższego rzędu jako pomijalnie małe (ze względu na niewielką wartość odkształcenia). Następnie dokonując podstawienia wyrażenia (4.38) do równania (4.36), otrzymuje się wyrażenie na naprężenia rozciągające:

$$\sigma_r \approx \frac{E\varepsilon}{1+2\varepsilon}.$$
(4.39)

Analogiczny tok rozważań można przedstawić dla naprężeń ściskających, tak więc równanie (4.39) ostatecznie przyjmuje postać:

$$\sigma_{r/s} \approx \frac{E\varepsilon}{1\pm 2\varepsilon'} \tag{4.40}$$

gdzie: znak "+" obowiązuje w przypadku naprężeń rozciągających σ_r , natomiast znak "–" w przypadku naprężeń ściskających σ_s . Zestawienie wyników otrzymanych przy wykorzystaniu równania (4.40) oraz prawa Hooke'a przedstawia rysunek 4.23.



Rys. 4.23 Wykres stanu naprężeń dla prostych przypadków odkształcania elementu elastomerowego; opracowano na podstawie [118]

Jak wynika z zamieszczonych rozważań, dla określonych założeń oraz ograniczonego przedziału odkształcenia, możliwe jest uwzględnienie progresywnej charakterystyki ściskanego elementu elastomerowego wynikającej z nierównomiernego rozkładu naprężeń.

Na podstawie przedstawionych równań, dokonano modyfikacji reologicznego modelu ciała lepkosprężystego. Do równania (4.1) wprowadzono zmiany pozwalające na kształtowanie charakterystyk naprężeniowych. Wykorzystując równanie (4.40) uzależniono wartość

występującej w modelu sztywności od pola magnetycznego oraz odkształcenia. Niech dana będzie funkcja:

$$E_{mod} = f(B,\varepsilon), \tag{4.41}$$

szczegółowo przedstawiona jako:

$$E_{mod} = \frac{pE}{1 - q\varepsilon'} \tag{4.42}$$

gdzie: *p* oraz *q* to współczynniki kształtu pętli histerezy.

Niech wartości p, q oraz E będą funkcją indukcji magnetycznej B. Dzięki tak zmodyfikowanemu modelowi istnieje możliwość uwzględniania wpływu pola magnetycznego oraz odkształcenia na wyznaczaną wartość naprężeń. Równanie (4.1) przyjmie więc postać:

$$\sigma = E_{mod}\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}. \tag{4.43}$$

Schemat zmodyfikowanego modelu ciała Kelvina-Voigta przedstawia rysunek 4.24.

Rys. 4.24 Schemat zmodyfikowanego modelu ciała Kelvina-Voigta (lepkosprężystego)

Szczegółową analizę zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta można przeprowadzić zakładając znany profil odkształcenia lub naprężenia. Mając na uwadze przekształcenia przedstawione w rozdziale 4.1, po uwzględnieniu równań (4.41-4.43) można sformułować zależność:

$$\sigma(t) = \frac{p}{1 - q\varepsilon_0 \sin(\omega t)} \cdot E\varepsilon_0 \sin(\omega t) + \eta \omega \varepsilon_0 \cos(\omega t).$$
(4.44)

Współczynnik p może przyjmować dowolne wartości. Natomiast współczynnik q powinien spełniać zależność zdefiniowaną jako:

$$1 - q\varepsilon_0 \sin(\omega t) \neq 0, \tag{4.45}$$

dla całego zakresu jaki wynika z funkcji sinus. Jest to funkcja okresowo zmienna i w ogólnym przypadku może przyjmować wartości dodatnie (dla ściskania) oraz ujemne (dla rozciągania). Warunek (4.45), można więc przedstawić jako zależność:

$$\pm \varepsilon(t) \neq \frac{1}{q'},\tag{4.46}$$

co z kolei pozwala wyznaczyć przedział wartości współczynnika q, zdefiniowany jako zależność:

$$q \in \left(-\frac{1}{\varepsilon_0}; \frac{1}{\varepsilon_0}\right). \tag{4.47}$$

W celu przeprowadzenia analizy wpływu poszczególnych parametrów na przebieg naprężenia wyznaczono szereg krzywych dla różnych wartości współczynników p oraz q. Rysunek 4.25

przedstawia porównanie charakterystyk naprężenia w funkcji czasu dla wybranych wartości pozostałych współczynników zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta. W celach poglądowych zamieszczono również przebieg otrzymany z klasycznego modelu lepkosprężystego. Rysunek 4.26 przedstawia zestawienie otrzymanych, w analogiczny sposób, pętli histerezy.



Rys. 4.25 Zestawienie charakterystyk naprężenia w funkcji czasu dla rożnych wartości współczynnika q zmodyfikowanego oraz klasycznego modelu Kelvina-Voigta; charakterystyki wyznaczono wykorzystując poszczególne stałe o następujących wartościach: f = 0.05 Hz, E = 3.5 MPa, $\eta = 2.6$ MPa/s, $\varepsilon_0 = 0.3$ oraz p = 1



Rys. 4.26 Zestawienie pętli histerezy dla różnych wartości współczynnika q zmodyfikowanego oraz klasycznego modelu Kelvina-Voigta; charakterystyki wyznaczono wykorzystując poszczególne stałe o następujących wartościach: f = 0.05 Hz, E = 3.5 MPa, $\eta = 2.6$ MPa/s, $\varepsilon_0 = 0.3$ oraz p = 1

Z analizy zamieszczonych wykresów wynika, że wzrost wartości współczynnika *q* powoduje wzrost wartości naprężenia niezbędnego do wywołania takiego samego odkształcenia. Zmiana znaku współczynnika *q* powoduje zmianę charakterystyki modelowanego materiału. Dla wartości dodatnich otrzymuje się charakterystykę progresywną, natomiast dla wartości ujemnych – degresywną. Warto również zwrócić uwagę na to, że dla przemiennego przebiegu odkształcenia, pętle histerezy cechuje symetria względem osi rzędnych. Wpływ wartości współczynnika *q* na wyznaczaną wartość naprężeń przedstawiono na rysunku 4.27. Rysunek 4.28 przedstawia przyrost maksymalnych naprężeń (amplitudy naprężenia) w funkcji współczynnika q. Z uwagi na występującą symetrię ograniczono się do wyznaczenia wyników tylko dla charakterystyki progresywnej.



Rys. 4.27 Wpływ wartości współczynnika q na wyznaczaną wartość naprężeń; charakterystyki wyznaczono wykorzystując poszczególne stałe o następujących wartościach: f = 0,05 Hz, E = 3,5 MPa, $\eta = 2,6$ MPa/s, $\varepsilon_0 = 0,3$ oraz p = 1



Rys. 4.28 Przyrost amplitudy naprężenia w funkcji wartości współczynnika q; charakterystyki wyznaczono wykorzystując poszczególne stałe o następujących wartościach: f = 0.05 Hz, E = 3.5 MPa, $\eta = 2.6$ MPa/s, $\varepsilon_0 = 0.3$ oraz p = 1

Jak wynika z analizy zamieszczonych danych zaproponowana modyfikacja modelu cechuje się charakterystycznymi właściwościami. Im bardziej współczynnik q zbliża się do wartości granicznej:

$$q \to \pm \frac{1}{\varepsilon_0},\tag{4.48}$$

tym wyznaczona wartość naprężeń jest większa. Przyrost wartości naprężeń dąży do nieskończoności, zbliżając się asymptotycznie do prostej, której równanie wynika z zależności (4.48). Wpływ wartości współczynnika p na otrzymywane charakterystyki przeanalizowano dla zablokowanej wartości współczynnika q. W ten sposób otrzymano szereg charakterystyk, które przedstawiono na rysunkach 4.29 oraz 4.30.



Rys. 4.29 Zestawienie charakterystyk naprężenia w funkcji czasu dla rożnych wartości współczynnika p dla zmodyfikowanego oraz klasycznego modelu Kelvina-Voigta; charakterystyki wyznaczono wykorzystując poszczególne stałe o następujących wartościach: f = 0,05 Hz, E = 3,5 MPa, $\eta = 2,6$ MPa/s, $\varepsilon_0 = 0,3$ oraz q = 0



Rys. 4.30 Zestawienie pętli histerezy dla różnych wartości współczynnika p dla zmodyfikowanego oraz klasycznego modelu Kelvina-Voigta; charakterystyki wyznaczono wykorzystując poszczególne stałe o następujących wartościach: f = 0.05 Hz, E = 3.5 MPa, $\eta = 2.6$ MPa/s, $\varepsilon_0 = 0.3$ oraz q = 0

Jak wynika z analizy przedstawionych wykresów zmiana wartości współczynnika *p* wpływa liniowo na zmianę wartości maksymalnych naprężeń. Zmiana znaku współczynnika *p* powoduje przesunięcie w fazie, o wartość okresu, przebiegu naprężenia. Takie zmiany skutkują zmianą kąta pochylenia poszczególnych pętli histerezy. Współczynnik *p* pełni więc w równaniu (4.44) podobną funkcję jak sztywność *E*. Jest on jednak bezpośrednio zależny od indukcji magnetycznej, podczas gdy wartość *E* jest od niej zależna pośrednio poprzez zmianę kąta stratności mechanicznej φ . Wprowadzenie tego współczynnika ma na celu jak możliwie dokładne dopasowanie modelu do opisu rzeczywistych wartości. Należy zwrócić uwagę na to, że dla wartości *p* = 0 pętla histerezy przyjmuje charakterystyczną pozycję, w której osie układu naprężenie-odkształcenie stanowią jej półosie.

4.5. Metodyka identyfikacji współczynników zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta

Wyznaczenie współczynników zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta wymaga przeprowadzenia szeregu obliczeń, których celem jest wyznaczenie ich wartości liczbowych. W tym celu zaproponowano autorski algorytm pozwalający na wyliczenie wartości współczynników q oraz p w funkcji pola magnetycznego na podstawie wykonanych pomiarów, omówionych w poprzednim rozdziale niniejszej pracy. Schemat graficzny wyznaczania współczynników kształtu pętli histerezy przedstawia rysunek 4.31.



Rys. 4.31 Schemat graficzny wyznaczania współczynników kształtu histerezy p i q; 1 – pętla histerezy wyznaczona na podstawie zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta, 2 – pętla histerezy otrzymana w wyniku pomiarów

Metoda wyznaczania poszukiwanych p i q opiera się na takim doborze ich wartości, aby suma kwadratów różnic pomiędzy pętlami otrzymanymi w wyniku modelowania i pomiarów była jak najmniejsza. W pierwszym etapie obliczeń wyznacza się obie pętle histerezy. Następnie opracowuje się tablicę wartości p oraz q o dużym rozrzucie. W celu możliwie najlepszego odwzorowania rzeczywistych charakterystyk, osobno wyznacza się parę współczynników dla górnej części pętli histerezy p_1 i q_1 oraz osobno dla jej dolnej części p_2 i q_2 . Przez tak otrzymane krzywe przeprowadzonych jest n prostych równoległych do osi rzędnych (osi naprężenia). Algorytm definiuje w ten sposób zbiór punktów A_{11}, \ldots, A_{1n} , oraz B_{11}, \ldots, B_{1n} , (dla górnej części pętli) i A_{21}, \ldots, A_{2n} , oraz B_{21}, \ldots, B_{2n} , (dla dolnej części pętli, tak jak pokazano na rysunku 4.31). Wyznaczane są w ten sposób długości odcinków $|A_{11}B_{11}|, ..., |A_{1n}B_{1n}|$ oraz $|A_{21}B_{21}|, ..., |A_{2n}B_{2n}|$. Wynikają one z różnic pomiędzy rzeczywistą pętlą histerezy i otrzymaną w wyniku modelowania. Stanowią więc miarę niedokładności modelu. Następnie wyznaczano sumy kwadratów długości odcinków określonych w poprzednim korku. Są one zdefiniowane jako $l_1 = \sum (|A_{11}B_{11}|^2 + ... +$ $|A_{1n}B_{1n}|^2$) dla górnej części pętli oraz $l_2 = \sum (|A_{21}B_{21}|^2 + ... + |A_{2n}B_{2n}|^2)$ dla dolnej części pętli histerezy. Algorytm przeszukuje następnie powstały zbiór wartości l_1 i l_2 dla wszystkich przyjętych $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ wybiera wariant, dla którego są one najmniejsze (to jest, spełniają warunek: $l_1 \rightarrow min$ oraz $l_2 \rightarrow min$). W kolejnym etapie następuje ponowne przyjęcie wartości p i q o małym rozrzucie w pobliżu tych, które zdefiniowano w wcześniejszym kroku. Taki zabieg ma na celu wyznaczenie dokładnej wartości poszukiwanych współczynników. Następnie ponownie wyznaczany jest zbiór danych l_1 i l_2 , dla którego algorytm wyszukuje spośród nich najmniejszych i na tej podstawie wskazuje ostateczne wartości $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$. Algorytm wyznaczania poszukiwanych wartości $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ przedstawiono na rysunku 4.32.



Rys. 4.32 Algorytm wyznaczania wartości współczynników $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$

4.6. Identyfikacja współczynników zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta

Zgodnie z zaproponowaną modyfikacją modelu, do dalszych obliczeń przyjęto uśrednione wartości modułów zachowawczego *E'* oraz stratności *E''*, zdefiniowane jako funkcje indukcji magnetycznej *B*, które przedstawiono na rysunku 4.33.



Rys. 4.33 Uśrednione wartości modułów zachowawczego E' oraz stratności E" w funkcji indukcji magnetycznej przyjęte do zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta

Wykorzystując metodykę przedstawioną w poprzednim rozdziale, wyznaczono na podstawie danych pomiarowych, wartości współczynników kształtu dla górnej części pętli histerezy p_1 i q_1 oraz dla jej dolnej części p_2 i q_2 dla każdej z wykonanych serii pomiarowych. Wyznaczono z nich wartość średnią i przedstawiono na wykresie jako funkcję indukcji magnetycznej *B* (rysunek 4.34). Jako błąd obliczonej wartości zdefiniowano odchylenie standardowe ze średniej arytmetycznej.



Rys. 4.34 Wyznaczone wartości współczynników $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ w funkcji indukcji magnetycznej B

Jak wynika z analizy zamieszczonych charakterystyk współczynniki modelu cechuje bardzo liniowa zmiana w funkcji indukcji magnetycznej. Jednak dla niektórych punktów pomiarowych rozrzut poszczególnych wartości, względem średniej, jest bardzo duży. Na rysunku 4.35 zamieszczono przykładowe rozrzuty składowych wartości $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ względem średniej arytmetycznej.



Rys. 4.35 Przykładowe rozrzuty składowych wartości $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ względem średniej arytmetycznej

Analiza zamieszczonych danych wskazuje na znaczny rozrzut poszczególnych wartości wyznaczonych względem średniej dla niektórych serii pomiarowych. W pojedynczych przypadkach wynosił on ponad 30%. W pewnym stopniu jest to spowodowane przyjętym uproszeniem dotyczącym uśrednienia wpływu częstotliwości na wyznaczone wartości modułu zachowawczego E' oraz modułu stratności E''. W dużej mierze jednak, taki rozrzut wartości $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ wynika z niedoskonałości samego modelu Kelvina-Voigta. Ma on bowiem ograniczoną możliwość odwzorowania końcowej części otrzymanych charakterystyk dotyczących odciążania badanych próbek. Z tego względu współczynniki p oraz q wyznaczone w sposób gwarantujący możliwie najmniejsze różnice, w wartościach naprężenia dla modelu i danych pomiarowych, cechuje znaczny rozrzut. Problem ten będzie szerzej omówiony w dalszej części pracy.

4.7. Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Kelvina-Voigta

W celu przeprowadzenia weryfikacji zaproponowanej modyfikacji modelu Kelvina-Voigta wyznaczono szereg pętli histerezy i porównano je z charakterystykami wyzaczonymi w trakcie badań. Rysunek 4.36 przedstawia zestawienie trzech pętli histerezy: pętli otrzymanej w wyniku wykonanych pomiarów, pętli wyznaczonej z klasycznego modelu Kelvina-Voigta oraz pętli otrzymanej drogą modyfikacji modelu. Wykres 4.37 przedstawia zestawienie otrzymanych w wyniku modelowania pętli histerezy dla wybranej serii pomiarowej. Na rysunku 4.38 przedstawiono zestawienie zarejestrowanych i wyznaczonych pętli histerezy w funkcji indukcji magnetycznej.



Rys. 4.36 Zestawienie pętli histerezy: otrzymanej w wyniku wykonania pomiarów, pętli wyznaczonej z klasycznego modelu Kelvina-Voigta oraz pętli otrzymanej dzięki przeprowadzeniu modyfikacji modelu, f = 0,1 Hz, $\varepsilon = 10\%$, B = 0 mT



Rys. 4.37 Zestawienie otrzymanych w wyniku modelowania pętli histerezy w funkcji indukcji magnetycznej B, f = 0.5 Hz, $\varepsilon = 30\%$



Rys. 4.38 Zestawienie zarejestrowanych i wyznaczonych pętli histerezy w funkcji indukcji magnetycznej B, f = 0.04 Hz, $\varepsilon = 10\%$

Analiza charakterystyk (rysunek 4.36) pozwala zaobserwować efekt wykonanej modyfikacji klasycznego modelu. Otrzymane wyniki w dużo lepszym stopniu odwzorowują zarejestrowane dane. Można również odnotować charakterystyczny kształt wyznaczonych pętli w okolicy maksymalnego naprężenia, w postaci pionowego odcinka. Jest to efekt wykorzystania różnych wartości współczynników p i q dla górnej i dolnej części pętli histerezy. Stanowi ono jedno z ograniczeń zaproponowanego modelu. Drugie ograniczenie, o którym wspominano wcześniej, to brak dokładności odwzorowania zmierzonych danych dla bardzo małych odkształceń, zwłaszcza dla dolnej części pętli histerezy (odpowiadającej odciążaniu badanych próbek). Wynika to z charakteru zastosowanego dwuparametrowego modelu reologicznego. Jego struktura i równania konstytutywne pozwalają na opis zjawisk zależnych od czasu, takich jak na przykład pełzanie. Mała ilość współczynników ułatwia wyznaczanie niezbędnych stałych materiałowych oraz analizę zachodzących zmian. Ogranicza jednak możliwości modelu do odwzorowania charakterystyk odbiegających kształtem od idealnej elipsy.

Zaproponowane modyfikacje w znaczący sposób polepszają dopasowanie modelu do danych pomiarowych. Jednak ze względu na specyfikę klasycznego modelu Kelvina-Voigta będą występować pewne różnice pomiędzy zmierzonymi i wyznaczonymi przebiegami. Wykresy zamieszczone na rysunku 4.37 przedstawiają zmiany zachodzące w zamodelowanych przebiegach w funkcji indukcji pola magnetycznego. Ich postać jest zgodna z rzeczywistymi charakterystykami badanego materiału, mianowicie wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego *B* rośnie kąt pochylenia poszczególnych pętli histerezy. Ponadto, można odnotować, że wraz ze wzrostem odkształcenia wyznaczone charakterystyki cechują się coraz bardziej progresywnym charakterem. Świadczy to o poprawności założeń wprowadzonych modyfikacji. Analiza wykresu przedstawionego na rysunku 4.38 pozwala zauważyć zmiany zachodzące w danych pomiarowych oraz w wyznaczonych przebiegach pod wpływem pola magnetycznego. Widoczne są również charakterystyczne różnice w otrzymanych i wyznaczonych wartościach.

Poprawność przyjętego modelu materiałowego oraz ocena jego jakości, stanowią niezwykle istotne zagadnienie. Dokonanie niezbędnych analiz wymaga skonstruowania układu dającego możliwość praktycznej weryfikacji wyznaczonych zależności. Szersze omówienie zagadnień związanych z praktycznym zastosowaniem elastomeru magnetoreologicznego jest przedmiotem następnego rozdziału.

Uwagi końcowe

Przeprowadzono identyfikację współczynników zaproponowanego modelu reologicznego. Dokonano analizy i oceny zastosowanego modelu oraz metod obliczeniowych.

- Opracowano metodykę identyfikacji współczynników przyjętego modelu reologicznego. Utworzono algorytm i na podstawie przyjętych założeń obliczeniowych, sformułowano autorskie oprogramowanie do wyznaczania poszukiwanych wartości współczynników.
- Wykazano zmianę współczynników, zaproponowanego modelu, w funkcji: indukcji magnetycznej *B*, amplitudy odkształcenia ε_0 oraz częstotliwości wymuszenia *f*.
- Dokonano analizy zastosowanego modelu reologicznego. Na tej podstawie wykazano poprawność przyjętych założeń obliczeniowych. Wykazano również niezadawalającą dokładność modelu lepkosprężystego dla większych wartości amplitudy odkształcenia. Ponadto wykazano brak możliwości jednoznacznego określenia wpływu zastosowanych częstotliwości wymuszenia (odkształcenia) na wyniki zarejestrowane w trakcie eksperymentu.

- Niezadowalające wyniki otrzymane przy wykorzystaniu klasycznego modelu ciała lepkosprężystego stanowiły podstawę do zaproponowania jego modyfikacji. W tym celu przyjęto szereg założeń modelowych. Ze względu na mały wpływ częstotliwości wymuszenia *f* na wyniki badań, dla wykorzystanego przedziału prędkości odkształcenia, współczynnik ten został pominięty (zastosowano jego uśrednioną wartość).
- Za kluczowe uznano uwzględnienie wpływu: progresywnej charakterystyki kompozytu poddanego ściskaniu oraz wpływu pola magnetycznego na rejestrowaną wartość naprężeń.
- Wyprowadzono zależności modyfikujące model klasycznego ciała lepkosprężystego. Przeprowadzono analizę matematyczną i dokonano omówienia wpływu poszczególnych współczynników modelu na wyznaczone charakterystyki. Wykazano również przydatność zaproponowanych modyfikacji do modelowania badanego elastomeru magnetoreologicznego.
- Opracowano metodykę identyfikacji współczynników zmodyfikowanego modelu ciała lepkosprężystego. Utworzono specjalistyczny algorytm i na podstawie przyjętych założeń obliczeniowych, sformułowano autorskie oprogramowanie do wyznaczania poszukiwanych wartości współczynników modelu.
- Wykazano poprawność przyjętych założeń dotyczących liniowego wpływu indukcji magnetycznej na właściwości mechaniczne badanego kompozytu.

Ostatecznie należy stwierdzić, że rozpoznano szereg zagadnień związanych z identyfikacją cech materiałowych elastomerów magnetoreologicznych. Wykazano również zdolność modelowania układów mechanicznych przy wykorzystaniu modeli reologicznych.

5. Przykład zastosowania badanego elastomeru magnetoreologicznego

Wstęp

Ostatni etap pracy dotyczy praktycznego zastosowania badanego elastomeru magnetoreologicznego. Aby zrealizować tak postawiony cel, opracowano model do obliczeń numerycznych. Przyjęte w poprzednim rozdziale współczynniki modelu zdefiniowano jako funkcje zależne od pola magnetycznego. Do klasycznego modelu Kelvina-Voigta wprowadzono niezbędne modyfikacje, które uwzględniały progresywny charakter pętli histerezy wywołany wpływem odkształcenia. Dzięki temu możliwym stało się wyznaczenie dowolnych charakterystyk dla rozpatrywanego zakresu pracy. Dało to podstawy do analizy efektywności wynikającej z zastosowanego kompozytu oraz weryfikację zdolności aplikacyjnej opisywanego w poprzednim rozdziale modelu reologicznego.

5.1. Stanowisko badawcze

Jak wykazano wcześniej, istnieje możliwość sterowania pewnymi właściwościami elastomeru magnetoreologicznego, za pomocą parametrów przykładanego pola magnetycznego. Tak unikatowa cecha omawianego materiału kompozytowego pozwala na zaproponowanie nowych, innowacyjnych zastosowań praktycznych. Jako przykład postanowiono skonstruować układ, którego zadaniem będzie odbieranie i dyssypowanie generowanej w nim energii mechanicznej. Tak określone zadanie można wykorzystać w budowie różnego rodzaju maszyn i urządzeń. Należy zaliczyć do nich głównie aktywne urządzenia tłumiące drgania oraz różnego rodzaju zderzaki lub odbojniki, które cechowałby się sterowalną charakterystyką.

W celu wskazania na możliwości zastosowania elastomerów magnetoreologicznych w budowie maszyn opracowano konstrukcję specjalistycznego stanowiska badawczego. Dzięki temu możliwa stanie się weryfikacja, na rzeczywistym układzie, badanego materiału pod kątem jego aplikacyjności w szeregu rozwiązań wykorzysujących jego możliwość do absorbowania i rozpraszania energii mechanicznej. Konstrukcję stanowiska badawczego wykonano na podstawie szeregu założeń. Pierwszym z nich jest zachowanie identycznego charakteru stosowanego obciażenia (naprężenia ściskające). Projektowany układ wymagał jego przystosowania do rejestracji przemieszczenia elementu wywołującego naprężenia w badanej próbce. Niezbędne było również zapewnienie możliwości pomiaru siły ściskającej w celu wyznaczenia wartości naprężeń. Konieczne było również takie zaprojektowanie układu sterującego i wykonawczego, które umożliwiłyby zadanie zdefiniowanego charakteru wymuszenia (funkcja trójkątna). Jednym z rozwiązań spełniającym tak zdefiniowane założenia jest zastosowanie układu hydraulicznego wykorzystującego serwozawór elektrohydrauliczny. Wykorzystując odpowiedni sterownik, skonstruowano układ regulacji położenia tłoka siłownika. Przystosowano w ten sposób istniejące już stanowisko pomiarowe, które wykorzystywano podczas wcześniejszych prac badawczych. Specjalistyczne stanowisko badawcze stanowią: mechaniczno-hydrauliczny zespół roboczy, elektryczny zespół sterowania oraz zespół rejestracji i akwizycji danych. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 5.1. Celem zwiększenia przejrzystości opisu, poza widokiem ogólnym (rysunek 5.5), każdy z zespołów stanowiska przedstawiono osobno (rysunki od 5.2 do 5.4).



Rys. 5.1 Schemat specjalistycznego stanowiska badawczego; 1 – ostoja, 2 – zasilacz laboratoryjny, 3 – komputer, 4 – wzmacniacz pomiarowy, 5 – czujnik przemieszczenia, 6 – układ hydrauliczny, 7 – siłownik hydrauliczny, 8 – prowadzenie wraz z elementem do przekazywania obciążenia, 9 – czujnik siły, 10 – zespół pomiarowy wyposażony w próbkę elastomeru magnetoreologicznego

Siłownik 7 jest połączony z układem hydraulicznym 6. Generuje on wymuszenie (przemieszczenie) o charakterze wynikającym z nastawy układu sterowania. Przemieszczenie siłownika jest przekazywane, przez element pośredniczący 8 wyposażony w prowadzenie liniowe, do zespołu pomiarowego 10 przymocowanego sztywno do ostoi 1. Wewnątrz zespołu pomiarowego znajduje się badana próbka elastomeru magnetoreologicznego. Cewka indukcyjna zespołu badawczego jest zasilana napięciem o zadanej wartości zasilaczem laboratoryjnym 2. Pomiar wartości siły realizowany jest za pomocą czujnika siły 9 (C9C 1 kN firmy HBM). W celu pomiaru wartości przemieszczenia wykorzystano czujnik przemieszczeń liniowych 5 (WA 20 mm firmy HBM). Sygnały z obu czujników przekazywane są do wzmacniacza pomiarowego 4, który współpracuje z komputerem klasy PC 3, wyposażonego w oprogramowanie umożliwiające akwizycję danych. Na podstawie pomiaru wartości siły ściskającej oraz przemieszczenia tłoka siłownika i elementu pośredniczącego (bezpośrednio wywołujących ściskanie próbki elastomeru) wyznaczane są wartości naprężenia i odkształcenia. Widok zespołu mechanicznego stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.2. Schemat elektryczny zespołu sterowania zamieszczono na rysunku 5.3.



Rys. 5.2 Widok zespołu mechanicznego stanowiska badawczego; 1 – ostoja, 2 – zasilanie, 3 – zespół pomiarowy wyposażony w próbkę elastomeru magnetoreologicznego, 4 – prowadzenie oraz element przekazujący obciążenie, 5 – czujnik przemieszczenia, 6 – czujnik siły, 7 – siłownik hydrauliczny



Rys. 5.3 Schemat elektryczny zespołu sterowania stanowiska badawczego; 1 – czujnik przemieszczenia, 2 – laboratoryjny generator przebiegów, 3 – sterownik PID, 4 – dwukanałowy wzmacniacz proporcjonalny, 5 – karta wartości zadanych, 6 – jednokanałowy wzmacniacz proporcjonalny

Generator laboratoryjny 2 zadaje sygnał sterujący, który przekazywany jest do sterownika PID 3. Czujnik przemieszczenia 1, sztywno przymocowany do tłoczyska siłownika, współpracuje ze sterownikiem w ujemnej pętli sprzężenia zwrotnego. Sygnał sterujący przekazywany jest z regulatora do dwukanałowego wzmacniacza proporcjonalnego 4, który steruje cewkami C3 i C2 serwozaworu elektrohydraulicznego. Karta wartości zadanych 5 ma możliwość wygenerowania stałego sygnału o nastawialnej wartości. Jest on przekazywany do jednokanałowego wzmacniacza proporcjonalnego 6, który steruje cewką C4 zaworu przelewowego. Dzięki temu istnieje możliwość dokładnej kontroli wartości ciśnienia w układzie. Układ sterujący włączany jest za pomocą przycisku P1, natomiast układ hydrauliczny za pomocą przycisku P2. Schemat hydrauliczny zespołu roboczego przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4 Schemat hydrauliczny zespołu roboczego stanowiska badawczego; 1 – czujnik przemieszczenia, 2 – regulatory przepływu, 3 – serwozawór elektrohydrauliczny

Serwozawór elektrohydrauliczny 3 współpracuje z regulatorami przepływu 2, które podłączone są do siłownika. Takie rozwiązanie, przy odpowiednim doborze wartości sterujących, pozwala zadać prędkość wysuwu tłoczyska. Jest ona stała niezależnie od zmieniającej się siły jaką musi pokonać siłownik (siły ściskającej badaną próbkę). Cewki elementów proporcjonalnych C2-C4 są zasilane sygnałami ze wzmacniaczy, tak jak to pokazano na rysunku 5.3. Widok specjalistycznego stanowiska badawczego przedstawia rysunek 5.5.



Rys. 5.5 Widok specjalistycznego stanowiska badawczego; 1 – elektryczny zespół sterowania, 2 – hydrauliczny zespół roboczy, 3 – zespół mechaniczny, 4 – elastomer magnetoreologiczny (wewnątrz cewki)

5.2. Metodyka badań obiektu rzeczywistego

W celu przeprowadzenia badań na rzeczywistym obiekcie (skonstruowanym stanowisku badawczym) wybrano dla czterech różnych wariantów częstotliwości wymuszenia f po dwa punkty pomiarowe dla różnych amplitud odkształcenia ε_0 . Sterując przebiegiem odkształcenia, (które charakteryzowało przemieszczenie tłoka siłownika) poddano próbkę elastomeru magnetoreologicznego działaniu naprężeń ściskających (wywołanych siłą ściskającą generowaną przez tłok siłownika). Następnie rejestrowano dziesięć cykli obciążenia i odciążenia, uzyskując w ten sposób m = 10 pętli histerezy dla pojedynczej badanej próbki, z których następnie wyznaczano wartość średnia. W przeciwieństwie do poprzednich badań każda z wyznaczonych pętli histerezy odnosi się do pojedynczej próbki - kolejne serie pomiarowe wykorzystywały inną próbkę. Pomiary wykonywano dla różnych wartości indukcji pola magnetycznego, kolejno B = 0 mT, 64 mT, 127 mT. W ten sposób zarejestrowano łącznie dla wszystkich próbek m = 240 pętli histerezy. Schemat programu badań zamieszczono na rysunku 5.6. Zadane wartości amplitudy odkształcenia ε_0 oraz częstotliwości f dobrano tak, aby ich wartości były różne od tych stosowanych w trakcie badań w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych. Wybór ten był również podyktowany charakterystyką skonstruowanego stanowiska badawczego. Dokładne realizowanie zadanych prędkości oraz przebiegu przemieszczenia zależne było od wartości ciśnienia oraz objętościowego natężenia przepływu oleju w układzie hydraulicznym, których efektywne zmiany możliwe były w pewnym zakresie. Dodatkowo, w celu oceny przydatności zastosowanego modelu matematycznego do dalszych prac związanych z dynamiczną charakterystyką omawianych kompozytów, wybrano dodatkową serię pomiarową odbiegającą wartością częstotliwości wymuszenia od stosowanych dotychczas (o częstotliwości wymuszenia f = 1,55 Hz).



Rys. 5.6 Schemat programu badań obiektu rzeczywistego

Wyniki badań obiektu rzeczywistego

W wyniku przeprowadzenia badań weryfikujących, na rzeczywistym obiekcie, uzyskano szereg pętli histerezy. Wszystkie charakterystyki wyznaczono zgodnie z opisaną metodyką i przedstawiono na rysunku 5.7.



Rys. 5.7 Zestawienie pętli histerezy wyznaczonych w wyniku badań obiektu rzeczywistego

Analiza zamieszczonych charakterystyk pozwala zaobserwować zmiany wywołane wzrostem indukcji pola magnetycznego *B* działającego na elastomer magnetoreologiczny. Mianowicie, wraz z wzrostem jej wartości poszczególne pętle histerezy osiągają większe wartości naprężeń σ (leżą wyżej względem osi odciętych). Wzrost kąta nachylenia poszczególnych pętli histerezy powoduje zmianę pola powierzchni trójkąta zdefiniowanego za pomocą trzech odcinków (rysunek 3.25): odcinka AB łączącego minimalną i maksymalną wartość odkształcenia (przechodząca przez początek układu współrzędnych), odcinka BC równoległego do osi naprężeń łączącego maksymalne odkształcenia z odpowiadającym im punktem leżącym na pętli histerezy oraz odcinka leżącego na osi odkształceń domykającego pole trójkąta AC. Wraz ze zmianą indukcji pola magnetycznego *B* zmienia się również pole powierzchni poszczególnych pętli histerezy. Jak wykazano w rozdziale 3, omawiane pola

powierzchni odpowiadają wartościami energii rozproszonej W (praca tłumienia) oraz energii sprężystej ΔW (praca odkształcenia). Zmiana ich wartości odpowiada zmianie tłumienia w badanym materiale. Na tej podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego B, udowodniono zmianę tłumienia względnego ψ w układzie wykonawczym rzeczywistego obiektu badań. Innymi słowy, wartość energii mechanicznej dyssypowanej w omawianym układzie jest funkcją indukcji pola magnetycznego B i rośnie wraz z nią. Na tej podstawie można stwierdzić, że badany elastomer magnetoreologiczny znajduje zastosowanie w budowie maszyn do konstrukcji urządzeń wykorzysujących, poddającą się kontroli, jego możliwość do absorbowania i rozpraszania energii mechanicznej.

Analiza zamieszczonych charakterystyk (rysunek 5.7) pozwala również zaobserwować wpływ maksymalnej wartości odkształcenia na kształty poszczególnych pętli histerezy. Wraz z przyrostem wartości odkształcenia ε rośnie progresywny charakter zarejestrowanych krzywych. Zjawisko to omówiono szerzej w rozdziale 4 niniejszej pracy. Należy odnotować to, że zmiany zachodzące w charakterystykach wyznaczonych podczas badań nad obiektem rzeczywistym oraz te, które zarejestrowano podczas badań w warunkach obciążeń cyklicznych cechuje zbliżony charakter.

5.3. Model do obliczeń numerycznych

Sformułowanie modelu do obliczeń numerycznych wymagało przekształcenia równania (4.44), w taki sposób, by możliwe było uwzględnienie różnych wartości współczynników kształtu pętli histerezy p oraz q dla jej górnej i dolnej części. Wykorzystano w tym celu, omówione w rozdziale 4.5, współczynniki $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$. Po odpowiednich podstawieniach równanie (4.44) przyjmuje postać:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \frac{p_1(B)}{1 - q_1(B)\varepsilon_0 \sin(\omega t)} \cdot E(B)\varepsilon_0 \sin(\omega t) + (\eta\omega)(B)\varepsilon_0 \cos(\omega t) & \text{dla } \dot{\varepsilon} \ge 0, \\ \frac{p_2(B)}{1 - q_2(B)\varepsilon_0 \sin(\omega t)} \cdot E(B)\varepsilon_0 \sin(\omega t) + (\eta\omega)(B)\varepsilon_0 \cos(\omega t) & \text{dla } \dot{\varepsilon} < 0. \end{cases}$$
(5.1)

Do budowy tak zdefiniowanego modelu wykorzystano część pakietu numerycznego MATLab Simulink. Daje on możliwość przeprowadzenia symulacji i obliczeń w czasie rzeczywistym. Widok sformułowanego w tym środowisku modelu, którego strukturę stanowią trzy elementy odpowiednio definiujące właściwości rozważanego kompozytu, przedstawiono schematycznie na rysunku 5.8. Element modelu oznaczony jako 1 odpowiada za modelowanie właściwości lepkich. Są one zależne od modułu stratności E", który opisany jest zależnością (4.15). Funkcja ta jest liniową zależnością indukcji pola magnetycznego B, zgodnie z zależnościami przedstawionymi na rysunku 4.33. Kolejne elementy modelu, oznaczone jako 2 oraz 3, wyznaczają: górną i dolną część pętli histerezy. Wykorzystywane są przy tym funkcje zachowawczego współczynników kształtu modułu E' oraz petli histerezy $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ zależne liniowo od indukcji pola magnetycznego B, zgodnie z zależnościami przedstawionymi na rysunku 4.34.



Rys. 5.8 Widok modelu matematycznego w środowisku do obliczeń numerycznych; 1 – element układu modelowania właściwości lepkich (odpowiadający modułowi stratności E''), 2 – element układu modelujący właściwości sprężyste dla górnej części pętli histerezy (odpowiadający modułowi zachowawczemu E'), 3 – element układu modelujący właściwości sprężyste dla dolnej części pętli histerezy (odpowiadający modułowi zachowawczemu E')

Model zaprojektowany jest w taki sposób, że wybiera różne wartości współczynników kształtu pętli histerezy na podstawie zmiany znaku przebiegu funkcji odkształcenia. Zmiana znaku pierwszej pochodnej z funkcji odkształcenia niesie informację o zmianie jego kierunku. W tym przypadku oznacza to przejście od obciążania materiału do jego odciążania i na odwrót – czemu odpowiadają kolejno: górna i dolna część pętli histerezy. Suma wartości obliczonych z 1 i 2 lub 3 elementu modelu, pozwala wyznaczyć przebieg naprężenia w funkcji czasu jako wartość zależną od zadanej indukcji pola magnetycznego. Na podstawie tak sformułowanego modelu numerycznego wyznaczono, w dalszej części pracy, poszukiwane pętle histerezy.

Wstępna weryfikacja modelu do obliczeń numerycznych

W kolejnym etapie pracy dokonano porównania wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań obiektu rzeczywistego. Wartości współczynników kształtu pętli histerezy, wykorzystywane do obliczeń numerycznych, wyznaczono na podstawie badań w warunkach obciążenia cyklicznie zmiennego (badań laboratoryjnych). Wyznaczone wartości współczynników $p_{1,2}$ i $q_{1,2}$ (rysunek 4.34) wprowadzono do modelu numerycznego i w efekcie przeprowadzenia symulacji, otrzymano szereg pętli histerezy. Już na wstępnym etapie prac stwierdzono, że model numeryczny, w przedstawionej postaci, nie pozwala otrzymać dostatecznie dokładnych wyników. Zestawienie przykładowych pętli histerezy zamieszczono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9 Zestawienie pętli histerezy zmierzonej podczas badań nad obiektem rzeczywistym oraz otrzymanej z modelu numerycznego dla stałych wartości f = 0,47 Hz, $\varepsilon = 31\%$, B = 127 mT

Analiza zamieszczonych wykresów pozwala stwierdzić bardzo duże różnice pomiędzy zmierzonymi i wyliczonymi wartościami. Można zaobserwować, że występujące różnice pomiędzy rzeczywistymi i numerycznymi charakterystykami, maleją wraz ze wzrostem odkształcenia. Oznacza to, że dla niewielkich wartości odkształcenia ε występują duże rozbieżności w wartościach naprężenia σ . Ich skala sprawia, że zaproponowany model reologiczny, przedstawionej postaci, nie może być przydatny do modelowania i analizy badanego elastomeru magnetoreologicznego. Konieczne jest więc jego udoskonalenie zorientowane na zmniejszenie zakresu rejestrowanych rozbieżności w wartościach naprężenia.

W związku z tym, że zaproponowana modyfikacja, w klasycznym modelu Kelvina-Voigta, skutkuje zmianami o pożądanym charakterze, zadecydowano o zwiększeniu ilości współczynników kształtu pętli histerezy. Dzięki temu powstanie możliwość dokładniejszego odwzorowania rzeczywistych charakterystyk badanego materiału przez wyznaczony model numeryczny. Kluczowe staje się określenie ilości wprowadzanych do modelu współczynników oraz jednoznaczne zdefiniowanie zakresu ich działania.

Analiza zamieszczonych wykresów pozwala stwierdzić, że największe różnice pomiędzy przebiegami występują powyżej wartości wynoszącej połowę amplitudy odkształcenia ε_0 , dla górnej części pętli histerezy odpowiadającej obciążaniu materiału. W przypadku dolnej części charakterystyki, odpowiadającej odciążaniu, można zaobserwować podobne zachowanie się przebiegów, zachodzące jednak dla innych wartości odkształcenia. Wyznaczono, że zakres największej dokładności modelu znajduje się w przedziale od maksymalnej wartości odkształcenia do ε_0 wartości wynoszącej $0,69\varepsilon_0$. Z tego względu zdecydowano, że właśnie ta wartość stanowić będzie krańcową w przedziale zmienności nowych współczynników kształtu pętli histerezy z czterech ($p_{1,2}$ i $q_{1,2}$) do ośmiu ($p_{11,12}$, $p_{21,22}$ oraz $q_{11,12}$, $q_{21,22}$). Ich zestawienie zamieszczono w tabeli 5.1.

Pętla histerezy		Górna	ı część		Dolna część				
Współczynnik	p_{11}	q_{11}	p_{12}	q_{12}	p_{21}	q_{21}	<i>p</i> ₂₂	<i>q</i> ₂₂	
Zalaraa		έ≥	≥ 0		$\dot{\varepsilon} < 0$				
Zakies	$\varepsilon \leq 0,5\varepsilon_0$		ε > (0,5ε ₀	$\varepsilon \leq 0,69\varepsilon_0$		$\varepsilon > 0,69\varepsilon_0$		

Tab. 5.1 Zestawienie przyjętych współczynników kształtu pętli histerezy

Wobec tak zaproponowanej zmiany równania (5.1) przekształcono do postaci:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \frac{p_{11}(B)}{1 - q_{11}(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t)} \cdot E(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t) + (\eta\omega)(B)\varepsilon_{0}\cos(\omega t) & \text{dla } \dot{\varepsilon} \ge 0 \text{ i } \varepsilon \le 0,5\varepsilon_{0}, \\ \frac{p_{12}(B)}{1 - q_{12}(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t)} \cdot E(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t) + (\eta\omega)(B)\varepsilon_{0}\cos(\omega t) & \text{dla } \dot{\varepsilon} \ge 0 \text{ i } \varepsilon > 0,5\varepsilon_{0}, \\ \frac{p_{21}(B)}{1 - q_{21}(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t)} \cdot E(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t) + (\eta\omega)(B)\varepsilon_{0}\cos(\omega t) & \text{dla } \dot{\varepsilon} < 0 \text{ i } \varepsilon \le 0,69\varepsilon_{0}, \\ \frac{p_{22}(B)}{1 - q_{22}(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t)} \cdot E(B)\varepsilon_{0}\sin(\omega t) + (\eta\omega)(B)\varepsilon_{0}\cos(\omega t) & \text{dla } \dot{\varepsilon} < 0 \text{ i } \varepsilon > 0,69\varepsilon_{0}. \end{cases}$$
(5.2)

Zwiększenie liczby współczynników modelu będzie skutkować dokładniejszym odwzorowaniem rzeczywistych charakterystyk. Zwiększy się jednak również jego stopień skomplikowania. Zaletą zaproponowanej modyfikacji, jest to, że istnieje możliwość wyznaczenia nowych wartości poszukiwanych współczynników za pomocą utworzonego wcześniej algorytmu obliczeniowego. Ich jednoznaczne określenie gwarantują zdefiniowane granice przedziałów w których zmianie ulegają wartości współczynników $p_{11,12}$, $p_{21,22}$, oraz $q_{11,12}$, $q_{21,22}$, opisane za pomocą warunków równań (5.2). Wszystkie poszukiwane współczynniki wyznaczono zgodnie z metodyką zamieszczoną w rozdziałach 4.5 oraz 4.6 i na rysunkach 5.10 oraz 5.11.



Rys. 5.10 Wyznaczone wartości współczynników $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ w funkcji indukcji magnetycznej B

Analiza zamieszczonych wykresów pokazuje zmiany zachodzące w współczynnikach modelu pod wpływem pola magnetycznego. Wyznaczone wartości współczynników p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22} cechują się dobrym dopasowaniem funkcji liniowej. Wartości współczynnika determinacji R^2 , bliskie jedności, wskazują na możliwość bardzo dużej dokładności opisania zmiany wartości współczynników q_{11} , q_{12} , q_{21} , q_{22} przy wykorzystaniu funkcji liniowej. Jak wynika z zamieszczonych danych, najdokładniejsze dopasowanie początkowych części pętli histerezy, zaproponowanym modelem, wymaga przyjęcia ujemnych wartości współczynników q_{11} oraz q_{21} . Widok modelu uwzględniającego cztery współczynniki kształtu histerezy przedstawiono na rysunku 5.12.



Rys. 5.11 Wyznaczone wartości współczynników $q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$ w funkcji indukcji magnetycznej B



Rys. 5.12 Widok zmodyfikowanego modelu matematycznego w środowisku do obliczeń numerycznych; 1 – element układu modelowania właściwości lepkich (odpowiadający modułowi stratności E''), 2 – element układu modelujący właściwości sprężyste dla drugiej części dolnego odcinka pętli histerezy, 3 – element układu modelujący właściwości sprężyste dla pierwszej części dolnego odcinka pętli histerezy, 4 – element układu modelujący właściwości sprężyste dla pierwszej części górnego odcinka pętli histerezy, 5 – element układu modelujący właściwości sprężyste dla drugiej części górnego odcinka pętli histerezy

Działanie modelu opiera się na założeniach podobnych do początkowych. Element modelu oznaczony jako 1 odpowiada za modelowanie właściwości lepkich. Są one zależne od modułu stratności *E*", zdefiniowanego liniową zależnością od wartości indukcji pola magnetycznego *B*. Model wybiera różne wartości współczynników kształtu pętli histerezy na podstawie wartości działającego odkształcenia oraz na podstawie zmiany znaku prędkości odkształcenia. Wybrane na tej podstawie wyniki 2, 3, 4 lub 5 elementu układu są sumowane z wartościami otrzymanymi z 1 elementu. W taki sposób otrzymuje się charakterystykę naprężenia w funkcji

czasu przy zadanej funkcji odkształcenia. Na rysunkach od 5.13 do 5.15 przedstawiono przykładowe charakterystyki, które wyznaczono w wyniku modelowania.



Rys. 5.13 Zestawienie otrzymanych ze zmodyfikowanego modelu numerycznego pętli histerezy w funkcji indukcji magnetycznej B, f = 0,47 Hz, $\varepsilon = 12\%$



Rys. 5.14 Zestawienie otrzymanych ze zmodyfikowanego modelu numerycznego pętli histerezy w funkcji indukcji magnetycznej B, f = 1,35 Hz, $\varepsilon = 13\%$



Rys. 5.15 Zestawienie otrzymanych ze zmodyfikowanego modelu numerycznego pętli histerezy w funkcji indukcji magnetycznej B, f = 0.33 Hz, $\varepsilon = 33\%$

Analiza przedstawionych wykresów wskazuje zmiany w otrzymywanych wynikach, będące efektem podstawienia indukcji magnetycznej *B* o różnych wartościach. Widoczna jest również rosnąca progresywność charakterystyk, następująca wraz ze wzrostem wartości odkształcenia. Można zaobserwować również zmianę stopnia progresywności dla zdefiniowanych wcześniej przedziałów odkształcenia (tabela 5.1), które odzwierciedla zmiana kąta nachylenia poszczególnych części pętli histerezy. Dowodzi to, że osiągnięto cel modyfikacji, wprowadzonej do modelu numerycznego. Porównanie przykładowych pętli histerezy wyznaczonych w efekcie badań nad rzeczywistym obiektem oraz będących wynikiem przeprowadzenia symulacji przy wykorzystaniu utworzonego modelu numerycznego zaprezentowano na rysunkach 5.16 oraz 5.17.



Rys. 5.16 Zestawienie pętli histerezy: otrzymanej w wyniku badań rzeczywistych oraz przy wykorzystaniu zmodyfikowanego modelu numerycznego, f = 1,35 Hz, $\varepsilon = 13\%$, B = 0 mT



Rys. 5.17 Zestawienie pętli histerezy: otrzymanej w wyniku badań rzeczywistych oraz przy wykorzystaniu zmodyfikowanego modelu numerycznego, f = 0.55 Hz, $\varepsilon = 18\%$, B = 127 mT

Analiza zamieszczonych wykresów pozwala zauważyć zdecydowanie mniejsze rozbieżności w wartościach naprężeń wyznaczanych z modelu numerycznego, a danymi otrzymanymi w wyniku przeprowadzenia badań nad rzeczywistym obiektem. Największe występujące błędy, w wartościach naprężenia, można zaobserwować w pobliżu skrajnych wartości odkształcenia. Następny etap prac powinien być zorientowany na jakościową analizę zmodyfikowanego modelu numerycznego. Do określenia wartości błędu niezbędne jest wykorzystanie zmierzonej wartości naprężenia w danej chwili czasowej $\sigma_{rz}(t_n)$, oraz

wyliczonej z modelu wartości naprężenia w danej chwili czasowej $\sigma_{num}(t_n)$. Błąd zmodyfikowanego modelu numerycznego w danej chwili czasowej zdefiniowano następująco:

$$\Delta\sigma(t_n) = \left| \frac{\sigma_{rz}(t_n) - \sigma_{num}(t_n)}{\sigma_{rz}(t_n)} \right| \cdot 100\%.$$
(5.3)

Model numeryczny umożliwia zadanie dowolnego kroku czasowego i tym samym wyznaczenie wartości naprężenia w dowolnej chwili czasowej t_n . Na tej podstawie wyznaczono wartości błędu będącego funkcją czasu dla poszczególnych punktów pomiarowych w całym zakresie odkształcenia. Wykorzystano w tym celu algorytm obliczeniowy omówiony szczegółowo w rozdziale 4.5. Schemat wyznaczania wartości błędu modelu numerycznego $\Delta\sigma(t_n)$ przedstawiono na rysunku 5.18.



Rys. 5.18 Schemat wyznaczania wartości błędu modelu numerycznego $\Delta\sigma(t_n)$; 1 – pętla histerezy wyznaczona w wyniku modelowania, 2 – pętla histerezy zarejestrowana w trakcie badań rzeczywistych

Podobnie jak poprzednio wyznaczono szereg punktów A_{11}, \ldots, A_{1n} , oraz B_{11}, \ldots, B_{1n} i A_{21}, \ldots, A_{2n} , oraz B_{21}, \ldots, B_{2n} . Punkty A_{11}, \ldots, A_{1n} definiują naprężenia dla górnej części pętli histerezy (obciążania), podczas gdy punkty A_{21}, \ldots, A_{2n} , dla jej dolnej części (odciążania). Punkty te odnoszą się do pętli histerezy zarejestrowanej w trackie badań rzeczywistych. Punkty B_{11}, \ldots, B_{1n} definiują naprężenia dla górnej części pętli histerezy, podczas gdy punkty B_{21}, \ldots, B_{2n} dla jej dolnej części. Wymienione punkty odnoszą się do pętli histerezy wyznaczonej w wyniku przeprowadzenia symulacji numerycznych. Jak wynika z zamieszczonego opisu (rysunek 5.18) zbiór punktów A_{1n} i A_{2n} odpowiada wartościom $\sigma_{rz}(t_n)$, a zbiór punktów B_{1n} i B_{2n} odpowiada wartościom $\sigma_{num}(t_n)$. Dla punktów definiujących naprężenia $\sigma_{rz}(t_n)$ i $\sigma_{num}(t_n)$ wyznaczonej zadanego odkształcenia ε . Przykładowe wykresy pokazujące wartości błędów modelu, wyznaczone zgodnie z zależnością (5.3), przedstawiono na rysunkach od 5.19 do 5.21.



Rys. 5.19 Wartość błędu $\Delta\sigma(t_n)$ opracowanego modelu numerycznego, f = 0.55 Hz, $\varepsilon = 5\%$, B = 64 mT



Rys. 5.20 Wartość błędu $\Delta\sigma(t_n)$ opracowanego modelu numerycznego, f = 0,47 Hz, $\varepsilon = 12\%$, B = 0 mT



Rys. 5.21 Wartość błędu $\Delta\sigma(t_n)$ opracowanego modelu numerycznego, f = 1,55 Hz, $\varepsilon = 27\%$, B = 127 mT

Jak wynika z analizy zamieszczonych wykresów zgodność modelu numerycznego z danymi pomiarowymi jest niezadowalająca dla bardzo niskich wartości odkształcenia. Wynika to częściowo z ograniczeń samego modelu Kelvina-Voigta oraz może być również skutkiem przyjętych założeń dotyczących zastosowanego charakteru wymuszenia co omawiano w rozdziale 4.2. Zastąpiono bowiem, na potrzeby obliczeń analitycznych, trójkątną funkcję odkształcenia, pewną funkcją sinusoidalnie zmienną. Nie zastosowano przy tym przybliżenia profilu trójkątnego funkcją sinusoidalną. Na podstawie opracowanej i przedstawionej wcześniej metodyki, określono odpowiadające sobie funkcje wymuszenia (pewna funkcja trójkątna odpowiadająca pewnej funkcji sinusoidalnie zmiennej) wartościami kąta stratności φ , pod względem: pola powierzchni i punktów charakterystycznych petli histerezy (rysunek 4.5). Potwierdzono poprawność tak przyjętego założenia dla małych wartości amplitudy odkształcenia ε_0 przy wykorzystaniu klasycznego modelu Kelvina-Voigta. Następnie wprowadzono do niego szereg modyfikacji, które umożliwiły uwzględnienie zaobserwowanych zjawisk, to jest progresywności charakterystyk postępującej ze wzrostem odkształcenia, dla całego przedziału stosowanego odkształcenia. Skutkiem wprowadzenia modyfikacji modelu numerycznego (zaimplementowania współczynników kształtu pętli histerezy: p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22} oraz q_{11} , q_{12} , q_{21} , q_{22}) jest jego dobra zgodność dla pozostałego przedziału odkształcenia. Zakres oraz charakter zmian zachodzących w charakterystykach otrzymanych z modelu numerycznego jest zadowalająco zgodna z zaobserwowanym zachowaniem się elastomeru magnetoreologicznego w trakcie badań nad obiektem rzeczywistym. W efekcie występowania różnic pomiędzy charakterystykami wymuszenia, w wyniku przyjętych uśrednień oraz linearyzacji wpływu pola magnetycznego na badany kompozyt, ujawniają się bardzo znaczne błędy dla małych wartości odkształcenia. Zwraca uwagę to, że w pewnym wybranym zakresie odkształcenia, błąd zaproponowanego modelu oscyluje w zadowalającym przedziale. Wynika to z charakterystyk (rysunki od 5.21 do 5.23) jeśli pominać mały zakres odkształcenia.



Rys. 5.22 Wartość błędu $\Delta\sigma(t_n)$ opracowanego modelu numerycznego z pominięciem małych wartości odkształcenia, f = 0.55 Hz, $\varepsilon = 5\%$, B = 64 mT



Rys. 5.23 Wartość błędu $\Delta\sigma(t_n)$ opracowanego modelu numerycznego z pominięciem małych wartości odkształcenia f = 1,55 Hz, $\varepsilon = 27\%$, B = 127 mT



Rys. 5.24 Wartość błędu $\Delta\sigma(t_n)$ opracowanego modelu numerycznego z pominięciem małych wartości odkształcenia, f = 0.47 Hz, $\varepsilon = 12\%$, B = 0 mT

Szczegółowa analiza zmian jakie przedstawiają charakterystyki uzyskane z pomiarów rzeczywistych oraz charakterystyk będących wynikiem obliczeń numerycznych pozwalają stwierdzić, że model dobrze odzwierciedla wyniki rzeczywiste tylko powyżej określonej wartości amplitudy odkształcenia. Obserwuje się tym większe rozbieżności, im bardziej różni sie wartość odkształcenia, w danej chwili czasowej, od jej wartości maksymalnej. Przyjety model umożliwia opisanie pętli w kształcie elipsy. Z tego powodu nieuniknione są pewne różnice pomiędzy rzeczywistymi pętlami histerezy, a tymi które wyznaczono numerycznie. Należy stwierdzić, że wpływ zwiększania się przekroju poprzecznego badanych próbek jest zachodzących właściwości niezwykle istotny. Zakres zmian elastomeru magnetoreologicznego, wynikających z tego zjawiska, przekracza zakres zmian wywołanych wpływem pola magnetycznego. Jest to szczególnie niekorzystne, ponieważ efekty tych zjawisk nakładają się na siebie, co w zdecydowany sposób utrudnia ich matematyczny opis. Uwzględnienie wpływu amplitudy odkształcenia i częstotliwości wymuszenia, w szerszym niż zaproponowany zakresie, wymaga przeprowadzenia większej ilości badań zorientowanych na dokładne wyznaczenie charakteru zachodzących zmian będących skutkiem dużych odkształceń poprzecznych (zmiany przekroju poprzecznego badanych próbek elastomerów magnetoreologicznych).

6. Podsumowanie i uwagi końcowe

Celem opisanych badań było kształtowanie cech materiałowych elastomerów magnetoreologicznych zorientowane na identyfikację i analizę zmian ich właściwości mechanicznych wywołanych polem magnetycznym w warunkach obciążenia ściskającego.

Omawiano szereg zagadnień dotyczących badań materiałowych oraz praktycznego wykorzystania elastomerów magnetoreologicznych w budowie maszyn. Pierwsze z nich dotyczyło doboru materiałów oraz sposobów wytwarzania próbek przeznaczonych do badań. Drugie natomiast opracowania metodyki pomiaru wybranych właściwości mechanicznych, oraz zaprojektowania i wykonania specjalistycznej aparatury pomiarowej. Kolejne zagadnienie dotyczyło modelowania odnotowanych, w trakcie eksperymentów, zmian właściwości mechanicznych badanych materiałów wywołanych wpływem pola magnetycznego. Zagadnienie czwarte dotyczyło wskazania możliwości zastosowania elastomerów magnetoreologicznych w budowie maszyn.

Cel pracy wskazywał na potrzebę przeprowadzenia badań elastomerów magnetoreologicznych w następujących kierunkach:

- doświadczalnego wyznaczenia zmian zachodzących w pętlach histerezy mechanicznej badanego elastomeru magnetoreologicznego. wynikających głównie z wartości indukcji pola magnetycznego *B* oraz amplitudy odkształcenia ε_0 ,
- określenia roli i wpływu wymienionych wielkości fizycznych na właściwości mechaniczne badanego materiału, do których zalicza się moduł Younga E oraz lepkość η ,
- wykorzystania uzyskanych wyników jako podstawy do metodycznego projektowania rzeczywistego obiektu badań.

Kierunki wymienionych prac zorientowano na potrzeby efektywnego projektowania maszyn i urządzeń przeznaczonych do absorbowania i rozpraszania energii mechanicznej. O efektywności tych procesów decyduje kształt, pole powierzchni oraz położenie względem początku układu naprężenie-odkształcenie, mechanicznych pętli histerezy.

rozważania dotyczą dwóch aspektów zwiazanych Omawiane Z metodyka przeprowadzonych prac badawczych. Pierwszy z nich dotyczył charakteru zastosowanej funkcji odkształcenia (funkcja trójkatna). Na tej podstawie zaproponowano autorki sposób wyznaczania współczynników przyjętego modelu reologicznego. W tym celu zaprojektowano niezbędne algorytmy i opracowano programy obliczeniowe. Drugi aspekt dotyczył przyjętego rodzaju obciążeń, jakim jest ściskanie, oraz jego maksymalną skalę. Jest to zdecydowanie mniej rozpoznany obszar właściwości elastomerów magnetoreologicznych. Zdecydowana większość prac dotyczy publikowania wyników badań odnoszących się do naprężeń ścinających w skali kilku, a rzadziej, kilkunastu procent. W pracy przedstawiono badania właściwości kompozytu z uwzględnieniem odkształceń rzędu 30%. Wartość ta była podyktowana wytrzymałością badanego materiału, powyżej której próbki cechowała tendencja do pękania. Wykonane badania eksperymentalne oraz analizy ich wyników wskazują zamiany jakie zachodzą w materiale który poddany jest działaniu pola magnetycznego. Zaobserwowano również zmianę wartości naprężenia będącą skutkiem postępującego odkształcenia. Podjęto próbę ich matematycznego ujęcia przy wykorzystaniu potencjału wysokoelastycznego. Zaproponowano autorskie metody modyfikacji klasycznego modelu oraz sposoby identyfikacji jego współczynników. W celu wykonania określonych w zadaniach badawczych, rzeczywistych weryfikacji właściwości materiału kompozytowego, zaprojektowano oraz wykonano autorskie stanowisko zintegrowane z układem pomiarowym oraz układem rejestracji i akwizycji danych.

Uzyskane wyniki, z dużej ilości przeprowadzonych badań laboratoryjnych, rzeczywistych i numerycznych zorientowanych na wyznaczenie właściwości mechanicznych elastomerów magnetoreologicznych pozwoliły na:
- sformułowanie materiałowego modelu elastomeru magnetoreologicznego na podstawie modelu Kelvina-Voigta z pewnymi modyfikacjami,
- wyznaczenie współczynników liniowo zależnych od indukcji przyłożonego pola magnetycznego,
- przystosowanie struktury modelu przystosowano do warunków stanu naprężeń ściskających,
- weryfikacje rzeczywiste i numeryczne, które wskazują na poprawność struktury opracowanego modelu dobrze opisującego badany materiał tylko w pewnym wybranym zakresie zmienności współczynników.

Na tej podstawie należy stwierdzić, że potwierdzono tezę pracy, osiągnięto jej główny cel w wyniku zrealizowanych zadań szczegółowych. Poszczególne etapy prac badawczych ujęto syntetycznie w ośmiu punktach. Cały zakres przeprowadzonych prac ujęto w formie schematu (rysunek 6.1).

Poszczególne etapy przeprowadzonych badań ujęto syntetycznie w poniższych punktach:

- 1. Opracowano metodykę wytwarzania elastomerów magnetoreologicznych.
- 2. Określono zbiór wymagań i parametrów procesu wykonywania i kształtowania geometrii próbek do badań.
- 3. Opracowano metodykę badań, skonstruowano specjalistyczne stanowisko pomiarowe oraz opracowano i wykonano układ pomiarowy.
- 4. Wykonano szereg badań mających na celu wyznaczenie zmiany właściwości mechanicznych elastomerów magnetoreologicznych wywołanych wpływem indukcji pola magnetycznego *B* oraz amplitudy odkształcenia ε_0 .
- 5. Zamodelowano badany materiał przy wykorzystaniu modelu reologicznego. W tym celu zaproponowano pewne modyfikacje oraz wyznaczono niezbędne współczynniki. Dotyczyło to w szczególności wartości kąta stratności φ .
- 6. Skonstruowano stanowisko do badań rzeczywistych. Dzięki temu przeprowadzono badania na fizycznym obiekcie. Wskazano, w ten sposób, na możliwości zastosowania elastomerów magnetoreologicznych w budowie maszyn co wiąże się z realizacją jednego z celów pracy.
- 7. Opracowano model numeryczny oraz wykonano wiele symulacji mających na celu wyznaczenie charakterystyk wiążących naprężenie σ , odkształcenie ε , indukcję pola magnetycznego *B* oraz ampliduę odkształcenia ε_0 . Prace zorientowano na analizę porównawczą oraz weryfikację zaproponowanego modelu. W tym celu wyznaczono niezbędne współczynniki kształtu pętli histerezy. Dotyczyło to w szczególności wartości $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ oraz $q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$.
- 8. Porównano wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych oraz badań rzeczywistych, wykazując ich zbieżność dla ściśle określonego przedziału odkształcenia. Na tej podstawie wykorzystano opracowane zależności i model, do formułowania założeń projektowych i konstrukcyjnych maszyn przeznaczonych do absorbowania i rozpraszania energii mechanicznej.



Rys. 6.1 Schematyczne przedstawienie całości wykonanych prac

Zakres zagadnień przedstawionych w niniejszej pracy nie wyczerpuje wielu problemów badawczych, jakie wiążą się z tematyką dotyczącą wytwarzania oraz modelowania właściwości mechanicznych elastomerów magnetoreologicznych. Kierunki dalszych badań, jakie można wskazać w najbliższej przyszłości to:

Poszukiwanie nowych składników metod wytwarzania elastomerów i magnetoreologicznych. Uwagę należy skupić na właściwościach magnetycznych wypełnienia ferromagnetycznego oraz właściwościach mechanicznych stosowanych elastomerów. Dobór odpowiednich składników oraz sposobów i metod ich łączenia ma duży wpływ na efektywność końcowego materiału kompozytowego. Na tej drodze możliwa jest przykładowo, maksymalizacja efektu magnetoreologicznego. Wpłynie to pozytywnie na możliwości zastosowań materiałów z tej grupy w budowie maszyn. Niezbędna jest również optymalizacja metod wytwarzania elastomerów

magnetoreologicznych w aspekcie ich produkcji seryjnej. Konieczne jest opracowanie technik gwarantujących powtarzalność ich właściwości magnetycznych i mechanicznych.

- Wyznaczenie szeregu właściwości materiałowych, które warunkują skuteczne i długotrwałe wykorzystanie elastomerów magnetoreologicznych w urządzeniach technicznych. Wśród nich wymienić można: wypływ temperatury, czasu oraz wytrzymałości zmęczeniowej, na charakterystyki omawianych kompozytów. Właściwości tworzyw elastomerowych są zależne od temperatury. Konieczne jest więc zdefiniowanie wpływu tego parametru na zmiany zachodzące w materiale kompozytowym. Właściwości tworzyw z tej grupy zależą również od czasu, ponieważ podlegają procesom starzenia. Określenie charakterystyk zmęczeniowych jest niezbędne, ponieważ gwarantują one przewidywalną pracę urządzeń tłumiących, które wykorzystują elastomer magnetoreologiczny, stanowią one większość ich proponowanych obecnie zastosowań.
- Za szczególnie istotne uważa się określenie właściwości elastomerów magnetoreologicznych poddanych wielocyklicznym obciążeniom zmiennym w czasie, o średniej i dużej częstotliwości. Konieczne jest również przeprowadzenie badań w warunkach obciążeń stycznych i osiowych. Powinny one w przyszłości obejmować analizy dotyczące złożonego stanu obciążenia elastomerów magnetoreologicznych.
- Przeprowadzenie badań, analiz i symulacji dotyczących projektowania, budowy
 i sterowania układów generujących pole magnetyczne. Skala zmian zachodzących
 w omawianych kompozytach jest silnie zależna od parametrów pola magnetycznego,
 które na nią działa. Pole magnetyczne o większym natężeniu pozwoli na szersze
 możliwości zastosowań materiałów z tej grupy. Z drugiej strony, w klasycznym
 podejściu, wygenerowanie silnego pola magnetycznego wymaga stosowania
 elementów indukcyjnych o dużych wymiarach i masie. Nie do pominięcia są również
 kwestie wydatku energetycznego związanego z zasilaniem tego typu układów. Z tych
 względów znaczenia nabierają badania mające na celu zwiększenie efektywności
 układów generowania pola magnetycznego oraz sposobów ich sterowania.
- Badania i analizy mające na celu praktyczne i komercyjne wykorzystanie elastomerów magnetoreologicznych. Główne obszary proponowanych obecnie zastosowań dotyczą tłumienia drgań mechanicznych. Wśród nich należy wyróżnić w szczególności aplikacje dotyczące transportu oraz budownictwa lądowego.

Literatura

- [1] Abramchuk S. S., Grishin D. A., Kramarenko E. Y., Stepanov G. V., Khokhlov A. R.: Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Mechanical Behaviour of Soft Magnetic Elastomers under Compression, 2006, Polymer Science, Series A, vol. 48, no. 2, pp. 138-145.
- [2] An H. N., Sun B., Picken S. J., Mendes E.: Long Time Response of Soft Magnetorheological Gels, The Journal of Physical Chemistry B, 2012, vol. 116, is. 15, pp. 4702-4711.
- [3] Ausanio G., Iannotti V., Ricciardi E., Lanotte L. Lanotte L.: Magneto-piezoresistance in Magnetorheological elastomers for magnetic induction gradient or position sensors, 2014, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 205, pp. 235-239.
- [4] Bajkowski J.: Ciecze i tłumiki magnetoreologiczne. Właściwości, budowa, badania, modelowanie i zastosowania, Warszawa 2014, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, ISBN 978-83-206-1935-5.
- [5] Banks H. T., Pinter G. A., Pottter L. K., Gaitens M. J., Yanyo L. C.: Modeling of Nonlinear Hysteresis in Elastomers under Uniaxial Tension, 1999, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 10, no. 2, pp. 116-134.
- [6] Bednarek S.: Elastomery magnetoreologiczne właściwości, technologia i zastosowania, 2003, Inżynieria Materiałowa Warszawa, r. XXIV, nr 1, s. 39-44.
- [7] Bednarek S.: Piezoinductive effect in ferromagnetic composites within an electrically conducting matrix, 1998, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 188, is. 1-2, pp. 71-84.
- [8] Bednarek S.: The coupling of magnetostriction and magnetoresistance in elastic ferromagnetic composites with conduction matrix, 1999, Materials Science and Engineering: B, vol. 63, is. 3, pp. 228-233.
- [9] Bednarek S.: The giant magnetostriction in ferromagnetic composites within an elastomer matrix, 1999, Applied Physics A: Materials Science & Processing, vol. 68, iss. 1, pp. 63-67.
- [10] Behrooz M., Wang X., Gordaninejad F.: Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastmoer isolator, 2014, Smart Materials and Structures, vol. 23, no. 4.
- [11] Bellan C., Bossis G., Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers, 2002, International Journal of Modern Physics B, vol. 16, is. 17-18, pp. 2447-2453.
- [12] Bica I., Anitas E. M., Bunoiu M., Vatzulik B., Juganatu I.: Hybrid magnetorheological elastomer: Influence of magnetic field and compression pressure on its electrical conductivity, 2014, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 20, is. 6, pp. 3994-3999.
- [13] Bica I.: Magnetoresistor sensor with magnetorheological elastomers, 2011, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 17, is. 1, pp. 83-89.
- [14] Boczkowska A., Swietjan S.: Inteligentne kompozyty magnetoreologiczne, 2013, Polimery, vol. 58, nr 6.
- [15] Boczkowska A., Awietjan S.: Microstructure and Properties of Magnetorheological Elastomers, 2012, Advanced Elastomers – Technology, Properties and Applications, chapter 6, InTech, pp. 147-180.
- [16] Boczkowska A., Awitejan S. F.: Smart composites of urethane elastomers with carbonyl iron, 2009, Journal of Materials Science, vol. 44, no. 45. pp 4104-4111.
- [17] Boczkowska A., Awietjan S.: Uretanowe elastomery magnetoreologiczne aktywowane polem magnetycznym, 2009, Polimery, vol. 26, nr 1.

- [18] Boczkowska A., Awietjan S.: Urethane Magnetorheological Elastomers Manufacturing, Microstructure and Properties, 2009, Solid State Phenomena, vol. 154, pp. 107-112.
- [19] Boczkowska A., Awietjan S.: Wpływ Mikrostruktury na Właściwości Magnetoreologicznych Elastomerów, 2009, Mechanika, zeszyt 3, rok 106.
- [20] Boczkowska A., Awietjan S., Wejrzanowski T., Kurzydłowski K. J.: Image analysis of the microstructure of magnetorheological elastomers, 2009, Journal of Materials Science, vol. 44, is. 12, pp. 3125-3140.
- [21] Boczkowska A., Awietjan S., Wróblewski R.: Microstructure-property relationships of urethane magnetorheological elastomers, 2007, Smart Materials and Structures, vol. 16, no. 5, pp. 1924-1930.
- [22] Boczkowska A., Czechowski L., Jaroniek M., Niezgoda T.: Stan naprężenia w elastomerze zawierającym cząstki ferromagnetyczne w polu magnetycznym, 2010, Mechanik, nr 7.
- [23] Borcea L., Bruno O.: On the magneto-elastic properties of elastomer-ferromagnetic composites, 2001, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 49, is. 12, pp 2877-2919.
- [24] Borin D. Y., Stepanov G. V., Odenbach S.: Tuning the tensile modulus of magnetorheological elastomers with magnetically hard powder, 2013, Journal of Physic: Conference Series, vol. 412, conference 1.
- [25] Bose H., Rabindranath R., Ehelich J.: Soft magnetorheological elastomers as new actuators for valves, 2012, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 23, no. 3, pp. 989-994.
- [26] Bose H., Roder R.: Magnetorheological Elastomers with High Variability of Their Mechanical Properties, 2009, Journal of Physics: Conference Series, vol. 149, no. 1.
- [27] Brigadnov I. A., Dorfmann A.: Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers, 2003, International Journal of Solids and Structures, vol. 40, is. 18, pp. 4659-4674.
- [28] Carlson J., Jolly M.: MR fluid, foam and elastomer devices, 2000, Mechatronics, vol. 10, is. 4-5, pp. 429-594.
- [29] Chagnon G., Verron E., Marckmann, G., Gornet L.: Development of new constitutive equations for the Mullins effect in rubber using the network alteration theory, 2006, International Journal of Solids and Structures, vol. 43, is. 22-23, pp. 6817-6831.
- [30] Chen L., Gong X., Jiang W., Yao J., Deng H., Li W.: Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber, 2006, Journal of Materials Science, vol. 42, no. 42.
- [31] Chen L., Gong X. L., Li W. H.: Effect of carbon black on the mechanical performances of magnetorheological elastomers, 2007, Polymer Testing, vol. 27, is. 3, pp 340-345.
- [32] Chen L., Gong X. L., Li W. H.: Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers, 2007, Smart Materials and Structures, vol. 16, no. 6.
- [33] Chen L., Jerrams S.: A rheological model of the dynamic behaviour of magnetorheological elastomers, 2011, Journal of Applied Physics, vol. 110.
- [34] Choi W. J: Dynamic Analysis of Magnetorheological Elastomer Configured Sandwich Structures, praca doktorska, Univesity of Southampton, Southampton 2009.
- [35] Coquelle E., Bossis G.: Mullins effect in elastomers filled with particles aligned by a magnetic field, 2006, International Journal of Solids and Structures, vol. 43, is. 25-26, pp. 7659-7672.

- [36] Danas K., Kankanala S. V., Triantafyllidis N.: Experiments and modeling of ironparticle-filled, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, vol. 60, is. 1, pp. 120-138.
- [37] Davis L. C.: Model of magnetorheological elastomers, 1999, Journal of Applied Physics, vol. 85, no. 6.
- [38] Demchuk S. A., Kuz'min A. V.: Viscoelastic Properties of Magnetorheological Elastomers in the Regime of Dynamic Deformation, 2002, Journal of Engineering Physics and Thermoplastics, vol. 75, no. 2.
- [39] Deng X. H., Gong X. L.: Adaptive Tuned Vibration Absorber based on Magnetorheological Elastomer, 2007, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 18, no. 12, pp. 1205-1210.
- [40] Deng H., Gong X.: Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber, 2008, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 13, is. 9, pp. 1938-1947.
- [41] Derski W., Ziemba S.: Analiza modeli reologicznych, Warszawa 1968, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [42] Dong X., Yu M., Liao C., Chen W.: A new variable stiffness absorber based on magneto-rheological elastomer, 2009, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 19, sup. 3, pp. 611-615.
- [43] Dorfmann A., Ogden R. W.: Magnetoelastic modeling of elastomers, 2003, European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 22, is. 4, pp. 497-507.
- [44] Dorfmann A. Ogden R. W., Saccomadni G.: Universal relations for non-linear magnetoelastic solids, 2004, International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 39, is. 10, pp. 1699-1708.
- [45] Du G., Chen X.: MEMS magnetometer based on magnetorheological elastomer, 2012, Measurement, vol. 45, is. 1, pp. 54-58.
- [46] Du H., Weihua L., Zhang N.: Semi-active variable stiffness vibration control of vehicle seat suspension using an MR elastomer isolator, 2011, Smart Materials and Structures, vol. 20, no. 10.
- [47] Dudziak M.: O problemach tarcia wewnętrznego i dyssypacji energii w gumowych pasach cięgnowych. Rozprawy nr 229, Poznań 1990, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
- [48] Dyke S. J., Spencer Jr. B. F., Sain M. K., Carlson J. D.: An Experimental Study of MR dampers for Seismic Protection, http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi= 10.1.1.126.8503&rep=rep1&type=pdf.
- [49] Eem S. H., Jung H. J., Koo J. H.: Modeling of Magneto-Rheological Elastomers for Harmonic Shear Deformation, 2012 IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11.
- [50] Elie L., Ginder J., Mark J., Nichols M., US Patent 5 814 999. Method and apparatus for measuring displacement and force, (1998).
- [51] Esther L., Piselli A., Faucheu J., Delafosse D., Del Curto B.: Smart material: development of new sensory experiences through stimuli responsive materials, 5th STS Italia Conference A Matter of Design: Making Society trough Science and Technology, June 2014, Milan, Italy, pp. 10.
- [52] Fan Y. C., Gong X. L., Jinag W. Q., Zhang W., Wei B., Li W. H.: Effect of maleic anhydride on the damping property of magnetorheological elastomers, 2010, Smart Materials and Structures, vol. 19, no. 5.
- [53] Fang S., Gong X. L., Zhang X. Z., Zhang P. Q.: Effect of pre-configuration on performance of magnetorheological elastomers, 2005, Electrorheological Fluids and

Magnetorheological Suspensions, Proceedings of the Ninth International Conference, China, 29 August – 3 September, 2004, ISBN: 978-981-256-122-0, pp. 134-139.

- [54] Farshad M., Benine A.: Magnetoactive elastomer composites, 2004, Polymer Testing, vol. 23, is. 3, pp. 347-353.
- [55] Farshad M., Le Roux M.: A new active noise abatement barrier system, 2004, Polymer testing vol. 23, is. 7, pp. 855-860.
- [56] Filipcsei G., Csetneki I., Szilagyi A., Zrinyi M.: Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites, 2007, Advanced Polymer Science, vol. 206, pp. 137-189.
- [57] Fuchs, A.; Gordaninejad, F.; Blattman, D.; Hamann, G. U.S. Pat. 6 527 972, Magnetorheological Polymer Gels, (2003).
- [58] Fuchs A., Xin M., Gordaninejad F., Wang X., Hitchock G., Gecol H., Evrensel C., Korol G.: Development and Characterization of Hydrocarbon Polyol Polyurethane and Silicone Magnetorheological Polymeric Gels, Journal of Applied Polymer Science, 2004, vol. 92, is. 2, pp. 1176–1182.
- [59] Ginder J. M., Nichols M. E., Elie L. D., Clark S. M.: Controllable-stiffness components based in magnetorheological elastomers, 2000, Proc. SPIE3985, Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems, vol. 3985.
- [60] Gong X. L., Chen L., Li J. F.: Study of Utilizable Magnetorheological Elastomers, 2007, International Journal of Modern Physics B, vol. 21, no. 28 & 29, pp. 4875-4882.
- [61] Gong X. L., Fan Y. C., Xuan S. H., Xu Y. G., Pang C.: Control of the damping properties of magnetorheological elastomers by using polycaprolactone as a temperaturecontrolling component, 2012, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 51, no. 18, pp. 6395-6403.
- [62] Gong, X. L., Zhang X. Z., Zhang P. Q.: Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers, 2005, Polymer Testing, vol. 24, is. 5, pp. 669-676.
- [63] Gordaninejad F., Wang X., Mysore P.: Behaviour of Thick Magnetorheological Elastomers, 2012, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 23, no. 9, pp. 1033-1039.
- [64] Guan X., Dong X., Ou J.: Magnetostrictive effect of magnetorheological elastomer, 2008, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 320, is. 3-4, pp. 158-163.
- [65] Guðmundsson F. B.: Preparation and Characterization of a Prototype Magnetorheological Elastomer for Application in Prosthetic Devices, praca magisterska, University of Iceland, Reykjavik 2015.
- [66] Guðmundsson Í., A Feasibility Study of Magnetorheological Elastomers for a Potential Application in Prosthetic Devices, praca magisterska, University of Iceland, Reykjavik 2011.
- [67] Guo F., Du Ch. Li R.: Viscoelastic Parameter Model of Magnetorheological Elastomers Based on Abel Dashpot, 2014, Advances in Mechanical Engineering, vol. 2014, Article ID 629386, http://ade.sagepub.com/content/6/629386.full.pdf+html.
- [68] Guojiang L, Gong X., Xuan S., Guo C., Zong L.: Magnetic-Field-Induced Normal Force of Magnetorheological Elastomer under Compression Status, 2013, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 52, is. 25, pp. 8355-8622.
- [69] Guth E.: Theory of Filler Reinforcement, 1945, Journal of Applied Physics, vol. 16, is. 1.
- [70] Haitao L., Xianghr P.: Simulation for the Microstructure and Rheology in Disperse Magnetorheological Fluids, Journal of Computers, 2012, vol. 7, no. 6.
- [71] Hoang N., Zhang N., Du H.: An adaptive tunable vibration absorber using a new magnetorheological elastomer for vehicular powertrain transient vibration reduction, 2010 Smart Materials and Structures, vol. 20, no.1.

- [72] Hoang N., Zhang N., Du H.: A dynamic absorber with a soft magnetorheological elastomer for powertrain vibration suppression, 2009, Smart Materials and Structures, vol. 18, no. 7.
- [73] Hoang N., Zhang N., Li W. H., Du H.: Development of a torsional dynamic absorber using a magnetorheological elastomer for vibration reduction of a powertrain test rig, 2013, Journal of Intelligent Material Systems, vol. 24, pp. 2036-2044.
- [74] Hu G. L., Guo M., Li W. H., Du H. P.: Experimental investigation of the vibration characteristics of a magnetorheological elastomer sandwich beam under non-homogeneous small magnetic fields, 2011, Smart Materials and Structures, vol. 20, no. 12.
- [75] Hu Y., Wang Y. L., Gong X. L., Gong X. Q., Zhang X. Z., Jiang W. Q., Zhang P. Q., Chen Z. Y.: New mangetorheological elastomers based on polyurethane/Si-rubber hybrid, vol. 24, is. 3, pp. 324-329.
- [76] Huber D. L., Martin J. E., Anderson R. A., Read D. H., Frankamp B. L.: Magnetostriction of Field Structured Magnetoelastomers, http://prod.sandia.gov
- [77] Iannotti V., Ausanio G., Lanotte L., Lanotte L.: Magneto-piezoresistivity in iron particle-filled silicone: An alternative outlook for reading magnetic field intensity and direction, 2016, eXPRESS Polymer Letters, vol. 10, no. 1, pp. 65-71.
- [78] Jérôme Claracq, Jérôme Sarrazin, Jean-Pierre Montfort. Viscoelastic Properties of Magnetorheological Fluids, Reologica Acta, 2004, vol. 43, is. 1, pp. 38-49.
- [79] Jolly M. R., Carlson J. D., Munoz B. C.: A model of the behaviour of magnetorheological materials, 1996, Samrt Materials and Structures, vol. 5, no. 5, pp. 607-614.
- [80] Jolly M. R., Carlson J. D., Munoz B. C., Bullions T. A.: The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix, 1996, Journal of Intelligent Material systems and Structures, vol. 7, no. 6, pp. 613-622.
- [81] Jonsdittir F., Guðmundsson F. B., Guðmundsson K. H., Lecomte C.: Preparation and Characterization of a prototype Magnetorheological Elastomer for Application in Prosthetic Devices, 2015, 7th ECCOMAS Thermatic Conference on Smart Structures and Materials, http://www.dem.ist.utl.pt/smart2015/files/SMART_2015_Proceedings /PDF/Papers/SMART2015_044.pdf.
- [82] Kankanala S. V., Triantafyllidis N.: On finitely strained magnetorheological elastomers, 2004, Journal of the mechanics and physics of solids, vol. 52, pp. 2869-2908.
- [83] Kaleta J.: Materiały magnetyczne SMART Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie, Wrocław 2013, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN 978-83-7493-820-4.
- [84] Kaleta J., Lewandowski D., Ziętek G.: Inelastic properties of magnetorheological composites: II. Model, identification of parameters, 2007, Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 5.
- [85] Kallio M.: The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers, praca doktorska, Tampere University of Technology, Espoo 2005
- [86] Kallio M., Lindroos T., Aalto S., Jarvinen E., Karna T., Meinander T.: Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer, 2007, Smart Materials and Structures, vol. 16, no. 2, pp. 506–514.
- [87] Kashima S., Miyasaka F., Hirata K.: Novel Soft Actuator Using Magnetorheological Elastomer, 2012, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 4.
- [88] Kicht N., Pascal L., Bossis G.: Thermoresistance and Giant Magnetoresistance of Magnetorheological Elastomers, Journal of Physics D: Applied Phisics, vol. 42, no. 10

- [89] Koo J. H., Khan F., Jang D. D., Jung H. J.: Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings, 2009, Journal of Physics: Conference Series, vol. 19, no. 1.
- [90] Krawczuk M., Palacz M., Żak A.: Materiały o sterowalnych własnościach fizycznych i ich zastosowania, Gdańsk 2009, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, ISBN 978-83-7348-285-2.
- [91] Kukla M., Górecki J., Malujda I., Talaśka K., Tarkowski P.: The Determination of Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers (MREs), Procedia Engineering, vol. 177, pp. 324-330, 2017.
- [92] Kukla M., Malujda I., Talaśka K.: Assessment of The Suitability of Mres as a Material Used for Fabrication of Robot Grippers, Machine Dynamics Research 2013, vol. 37, no. 1, pp. 73-80, ISSN: 2080-9948, 2013.
- [93] Kukla M., Malujda I., Talaśka K., Jurczyński W.: Elastomery magnetoreologiczne w konstrukcji chwytaka robota przemysłowego, Inżynieria Wytwarzania, Kalisz 2014, Wydawnictwo Uczelnianie, s. 65-72, ISBN 978-83-64090-41-7
- [94] Kukla M., Tarkowski P. Górecki J., Malujda I., Talaśka K.: The Effect of Magnetic Field on Magnetoroheological Composites. Artificial Neural Network Based Modeling and Experiments, Applied Mechanics and Materials, vol. 816, pp. 327-336, 2015.
- [95] Lewandowski D.: Właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2005.
- [96] Li J. F., Gong X. L., Xu Z. B., Jiang W. Q.: Effect of pre-structure process on magnetorheological elastomer performance, 2008, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 99, no. 12, pp. 1358-1364.
- [97] Li W. H., Zhang X. Z.: A study of the magnetorheological effect of bimodal particle based magnetorheological elastomers, 2010, Smart Materials and Structures, vol. 19, no. 3.
- [98] Li W., Zhang X., Du H.: Development and simulation evaluation of a magnetorheological elastomer isolator for seat vibration control, 2012, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 23, no. 9, pp. 1041-1048.
- [99] Li W. H., Zhou Y., Tian T. F.: Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading, 2010, Rheologica Acta, vol. 49, is. 7, pp. 733-740.
- [100] Li Y., Li. J: A Highly-Adjustable Base Isolator Utilizing Magnetorheological Elastomer: Experimental testing and Modeling, 2014, Journal of Vibration and Acoustics, vol 137, is. 1.
- [101] Li Y., Li J., Li W., Samali B.: Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator, 2013, Smart Materials and Structures, vol. 22, no. 3.
- [102] Li. Y., Li. J., Li W., Du. H.: A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices, 2014, Smart Materials and Structures, vol. 23, no. 12, pp. 123001-123024.
- [103] Liao G. J., Gong X. L., Kang C. J., Xuan S. H.: The design of an active-adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer and its vibration attenuation performance, 2011, Smart Materials and Structures, vol. 20, no. 7.
- [104] Liao G. J., Gong X. L., Xuan S. H., Kang C. J., Zong L. H.: Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer, 2012, Journal of intelligent Material System and Structures, vol. 23, no. 1, pp. 25-33.
- [105] Lokander M.: Performance of Magnetorheological Rubber Materials, praca doktorska, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Sztokholm 2004.

- [106] Lokander M., Stenberg B., Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials, 2003, Polymer Testing, vol. 22, is. 6, pp. 677–680.
- [107] Lord Corporation, Materials Division. MR Controllable Friction Damper RD-1097-01, Product Bulletin, http://www.lord.com.
- [108] Lu X. S., Qiao X. Y., Watanabe H., Gong X. L., Yang T., Li W., Sun K., Li M., Yang K., Xie H. G., Yin Q., Wang D., Chen X. D.: Mechanical and structural investigation of isotropic and anisotropic thermoplastic magnetorheological elastomer composites based on poly(styrene-b-ethyleneco- butylene-b-styrene) (sebs), 2011, Rheologica Acta, vol. 51, is. 1, pp. 37–50.
- [109] Marvalova B.: Modeling of Magnetosensitive Elastomers, On Modeling and simulation; Petrone, G., Cammarata, G., Eds.; I-Tech Education and Publishing Vienna, 2008; Chapter 15, pp 245–260.
- [110] Miedzińska D., Boczkowska A., Zubko K.: Numerical verification of three point bending ezpriment of magnetorheological elastomer (MRE) in magnetic field, 2010, Journal of Physics: Conference Series, vol. 240, no. 1.
- [111] Miedzińska D., Niezgoda T., Boczkowska A.: Various Approaches to Magnetorheological Elastomers Structures Fe Modeling, 2010, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 17, no. 1, pp. 255-260.
- [112] Miedzińska D., Sławiński G., Boczkowska A.: Numerical Simulation of the Beam Made of Magnetorheological Elastomer Bending in the Magnetic Field, 2010, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 17, no. 1, pp. 261-265.
- [113] Milecki A.: Ciecze elektro i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice, Poznań 2010, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7143-872-1.
- [114] Mitsumata T., Ohori S.: Magnetic Polyurethane Elastomers With Wide Range Modulation of Elasticity, 2011, Polymer Chemistry, vol. 2, is. 5, pp. 1063-1067.
- [115] Naimzad A., Ghodsi M., Hojjat Y., Maddah A.: MREs Development and Its Application on Miniature Gripper, Proc. Int. Conf. on Advanced Materials Engineering, Singapore, IPCSIT 2011, 15: 75-80 (2011).
- [116] Naimzad A., Hojjat Y., Ghodsi M: Comparative Study on Mechanical and Magnetic Properties of Porous and Nonporous Film-shaped Magnetorheological Nanocomposites Based on Silcone Rubber, 2014, International Journal of Innovative Science and Modern Engineering, vol. 2, is. 8, pp. 11-20.
- [117] Ni Z. C., Gong X. L., Li J. F., Chen L.L Study on a Dynamic Stiffness-tuning Absorber with Queeze-strain Enhanced Magnetorheological Elastomer, 2009, Journal of intellignet Material Systems and Structures, vol. 20, no. 10, pp. 1195-1202.
- [118] Pękalak M., Radkowski S.: Gumowe elementy sprężyste, Warszawa 1989, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, ISBN 83-01-08036-1.
- [119] Popp K. M., Kröger M., Li W., Zhang X., Kosasih P. B.: MRE Properties under Shear and Squeeze Modes and Applications, 2010, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 21, no. 15, pp. 1471-1477.
- [120] PN-ISO 23529: Guma. Ogólne zasady przygotowania I kondycjonowania próbek stosowanych do badań metodami fizycznymi.
- [121] PN-ISO 37:2007: Guma i kauczuk termoplastyczny. Oznaczanie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu.
- [122] PN-54/C-04253: Guma. Oznaczanie odkształcenia przy ściskaniu.
- [123] PN-87/C-04289: Guma. Oznaczanie tłumienia względnego w warunkach naprężeń ściskających.

- [124] PN-93/C-04210 (idt ISO 1827:1991): Guma i elastomery termoplastyczne. Oznaczanie modułu przy ścinaniu oraz wytrzymałości połączenia z płytkami z materiałów sztywnych. Medtoda ścinania czterech powierzchni.
- [125] Qiao X., Lu X., Li W., Chen J., Gong X., Yang T., Li W., Sun K., Chen X.: Microstructure and magnetorheological properties of the thermoplastic magnetorheological elastomer composites containing modified carbonyl iron particles and poly(styrene-b-ethylene-ethylenepropylene-b-styrene) matrix, 2012, Smart Materials and Structures, vol. 21. no. 11.
- [126] Rabinow J.: U. S. Pat. 2 575 360, Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device, (1951).
- [127] Sapiński B., Snamina J., Maślanka M., Rosół M.: Facility for Testing of Magnetorheological Damping Systems for Cable Vibrations, 2006, Mechanics, vol. 25, no. 3, pp. 135-142.
- [128] Schrittesser B., Major Z., Filipcsei G: Characterization of the dynamic mechanical behavior of magneto-elastomers, Journal of Physics: Conference Series, vol. 149, no. 1.
- [129] Shiga, T.; Fujimoto, S.; Hirose, M.; Okada, A.; Kurauchi, N.; Uegakito, O. Jpn. Pat. 05-25316 (1993).
- [130] Shen Y., Golnaraghi M. F., Heppler G. R.: Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers, 2004, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 15, no. 1, pp. 27-35.
- [131] Shouhu X., Yangguang X., Taixiang L., Xinglong G.: Recent progress on the magnetorheological plastomers, International Journal of Smart and Nano Materials, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 135-148.
- [132] Simon T. M., Ito K., Banks H. T., Reitich F., Jolly M. R.: Estimation of the Effective Permrability in Magnetorheological Fluids, 1999, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 10, pp. 845-854.
- [133] Simon T. M., Reitich F., Jolly M. R., Ito K., Banks H. T.: The Effective Magnetic Properties of Magnetorheological Fluids, Mathematical and Computer Modeling, Mathematical and Computer Modeling, 2001, vol. 33, is. 1-3, pp. 273-384
- [134] Sinko R., Karnes M., Koo J. H., Kim Y. K., Kim K. S.: Design and test on an Adaptive Vibration Absoreber Based on Magnetorheological Elastomers and a Hybrid Electormagnet, 2013, Journal of Intellignet Material Systems and Structures, vol. 23, no. 7, pp. 803-812.
- [135] Sławiński G., Miedzieńska D., Niezgoda T., Boczkowska A.: Experimental researches of magnetorheological elastomers stiffness changes under external magnetic field, CMM-2011 – Computer Methods in Mechanic, 9-12 May 2011, Warsaw, Poland.
- [136] Songjing L., Wen B.: Influence of magnetic fluids on the dynamic characteristics of a hydraulic servo-valve torque motor, Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, vol. 22, is. 4, pp. 1008-1015.
- [137] Song H. J., Wereley N. M., Bell R. C., Planinsek J. L., Filer II J. A.: Field dependent response of magnetorheological elastomers utilizing spherical Fe particles versus Fe nanowires, 2009, Journal of Physics: Conference Series, vol. 149, no. 1.
- [138] Spencer Jr. B. F., Yang G., Carlson J. D., Sain M. K.: "Smart" Dampers foe Seismic Protection of Structures: A Full-Scale Study, Presented at the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, June 28 – July 1, 1998.
- [139] Stepanov G., Borin D., Odenbach S.: Magnetorheological effect of magneto-active elastomers containing large particles, 2009, Journal of Physics: Conference Series, vol. 149, no 1.

- [140] Sun S. S., Chen Y., Yang J., Tian T. F., Deng H. X., Li W. H., Du H., Alici G.: The development of an adaptive tuned magnetorheological elastomer absorber working in squeeze mode, 2014, Smart Materials and Structures, vol. 23, no. 7.
- [141] Sun T., Gong X., Jiang W., Li J., Xu Z., Li W.: Study on the damping properties of magnetorheological elastomers based on cis-polybutadiene rubber, 2008, Polymer Testing, vol. 27, is. 4, pp. 520-526.
- [142] Szeląg W.: Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną, Poznań 2010, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7143-879-0.
- [143] Tao R.: Super-strong magnetorheological fluids, Journal of Physic: Condensed Matter, vol. 50, no. 50, pp. 979-999.
- [144] Wang Y., Hu Y., Chen L., Gong X., Jiang W., Zhang P., Chen Z.: Effects of rubber/magnetic particle interactions on the performance of magnetorheological elastomers, 2006, Polymer Testing, vol. 25, is. 2, pp. 262-267.
- [145] Wang Y., Hu Y., Gong X., Jiang W., Zhang P., Chen Z: Preparation and Properties of Magnetorheological Elastomers Based on Silicon Rubber/Polystyrene Blend Matrix, 2006, Journal of Applied Polymer Science, vol. 103. is. 5, pp. 3143-3149.
- [146] Wu J., Gong X., Chen L., Xia H., Hu Z.: Preparation and Characterization of Isotropic Polyurethane Magnetorheological Elastomer Through In Situ Polymerization, 2009, Applied Polymer, vol. 114, is. 2, pp. 901-910.
- [147] Wu J. K., Gong X. L., Fan Y. C., Xia H. S.: Improving the magnetorheological properties of polyurethane magnetorheological elastomer through plasticization, 2012, Journal of Applied Polymer Science, vol. 123, is. 4, pp. 2476-2484.
- [148] Wu J., Gong Z., Fan Y., Xia H.: Anisotropic polyurethane magnetorheological elastomer prepared trough in situ polycondensation under a magnetic field, 2010, Smart Materials and Structures, vol. 19, no. 10.
- [149] Xu Z., Gong X., Liao G., Chen X.: An Active-damping-compensated Magnetorheological Elastomer Adaptive Tuned Vibration Absorber, 2010, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 21, no. 10, pp. 1039-1047.
- [150] Yangguang X., Shouhu X.: Soft magnetorheological polymer gels with controllable rgeological properties, Smart Materials and Structures, vol. 22, no. 7.
- [151] Yangguang X., Xinglong G., Taixiang L., Shouhu X.: Squeeze flow behaviours of magnetorheological plastomers under constant volume, Journal of Rheology, 2014, vol. 58, is. 3.
- [152] York D., Wang X., Gordaninejad F.: A New MR Fluid-Elastomer Vibration Isolator, 2007, Journal of Intelligent Material System and Structures, vol. 18, no. 12, pp. 1221-1225.
- [153] Yu Y., Li Y., Li. J: Parameter identification of a novel strain stiffening model for magnetorheological elastomer base isolator utilizing enhanced particle swarm optimization, 2015, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 26, no. 18., pp. 2446-2462.
- [154] Zaborski M., Masłowski M.: Magnetorheological Elastomer Composites, 2011, Progress in Colloid and Polymer Science XXIV, vol. 138, pp. 21-25.
- [155] Zając P.: Właściwości tłumiące elastomerów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2014.
- [156] Zehui J., Kunquan L.: A Single-Chain Model for Quasi-Static Shear Stress-Strain Properties of Magnetorheological Fluids, International Journal of Modern Physics B, 2002, vol. 16, is. 17n18.
- [157] Zhang W., Gong X. L., Chen L.: A Gaussian distribution model of anisotropic magnetorheological elastomers, 2010, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 322, is. 23, pp. 3797-3801.

- [158] Zhang W., Gong X., Xuan S., Jiang W: Temperature-Dependent Mechanical Properties and Model of Magnetorheological Elastomers, 2011, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 50, no. 11., pp. 6704-6712.
- [159] Zhang X., Li W., Gong X. L: An effective permeability model to predict field-dependent modulus of magnetorheological elastomers, 2008, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. vol. 13, is. 9, pp. 1910-1916.
- [160] Zhou G. Y.: Shear properties of a magnetorheological elastomer, 2003, Smart Materials and Structures, vol. 12, no. 1.
- [161] Zhou Y., Li W., Zhang X., Kostidis K.: Development of a force sensor working with MR elastomers, 2009, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 14-17, Singapore.
- [162] Zuriini, M., Osada, Y., Toyosawa, S. Jpn. Pat. 10-296074 (1998).
- [163] Zyrini, M., Gacs, J., Simon, C. Int. Pat. No. WO 97/02580, Magnetic Field Sensitive Polymer Gels and Uses Thereof, (1997).
- [164] http://academic.uprm.edu/pcaceres/Undergrad/Smart-Alessandra/id18.htm
- [165] http://edge.rit.edu/edge/P07307/public/LORD%20MR%20Fluid; nota katalogowa firmy Lord Corporation.
- [166] http://www.matint.pl/index.php
- [167] http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7012.pdf; nota katalogowa firmy Lord Corporation.
- [168] http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7027.pdf; nota katalogowa firmy Lord Corporation.

Shaping the material properties of magnetorheological elastomers in mechanical engineering

Abstract

The topic of this work concerns the analysis of mechanical properties of the structural elements of the machines made of magnetorheological materials. This research is exploratory in nature and is focused on determining the influence of the constant magnetic field on selected mechanical properties of the composites under investigation. In the course of research, the necessary material constants used to formulate the rheological model characterizing their mechanical properties have been determined. This made it possible to carry out the analysis and modelling necessary from the scientific and engineering perspective. On this basis, the construction phase of sample elements made of magnetorheological elastomers has been undertaken. The research objectives, whose description can be found in the following six chapters of this dissertation, have been formulated.

Chapter one includes the introduction and is preceded by the list of key symbols used further in the dissertation.

Chapter two explores the state of knowledge about magnetorheological materials and their application in machine design. Attention has been paid to research results presented in both foreign and domestic publications. The characteristics of the most commonly used material models have been presented in detail. In addition, the examples of the application of the structural elements made of magnetorheological elastomers have been discussed.

Chapter three presents research and project work done by the author. The issues related to the selection of the most effective contents of the composites have been discussed with regards to the technology of shaping geometrical parameters of the produced samples. The description of the designed and manufactured test and measurement stand has been discussed in detail. The research methodology has been presented, together with the schedule and the wide-ranging discussion of the results.

Chapter four includes the issues related to the formulation of the rheological model of the composites under investigation. The selected rheological model has been discussed in detail. The method of determining the material parameters that make up its structure using the custom-made software algorithm has also been included. For further calculations, the numerical software has been used for simulation purposes.

Chapter five describes the practical application of the studied magnetorheological elastomer and the design of the test stand. The results of research and their comparison with the results obtained through numerical simulation have also been included. Special attention has been paid to the comparative analysis of the accuracy of reproduction of the real characteristics of the composite with the developed mathematical material model.

Chapter six contains the summary and conclusions, with a particular focus on the nature of the results of research and simulation. Also, further directions of research into the characteristics of materials and phenomena occurring in magnetorheological elastomers have been proposed. The work ends with the list of references.