

## Streszczenie

Przedmiotem zainteresowania było określenie możliwości wytworzenia kompozytów na bazie proszku z materiału o gigantycznej magnetostrykcji jakim jest Terfenol-D, które będą posiadały zaprogramowaną magnetyczną strukturę wewnętrzną (wprowadzoną anizotropię magnetyczną). Celem poznawczym pracy była identyfikacja właściwości magnetomechanicznych nowo wytworzonych materiałów kompozytowych i porównanie ich z materiałem litym. Kluczowym zadaniem było opracowanie technologii wytwarzania kompozytu obejmującej procedury: doboru składu, parametrów wiązania, eliminacji utleniania proszku, metod odpowietrzania oraz uzyskiwania pożądanego kształtu próbki. Zaproponowano ponadto metodę polaryzacji proszku w obiekcie badań, z wykorzystaniem pola magnetycznego o silnym natężeniu. Zaprojektowano i wytworzono w tym celu odpowiednie stanowisko technologiczne. W rezultacie wytworzono szereg próbek o różnej zawartości proszku Terfenolu-D w kompozycie. Zaprojektowano i wytworzono oryginalne stanowisko badawcze umożliwiające zadawanie, pomiar oraz przetwarzanie wielkości magnetycznych i mechanicznych, zarówno quasi-statycznych, jak i cyklicznych. Wykorzystano w tym celu standardowe komponenty (np. pulsator hydrauliczny z komputerem PC i kartą pomiarową oraz układ do pomiaru odkształcenia z wykorzystaniem światłowodowych siatek Bragga) oraz liczne oryginalne podzespoły, np. hybrydowy układ sensor/aktuator do badania prętów magnetostrykcyjnych [431]. Zestawione oryginalne stanowiska badawcze pozwoliły na określenie wpływu przyłożonego pola mechanicznego i natężenia pola magnetycznego na wielkość uzyskiwanej magnetostrykcji. Dodatkowo w ograniczonym zakresie określona została magnetostrykcja objętościowa oraz efekt Villariego.

Celem aplikacyjnym pracy było wykonanie wzbudnika magnetostrykcyjnego, w którym, jako element aktywny, zostałby wykorzystany nowo wytworzony materiał kompozytowy, cechujący się najlepszymi parametrami magnetomechanicznymi. Ponadto przyjęto, że sterowanie nieliniowym układem wzbudnika będzie się odbywało z wykorzystaniem światłowodowych czujników z siatkami Bragga, umożliwiającymi kompensację dryftu temperaturowego. Układ wzbudnika magnetostrykcyjnego składał się z nowo wytworzonego kompozytu z proszkiem Terfenolu-D, cewki indukcyjnej oraz sprężyny odpowiedzialnej za wytworzenie stanu naprężenia wstępnego w materiale magnetostrykcyjnym. Całość układu zamknięto w obudowie zapewniającej najmniejszy opór magnetyczny. Układ taki pozwalał na generowanie statycznego przemieszczenia oraz drgań przez wytworzenie pola magnetycznego w materiale magnetostrykcyjnym poprzez cewkę indukcyjną. Wzbudnik magnetostrykcyjny był w rzeczywistości skomplikowanym układem elektro-magneto-mechanicznym.

Autor dokonał przeglądu ponad 350 prac dotyczących magnetostrykcji, kompozytów magnetostrykcyjnych oraz aplikacji materiałów magnetostrykcyjnych w rzeczywistych konstrukcjach. Analiza literatury pozwoliła na stwierdzenie, że brak jest prac eksperymentalnych, które potwierdziłyby roz-



ważania teoretyczne na temat wpływu wprowadzenia anizotropii magnetycznej do materiałów kompozytowych na ich właściwości magnetomechaniczne. W literaturze przedmiotu wspomniano jedynie o możliwości zastosowania anizotropii magnetycznej w materiałach kompozytowych oraz potencjalnych skutkach, jakie zabieg ten może nieść ze sobą [124,357].

Zestawiono układ pomiaru natężenia pola magnetycznego (z użyciem sondy Halla). Wykorzystano oryginalny układ do pomiaru temperatury, który zaprojektowano i wytworzono w sposób dedykowany do opisanych eksperymentów. Do akwizycji, przetwarzania i wizualizacji sygnałów wykorzystano specjalistyczny pakiet oprogramowania HP-VEE 5.0. Przeprowadzono następnie eksperymenty, które pozwoliły uzyskać charakterystyki mechaniczne i magnetomechaniczne. Wyznaczono wartość modułu Younga (bez stymulacji polem magnetycznym) dla kompozytu o różnym składzie oraz dla czystej żywicy, a także litego Terfenolu-D. Następnie zbadano magnetostrykcję kompozytów, a wyniki pomiarów przedyskutowano i porównano z wartościami dla litego Terfenolu-D. Wykazano, iż magnetostrykcja w wytworzonych kompozytach jest co prawda niższa niż w litym Terfenolu-D, ale nadal kilkadziesiąt razy większa niż np. w niklu. Stwierdzono ponadto, w przypadku kompozytów - brak efektu nasycania pod wpływem zastosowanych wartości natężenia pola magnetycznego oraz liniowy charakter magnetostrykcji w funkcji natężenia pola magnetycznego  $H$ .

Stwierdzono, że wytworzone kompozyty charakteryzują się małą wartością tłumienia magnetomechanicznego, czego przejawem jest niewielka pętla histerezy magnetomechanicznej. Zastosowanie kompozytu spowodowało również wyeliminowanie prądów wirowych, co umożliwia aplikacje w zakresie wysokich częstotliwości pracy (powyżej 20 kHz). Wykazano ponadto, że magnetostrykcja w wyprodukowanych kompozytach w dużej mierze zależy od zawartości objętościowej Terfenolu-D. Rezultaty uzyskane w pracy stwarzają podstawy do podjęcia kolejnego zagadnienia, jakim jest modelowanie magnetostrykcji w kompozycie z proszkiem Terfenolu-D.

W dalszej części przeprowadzono badania mikrostruktury wytworzonych materiałów oraz ich właściwości magnetycznych w stałym i zmiennym polu magnetycznym. Stwierdzono, iż procedura wytwarzania kompozytów nie miała wpływu na budowę krystalograficzną wykorzystywanego proszku Terfenolu-D. Dodatkowo badania magnetyczne wytworzonych materiałów kompozytowych pozwoliły na korelację ich właściwości magnetycznych z uzyskiwanymi efektami magnetosprężystymi. Ponadto analiza rezultatów otrzymanych w przypadku badań kompozytów w zmiennym polu magnetycznym pokazała znaczne zredukowanie strat pochodzących od prądów wirowych w porównaniu z materiałem litym.

Następnie zaprezentowano przykłady własnych aplikacji wytworzonego kompozytu z proszkiem materiału o gigantycznej magnetostrykcji. Aplikacje dotyczyły dwóch typów aktuatorów magnetostrykcyjnych oraz urządzenia do konwersji energii mechanicznej w postaci siły na użyteczną energię elektryczną w obszarze odzyskiwania energii (ang.: Energy Harvesting). Zbudowano między innymi wzbudnik magnetostrykcyjny, którego zadaniem było generowanie drgań w wąskim zakresie częstotliwości do 1Hz. Koncepcja urządzenia przewidywała zastosowanie go w obszarze biomedycyny, w celu

stymulacji tkanki kostnej w trakcie leczenia m.in. złamań. Przeprowadzono symulacje komputerowe, pozwalające na określenie optymalnej konfiguracji rdzenia aktuatora, w celu osiągnięcia założonych parametrów, a także skonstruowano wzбудnik pozwalający na weryfikację symulacji komputerowych. W drugim przypadku przeprowadzono badania mające na celu określenie możliwości pracy aktuatora z rdzeniem z kompozytu magnetostrykcyjnego w układach sprzężenia zwrotnego. W tym celu wykorzystano regulator PID, powszechnie stosowany w automatyce przemysłowej. Możliwości aktuatora zaprezentowano w przypadku obciążenia quasi-statycznego oraz cyklicznego. Dla obu przypadków obciążenia wykazano użyteczność zaproponowanej metody sterowania wzbudnikiem za pomocą układu sprzężenia zwrotnego z regulatorem PID, co daje podstawy do aplikacji rozwiązania w rzeczywistych konstrukcjach inżynierskich, jako precyzyjnego pozycjonera magnetostrykcyjnego. Jako trzecią aplikację przedstawiono urządzenie do odzyskiwania energii elektrycznej z impulsu siły mechanicznej (ang.: Harvester). W urządzeniu wykorzystano właściwość materiałów magnetostrykcyjnych jaką jest efekt Villarięgo. Opracowane urządzenie wykorzystujące kompozyt z proszkiem Terfenolu-D było w stanie dostarczyć do mikrokontrolera prąd wystarczający do jego pracy przez 3ms.

Rezultaty otrzymane w rozprawie zostały zebrane w formie wniosków i uwag końcowych. W końcowej części pracy zaproponowano też niektóre z możliwych dalszych dróg rozwoju związanych z obszarem dysertacji oraz umieszczono prognozy w zakresie dalszej aplikacji kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych.

Zgromadzony w trakcie przygotowywania rozprawy dorobek naukowy został opublikowany w czterdziestu pracach (czasopismach, recenzowanych materiałach konferencyjnych, czy jako rozdziały książek), których autorem lub współautorem jest doktorant.