

Lucjan KOZIELSKI

Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych, ul. Rolna 43, Katowice; e-mail: lucjan.kozielski@wst.com.pl

Katarzyna ŁUCZAK

Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych, ul. Rolna 43, Katowice; e-mail: katarzyna.luczak@wst.com.pl

s. 145-150

AKTUATOR PIEZOELEKTRYCZNY WYKONANY Z WŁÓKNA CERAMICZNEGO

STRESZCZENIE

Współcześnie stosowane w szeroko pojętej automatyce i mechatronice urządzenia wykonawcze (aktuatory) stawiają duże wymagania inżynierii materiałowej. Materiałom przeznaczonym na aktuatory stawia się wysokie wymagania dotyczące ich twardości, sztywności oraz wytrzymałości i lekkości. Umożliwia to zwiększenie dokładności obróbki i miniaturyzację produktów. Największe zastosowanie w tego typu urządzeniach znalazły materiały piezoelektryczne. Aktuatory na bazie ceramiki piezoelektrycznej między innymi są wykorzystywane jako części układów napędowych w motoryzacji (piezoelektryczne wtryskiwacze paliwa), w automatyzacji procesów przemysłowych jako siłowniki do precyzyjnych robotów, w awionice do zmiany geometrii skrzydeł samolotów [1,2]. Największą ich zaletą jest wysoka wytrzymałość mechaniczna i duża odporność na trudne warunki oraz bardzo krótki czas reakcji poniżej 1 ms. Aktuatory tego typu wykonywane są najczęściej z litej ceramiki piezoelektrycznej, która jest materiałem kruchym o dużej gęstości. W artykule została zaproponowana innowacyjna metoda wytwarzania piezoceramicznych materiałów do aplikacji aktuatorowych w formie włókien ceramicznych pozwalającą na ominięcie ograniczeń związanych z naprężeniami wewnętrznymi ceramiki w formie objętościowej.

SŁOWA KLUCZOWE

materiały piezoelektryczne, aktuatory, włókna ceramiczne

WSTĘP

Rozwój materiałów piezoelektrycznych jest obecnie uwarunkowany przede wszystkim zapotrzebowaniem na nowe aktuatory i sensory. Materiały piezoelektryczne przetwarzają energię elektryczną w mechaniczną i odwrotnie. W piezoelektrykach zachodzi zjawisko polegające na zmianie kształtu ciała pod wpływem siły, która powoduje powstanie wewnętrznego pola elektrycznego i nazywa się zjawiskiem piezoelektrycznym prostym. Natomiast tzw. zjawiskiem piezoelektrycznym odwrotnym jest umieszczenie materiału w polu elektrycznym, co prowadzi do zmiany jego wymiarów. Zjawisko to powstaje tylko w pewnych ciałach stałych, mających uporządkowaną budowę atomową i wykazujących właściwą symetrię tej budowy [1,2,3]. Przetwarzanie energii przez materiały piezoelektryczne powoduje, że znajdują one zastosowanie w wielu urządzeniach.

Aktuatory wykorzystują prosty efekt piezoelektryczny, natomiast sensory działają w oparciu o odwrotny efekt piezoelektryczny [2].

Najbardziej popularnymi materiałami piezoelektrycznymi są materiały ceramiczne. Wśród nich największe znaczenie w technice znalazły: tytanian baru (BaTiO_3), tytanian ołowiu (PbTiO_3), cyrkonian - tytanian ołowiu (PZT), niobian ołowiu i magnezu (PMN) [3,4]. W klasycznej technologii piezoelektrycznych materiałów ceramicznych, materiałami wyjściowymi są tlenki metali, które miesza się w odpowiednich proporcjach i frakcjonuje w celu ograniczenia wielkości cząstek [5]. Następnie mieszanina tlenków poddawany jest procesowi kalcynacji i mieleniu na mokro lub na sucho. Kolejnym etapem jest zagęszczanie proszku na drodze prasowania w obecności substancji poprawiających ten proces. Tak powstałe próbki poddawane są syntezie w temperaturach z zakresu 800°C - 1200°C . Zsyntezowane próbki są ponownie mielone i prasowane w obecności substancji zlepiających, a następnie spiekane w temperaturze z 1200 - 1300°C . W celu uzyskania materiału o optymalnej jakości proces spiekania jest przeprowadzany, dwa lub trzy w zależności od rodzaju ceramiki. Uzyskany materiał poddaje się obróbce mechanicznej, a następnie na jego powierzchnię nanosi się warstwy metaliczne stanowiące elektrody. Ostatnim etapem procesu technologicznego jest polaryzacja materiału. Proces polaryzacji przebiega w obecności stałego pola elektrycznego o natężeniu rzędu $2,5$ - $4,5\text{mV/m}$, w temperaturze pokojowej lub temperaturach z zakresu 100 - 150°C . Czas polaryzacji wynosi zwykle od 10 do 12 minut. Największymi wadami tradycyjnych metod otrzymywania ceramiki piezoelektrycznej są problemy w zachowaniu pożądanej stechiometrii związku oraz nie do końca kontrolowane zdefektowanie, które prowadzi do niejednorodności struktury otrzymanego materiału [2,5].

Ceramika piezoelektryczna jest materiałem kruchym o dużej gęstości, co znacznie ogranicza możliwości jej zastosowania [3,5]. Odpowiedzią na te niedostatki są polimery piezoelektryczne, które charakteryzuje znacznie mniejsza kruchość w porównaniu z materiałami ceramicznymi oraz znacznie większa elastyczność. Ponadto odznaczają się one wyraźnie niższą impedancją właściwą, korzystniejszą z punktu widzenia niektórych zastosowań oraz dużo większą elastycznością [5,6]. Proces produkcji polimerów piezoelektrycznych jest tani i mało skomplikowany. Obecnie produkcja czujników na bazie piezoelektrycznych polimerów rozwija się znacznie szybciej w porównaniu z czujnikami z innych materiałów. W skład grupy polimerów piezoelektrycznych wchodzi między innymi: polipropylen, polistyren, polimetakrylan metylu), semikrystaliczny poliamid (nylon 11), amorficzny octan winylu, polimoczniki, polimery ciekłokrystaliczne [6]. Najsilniejszym piezoelektrykiem wśród polimerów jest polifluorek winylibdenu (znany jako PVDF), oraz jego kopolimery. Jest on elastyczny i bardzo szybko reaguje na zewnętrzne bodźce, co sprawia, że nadaje się na wszelakiego rodzaju czujniki naprężeń mechanicznych [5,6]. Coraz szersze zastosowanie w aplikacjach aktuatorowych znajdują również kompozyty piezoelektryczne ceramika-polimer. Właściwości kompozytów piezoelektrycznych zależą od właściwości komponentów i ich wzajemnego rozmieszczenia. Najczęściej wytwarzany jest kompozyt, w którym cząstki ceramiczne rozmieszczone są w polimerowej osnowie ale można również otrzymać struktury, w których ceramika i polimer tworzą dwa ciągłe, przenikające się szkielety. Wiele prac jest poświęconych kompozytom, w którym równoległe włókna ceramiczne są rozmieszczone w kierunku polaryzacji w polimerowej osnowie [5,6]. Osnowa polimerowa powoduje otrzymanie kompozytu o większej odporności na kruche pękanie w stosunku do ceramicznych materiałów piezoelektrycznych, zmniejszenie gęstości oraz przede wszystkim obniżenie stałej dielektrycznej. Podsumowując należy stwierdzić, że wśród materiałów piezoelektrycznych do aplikacji aktuatorowych zastosowanie znalazły materiały ceramiczne, polimery oraz kompozyty ceramika-polimer.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań siłownika piezoelektrycznego, który przekształca sygnał elektryczny w ściśle kontrolowane fizyczne przemieszczenia.

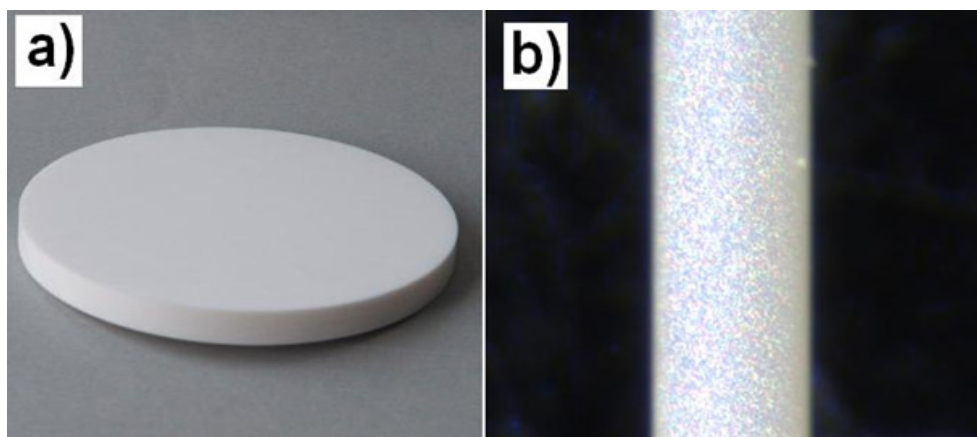
W przypadku gdy przemieszczenie jest niemożliwe wtedy sygnał elektryczny jest przetwarzany na proporcjonalną siłę. Napędy piezoelektryczne kontrolując ruch z dużą dokładnością umożliwiają precyzyjną regulację pracy narzędzi obróbczych, a także soczewek, lusterek lub innych urządzeń. Siłowniki piezoelektryczne są również wykorzystywane do sterowania zaworów hydraulicznych, działają jako pompy małych objętości lub silniki do specjalnych zastosowań wymagających mikro pozycjonowania. Aktuatory wykorzystywane w wyżej wymienionych rozwiązaniach wykonywane są z litej ceramiki piezoelektrycznej. Autorzy niniejszego artykułu przeprowadzili eksperyment polegający na wykonaniu takich siłowników w formie włókien piezoelektrycznych o średnicy 250 mikrometrów i dokonaniu analizy porównawczej uzyskiwanych przez -mieszkań liniowych w stosunku do aktuatora wykonanego z ceramiki objętościowej [7,8,9].

2. Badania własne

Badaniom poddano piezoelektryczny materiał ceramiczny PLZT o składzie: $(\text{Pb}_{0,93}\text{La}_{0,07})(\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})\text{O}_3$. Materiał został wytworzony w formie litej ceramiki oraz włókien dwoma sposobami.

Ceramiczne lite dyski o średnicy 10 mm otrzymano klasyczną dla materiałów ceramicznych technologią podczas wysokotemperaturowej syntezy tlenków (ang. mixed oxide method MOM). Użyte składniki wyjściowe to tlenki PbO , ZrO_2 , TiO_2 i La_2O_3 , a etapy technologiczne to mieszanie tlenków na mokro, suszenie i przesiewanie, kalcynacja mieszaniny proszków w 950°C przez 3 h, a następnie prasowanie zsyntetyzowanego proszku w formie dysków oraz ich finalne spiekanie w 1250°C przez 2 h. Włókna piezoelektryczne o średnicy $250\ \mu\text{m}$ były formowane z mieszaniny wyżej wymienionych tlenków wykorzystując metodą ekstruzji. W ten sposób otrzymano, jako półprodukt, ceramiczne włókna wymagające dalszej obróbki technologicznej. Kolejny etap preparacji polegał na ich syntezie i spiekaniu w warunkach identycznych jak miało to miejsce w przypadku litej ceramiki, tzn. również wytworzono je klasyczną technologią ceramiczną podczas wysokotemperaturowej syntezy tlenków (ang. mixed oxide method MOM) z tych samych składników i w identycznych warunkach temperaturowych.

Na rysunku 1a została przedstawiona fotografia wypolerowanej powierzchni litej ceramiki, natomiast fotografia 1b wykonana z wykorzystaniem mikroskopu optycznego przedstawia widok powierzchni wytworzonego włókna z ceramiki piezoelektrycznej PLZT 7/65/35.

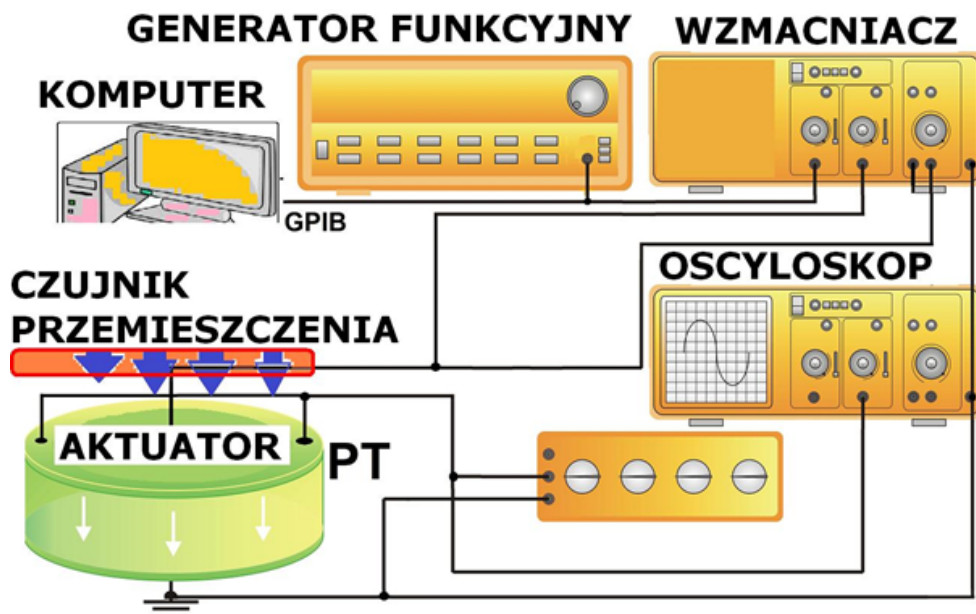


Rys. 1. Fotografia wypolerowanej powierzchni ceramiki litej (a) oraz fotografia wykonana z wykorzystaniem mikroskopu optycznego przedstawia widok powierzchni wytworzonego włókna z ceramiki PLZT 7/65/35 (b).

Fig. 1. Photograph of the polished solid ceramics surface (s) and the photograph taken using an optical microscope, shows a view of the surface of the fiber produced from PLZT 7/65/35 ceramics (b).

W kolejnym etapie eksperymentu na powierzchnie górną i dolną dysku i włókna ceramicznego PLZT 7/65/35 nałożono srebrne elektrody tworząc strukturę aktuatorową. Wymienione elektrody naniesiono metodą sitodruku a następnie poddano procesowi wypalania organicznych składników pasty srebrnej w temperaturze 800°C przez 15 min.

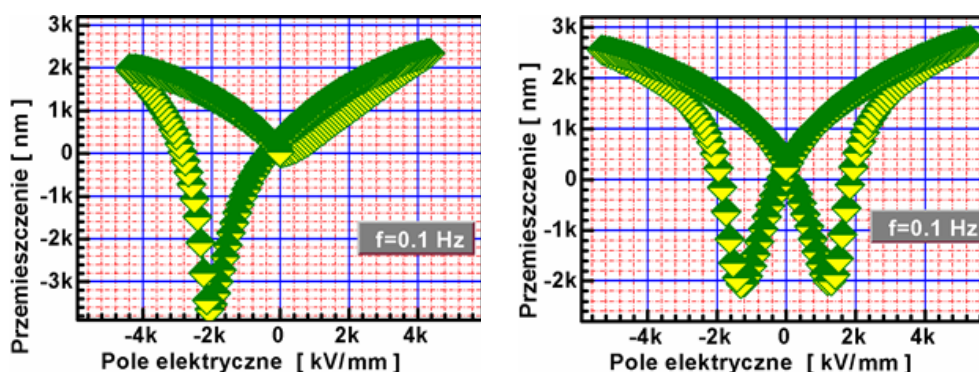
Schemat elektryczny stanowiska pomiarowego do wyznaczania zmiany wymiarów geometrycznych w zależności od przyłożonego napięcia przedstawiono na rysunku 2. Układ pomiarowy składa się z generatora funkcyjnego HM 1831 i wzmacniacza napięciowego Matsusada oraz optycznego czujnika przemieszczenia firmy Philtec wraz z oscyloskopem HM 2008 firmy Hameg.



Rys. 2. Schemat elektryczny stanowiska pomiarowego do wyznaczania zmiany napięcia wyjściowego transformatora fotowoltaiczno-piezoelektrycznego.

Fig. 2. Electrical diagram of the test stand to determine the change in output voltage of photovoltaic piezoelectric transformer.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów zamieszczonych na rysunku 3 można stwierdzić, że dysk ceramiczny z PLZT 7/65/35 wykazuje dużą i wyraźnie widoczną asymetrię parametrów wyjściowych w zależności od przyłożonego napięcia (rys. 3a), natomiast tego typu zjawiska nie zaobserwowano dla włókna ceramicznego (rys. 3b). Ta różnica jest bardziej widoczna na wykresach aktuatorów ceramicznych o dużych rozmiarach, w związku z powstającymi podczas procesów obróbki wysokotemperaturowej naprężeniami wewnętrznymi. Naprężenia te nie ulegają relaksacji nawet przy powolnym studzeniu ceramiki ze względu na złe przewodnictwo i duże objętościowe gradienty temperaturowe. Natomiast, tego typu efekty nie tworzą się w mikro włóknach ceramicznych, w związku z bardzo dobrym odprowadzeniem ciepła podczas procesu chłodzenia związanego z bardzo korzystnym stosunkiem powierzchni bocznej mikro włókien w stosunku do ich objętości. Najważniejszym jednak efektem wynikającym prawdopodobnie również z lepiej uporządkowanej struktury są różnice w wartościach generowanych przemieszczeń odnotowane w litej ceramice PLZT 7/65/35 oraz włóknach. W przypadku włókien zarejestrowane maksymalne przemieszczenie było równe $d_{max}=2747$ nm, podczas gdy dla dysku z PLZT wynosiło tylko $d_{max}=2351$ nm.



Rys. 3. Zależności zmiany wymiarów liniowych badanych aktuatorów w zależności od przyłożonego pola elektrycznego dla ceramicznego dysku PLZT 7/65/35 (a) oraz dla mikro włókna ceramicznego wykonanego z tego samego materiału (b).

Fig. 3. The relationship of linear dimensions changes of the tested actuators depending on the electric field applied to the PLZT 7/65/35 ceramic disk (s) and for the micro ceramic fibers made of the same material (b).

3. Wnioski

Aktuatory piezoelektryczne znajdują obecnie szerokie zastosowanie w przemyśle a ich różnorodność związana jest z nowymi materiałami i technologiami wytwarzania. Wśród materiałów piezoelektrycznych do aplikacji aktuatorowych zastosowanie znalazły materiały ceramiczne, polimery oraz kompozyty ceramika – polimer. Jednak najczęściej aktuatory wykonywane są z litej ceramiki, która charakteryzuje się złym przewodnictwem cieplnym a podczas obróbki w wysokiej temperaturze powstają w niej naprężenia wewnętrzne.

Przedmiotem badań, których wyniki prezentowane są w niniejszej pracy była ceramika PLZT 7/65/35 przeznaczona do aplikacji aktuatorowych. Uzyskano próbki w formie litej ceramiki jak również włókien ceramicznych. Wszystkie próbki poddano działaniu pola elektrycznego i badano zmianę wymiarów liniowych w zależności od jego natężenia. Zarejestrowane przebiegi wskazują, że aktuatory wykonane z materiałów ceramicznych w formie włókien charakteryzują się znacznie lepszymi parametrami użytkowymi w porównaniu z aktuatorami z litej ceramiki. Można sądzić, że różnice te wynikają z znacznie gorszego przewodnictwa cieplnego materiału litego oraz występowania silnych naprężeń wewnętrznych powstających podczas wysokotemperaturowych etapów technologicznych.

Podsumowując można stwierdzić, że korzystniejsze wartości przemieszczeń można uzyskać w przypadku pojedynczych aktuatorów wykonanych z wykorzystaniem mikro włókien ceramicznych lub kompozytów zbrojonych włóknami ceramicznymi

Literatura

- [1] Li W.H., Du H., Guo N.Q.: Finite Element Analysis and Simulation Evaluation of a Magneto-rheological Valve, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 21, 2003,
- [2] Kaszuwar W.: Ceramiczne materiały piezoelektryczne. *Inżynieria materiałowa* 2004, nr 2.
- [3] Sapińska-Wycisło A.: Mechatroniczne człony wykonawcze z zastosowaniem materiałów inteligentnych. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza, Praca doktorska, 2006.
- [4] PN-EN 50324-1: Piezoelektryczne właściwości materiałów i podzespołów ceramicznych. Część I. Pojęcia i definicje.
- [5] Materiały piezoelektryczne, piezoelektryki. Dostępny: www.matint.pl/materiały-piezoelektryczne.php; [przełączony czerwiec, 2015].
- [6] Boczkowska A.: Inteligentne polimery i kompozyty polimerowe. *Inżynieria Materiałowa* 2004, nr 2.
- [7] Ryndzionek R., Sienkiewicz Ł., Szlabowicz W., Grzywacz M., Ronkowski M.: Przegląd wybranych topologii aktuatorów piezoelektrycznych. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* 2011, nr 92.
- [8] Hirata H., Ueha S.: Design of a travelling wave type ultrasonic motor. *IEEE Trans. of Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1995, Vol 42.
- [9] Kosiński Z., Szemla A.: Piezomechaniczny przetwornik energii z tarczowym rezonatorem i pasywnymi koncentratorami ruchu. W: *Projektowanie mechatroniczne. Zagadnienia wybrane*. Kraków: AGH, 2004.

PIEZOELECTRIC ACTUATOR MADE FROM CERAMICS FIBER

SUMMARY

The materials, from which present-day actuators are produced, are increasingly harder, stiffer and more durable, and lighter at the same time. This makes it possible to increase processing accuracy, and miniaturisation of products. Piezoelectric materials have found the widest application in this type of devices. Piezoelectric actuators are widely used nowadays as automotive drives (piezoelectric fuel injectors), in automation as servomotors for precise robots, as well as in airplanes to change the wings geometry. Their greatest advantage is high mechanical strength and high resistance to difficult conditions, and very short response time, less than 1 ms. Actuators of this type are usually made of solid piezoelectric ceramic, which is a brittle material with high density. This article proposes an innovative method of producing piezoceramic materials for actuator applications, in the form of ceramic fibers, which allows to bypass the limitations related to internal stresses in ceramic in volume (standard) form.

KEYWORDS

piezoceramic materials, actuators, ceramic fibers