

Tomasz BURATOWSKI, Grzegorz GÓRAL, Tadeusz UHL

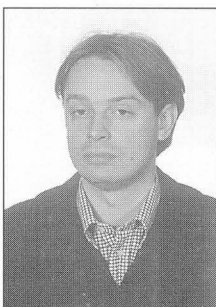
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, KATEDRA ROBOTYKI I DYNAMIKI MASZYN

Zastosowanie materiału inteligentnego w konstrukcjach mechatronicznych

Dr inż. Tomasz BURATOWSKI

Jest pracownikiem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Jego zainteresowania skupiają się na mechatronice oraz wykorzystaniu sztucznej inteligencji. Jest autorem prac nad zastosowaniem powyższych technik do zadań związanych z modelowaniem, identyfikacją i sterowaniem mobilnymi robotami.

e-mail: tburatow@agh.edu.pl



Mgr inż. Grzegorz GÓRAL

Jest doktorantem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH.

Jego zainteresowania skupiają się wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji w budowie i badaniu konstrukcji mechanicznych a także wykorzystaniu najnowszych materiałów w projektowaniu.

e-mail: ggoral@agh.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL

Jest kierownikiem Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami dynamiki konstrukcji, a zwłaszcza ich analizy modalnej. Jego zainteresowania obejmują także układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojętą mechatronikę. Jest autorem 15 książek i kilkuset artykułów dotyczących wspomnianych zagadnień.

e-mail: tuhl@agh.edu.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono dwa projekty mechatroniczne: konstrukcję sześcionożnego mobilnego robota kroczącego oraz pompę cieczy. W trakcie konstruowania prototypu urządzeń, jako napędy zastosowano materiał inteligentny nitinol.

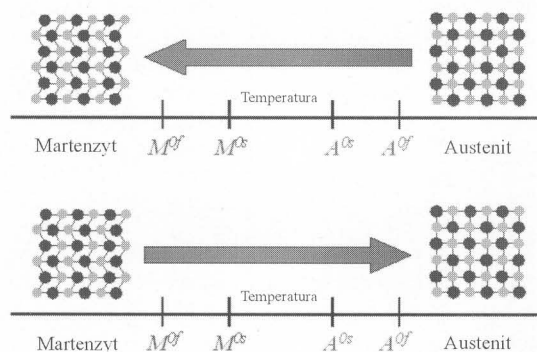
Abstract

This paper presents two mechatronic projects: a six-legged walking robot as well as liquid pump. During the devices prototypes construction intelligent material called nitinol has been applied.

1. Wstęp

Rozwój nowoczesnych technologii, a co za tym idzie nowych materiałów jest niezwykle istotnym czynnikiem pozwalającym na konstruowanie, co raz to ciekawszych konstrukcji technicznych. Przykładami takich konstrukcji mechatronicznych mogą być sześcionożny mobilny robot kroczący [1,2,3] oraz pompa cieczy w których zamiast tradycyjnych napędów zastosowano inteligentny materiał nitinol. Nitinol to super sprężysty stop niklu i tytanu, materiał z pamięcią, który dodatkowo cechuje biokompatybilność i duża wytrzymałość na zmęczenie. Jest to jednak materiał bardzo złożony i trudny do produkcji.

Nitinol jest metalem super sprężystym, który można poddawać dużym deformacjom, nie tracąc przy tym możliwości powrotu do początkowego kształtu po usunięciu obciążenia. Materiały te posiadają dwie stabilne fazy: fazę wysokotemperaturową (austenit) i niskotemperaturową (martenzyt). Tak więc pod wpływem ogrzania zachodzi przemiana martenzytu w austenit, proces ten zilustrowano na rys.1. [4,5,6]



Rys. 1. Temperaturowa przemiana fazowa bez działania obciążenia.

Na podstawie rys.1 można określić cztery progi temperatur:

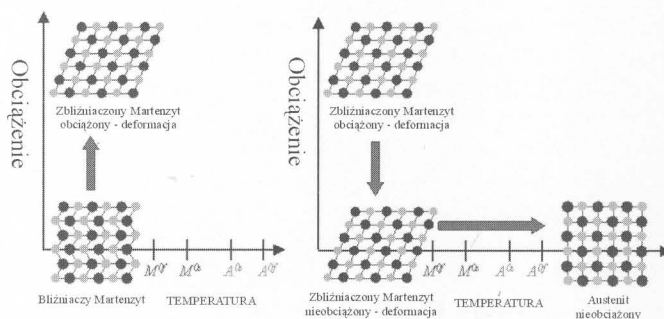
M^{0s} - temperatura inicjująca przemianę martenzytyczną, która jest temperaturą w której zachodzi przemiana austenitu w martenzyt.

M^{0f} - temperatura kończąca przemianę martenzytyczną, przy której transformacja jest kompletna i cały materiał jest fazy martenzytu.

A^{0s} - temperatura inicjująca przemianę austenityczną, po osiągnięciu której zaczyna się transformacja odwrotna (austenit > martenzyt).

A^{0f} - temperatura kończąca przemianę austenityczną, przy której cały materiał występuje w fazie austenitu.

Jeśli do materiału występującego w fazie zbliźnionego martenzytu przyłożone zostanie obciążenie (przy niskiej temperaturze), możliwa jest przemiana w martenzyt zbliźniony zniekształcony. Po ustąpieniu sił zewnętrznych materiał pozostaje zdeformowany. Jeśli w tym stanie materiał zostanie ogrzany do temperatury przekraczającej A^{0f} , nastąpi przemiana martenzytu w austenit, co spowoduje przywrócenie poprzedniego, „macierzystego” kształtu (rys.2). Przedstawiony powyżej proces przedstawia ideę efektu pamięci kształtu.



Rys. 2. Efekt pamięci kształtu materiałów

Ponieważ materiał powraca do początkowego kształtu, mówi się, że jest sprężysty [7,8]. Ponieważ odkształcenia podczas transformacji są bardzo duże (8%) w porównaniu z typowym metalem, dla którego wynoszą 0,1%, mówi się, że materiał jest super sprężysty. W przypadku obciążenia o przeciwnym znaku (Np. ściskanie zamiast rozciągania) obserwuje się podobne zachowanie, z tym że poziom naprężeń wymagany do transformacji jest wyższy, podczas gdy odkształcenia są niższe.

Metale z pamięcią kształtu to takie metale, które w odpowiedniej temperaturze powracają po odkształceniu do swojej pierwotnej formy. Przykładem może być wygięty drut z nitinolu w kształcie sprężyny w temperaturze 15 stopni Celsjusza, natomiast podnosząc temperaturę do 35 stopni drut ulegnie wyprostowaniu po ochłodzeniu drut powraca do pierwotnej postaci [9,10,11].

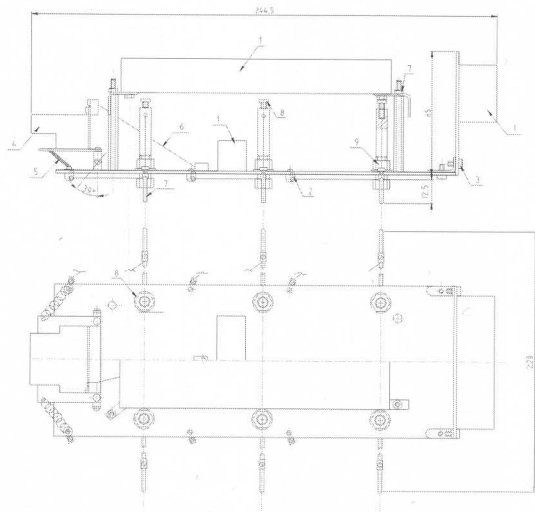
Materiały inteligentne występują w kilku odmianach stopów, najpopularniejszym jest nitinol czyli stop tytanu z niklem. Na pierwszy rzut oka stopy te wyglądają jak zwykły metal, mogą przybierać srebrne lub czerwone zabarwienie, są dość twarde.

Nitinol jest już od wielu lat stosowany w różnych technologiach, można nawet kupić urządzenia w których on występuje, niektóre przykłady zastosowań to:

- W myśliwcach ze stopów z pamięcią kształtu wykonano tulejki łączące przewody paliwowe, efektem jest brak połączeń spawanych oraz wysoka szczelność układu.
- W Japonii użyto nitinolu do budowy robotów, efektem było to że robot był silny i wiernie naśladował ruchy człowieka (płynność ruchu jak w ludzkich mięśniach).
- W latach 80 powstały czujki przeciwpożarowe na bazie nitinolu, gdy wzrastała temperatura w pomieszczeniu to Nitinol zmieniał kształt i powodował włączenie się alarmu. Stosowano go też do czujek umieszczanych w szklarniach i chłodniach.
- Bardzo duże zastosowanie tego inteligentnego materiału można znaleźć w medycynie. Przykładowo kłamy wszczepiane na zimno w ciała zatrząskują się mocując i łącząc np złamane kości, w kardiologii wszczepia się sprężyny ściśnięte w temperaturze 8°C po to, aby w temperaturze 37°C (wewnątrz ciała) rozszerzyły się i rozciągnęły zwężoną tętnicę. W stomatologii używa się ich do budowy aparatów prostujących zęby.
- Niezwykle interesującym obszarem zastosowania nitinolu jest przestrzeń kosmiczna materiały te stosowane są jako siłowniki do rozwijania baterii słonecznych, albo jako „mięśnie“ do ramienia robota.

2. Konstrukcja robota

Po wnikliwej analizie związanej z tym niezwykle ciekawym materiałem zdecydowano się w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH wraz ze studentami w ramach przedmiotu „mobilne roboty“ wykorzystać nitinol jako „mięśnie“ do poruszania sześcionożnym mobilnym robotem krocącym. Na początku powstał koncepcja projektu takiego urządzenia mechatronicznego w środowisku programu AutoCAD, zilustrowana na rys.3. W tabeli 1 przedstawiono najistotniejsze z punktu widzenia konstrukcji podzespoły.



Rys. 3. Projekt robota krocącego

Niezwykle istotnym elementem całej konstrukcji jest rozwiązanie problemu lokomocji, jak wcześniej wspomniano zdecydowano się wykorzystać drut z nitinolu posiadający właściwość zmniejszania swojej długości pod wpływem przepływającego prądu. Skrócenie to wynosi około 6% całej długości drutu i następuje przy natężeniu prądu ok. 1A.

Do każdej z sześciu nóg przymocowane są dwa druty nitinolu, jeden powoduje ruch w górę a drugi do przodu. Na rys.4 przedstawiono budowę pedipulatora, czyli kończyny dolnej „nogi“ maszyny krocącej.

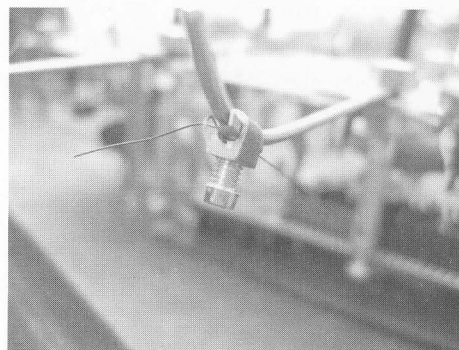
Tab. 1. Podzespoły robota krocącego

1	Układ elektroniczny
2	Część mocująca nitinol
3	Śruba M5
4	kamera
5	Sprężyna
6	Nitinol
7	Nakrętka M4
8	Podkładka
9	Nakrętka M6



Rys. 4. Konstrukcja pedipulatora robota

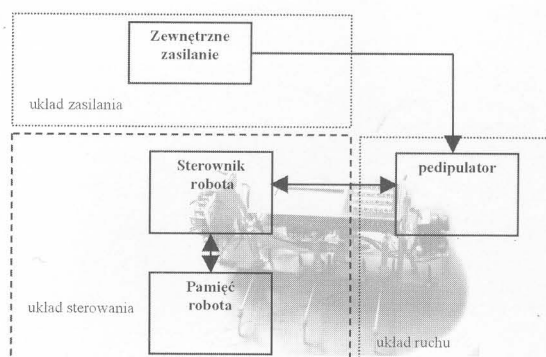
W przyjętym rozwiązaniu konstrukcyjnym bardzo ważnym elementem jest sposób przymocowania drutu do pedipulatora na rys.5 przedstawiono sposób łączenia drutu na końcu „nogi“ z wykorzystaniem śrub dociskowych.



Rys. 5. Sposób przymocowania drutu do pedipulatora

Problem lokomocji robota, mając zaprojektowany i przesyłowany pedipulator był stosunkowo prosty do rozwiązania. Podglądając naturę a dokładniej rozwiązania lokomocji owadów, przyjęto biomechaniczne rozwiązanie. Robot w czasie ruchu podnosi i przesuwa na przemian trzy nogi (dwie skrajne z jednej strony i środkową z drugiej strony).

Konstrukcja robota została zaprojektowana w taki sposób, aby robot mógł się poruszać tylko do przodu oraz aby mógł skręcać w prawo lub w lewo.

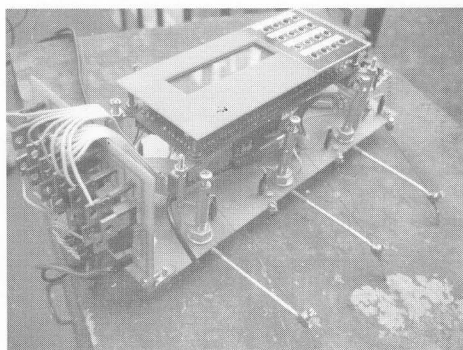


Rys. 6. Schemat blokowy robota krocącego

Zgodnie z mechatronicznym podejściem do projektowania oraz zgodnie z zasadami projektowania robotów, układ ten powinien składać się z trzech układów: ruchu, sterowania oraz zasilania. (rys.6).

Po okresie związanym z projektem konstrukcji mechanicznej, czyli układu ruchu rozpoczęto prace związane z zaprojektowaniem układu sterowania robotem. Ostatecznie zdecydowano się na wybór mikrokontrolera firmy Atmel AT90S8535. Układ ten jest wyposażony w wewnętrzną pamięć programu typu Flash, posiada możliwość programowania w systemie, zawiera 10-bitowy przetwornik A/C, wewnętrzna pamięć danych typu EEPROM, port szeregowy SPI oraz komparator analogowy. Zastosowany układ jest zgodny z rodziną mikrokontrolerów AVR, architektura procesora jest 8-bitowa typu RISC, 8kB wewnętrznej pamięci programu typu Flash EEPROM, (trwałość, 1000 cykli zapisu/kasowania). Na rys.7 przedstawiono widok układu sterowania robota.

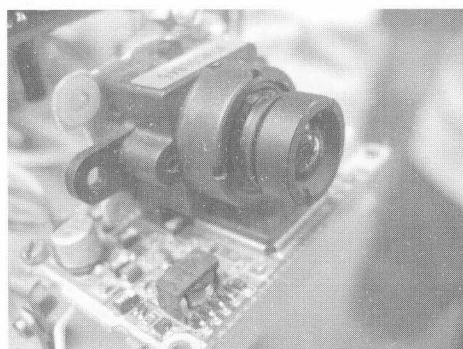
Z robotyki wiadomo, iż podstawową cechą robota jest programowalność, a program robota zdecydowanie odpowiada za jego moż-



Rys. 7. Widok robota z układem sterowania

liwości oraz własności np. adaptacyjne. W przypadku opisanego robota, program zapisany w układzie sterowania steruje sekwencją podawania prądu na poszczególne druty z nitinolu. Do napisania programu wykorzystano język programowania BASCOM-AVR.

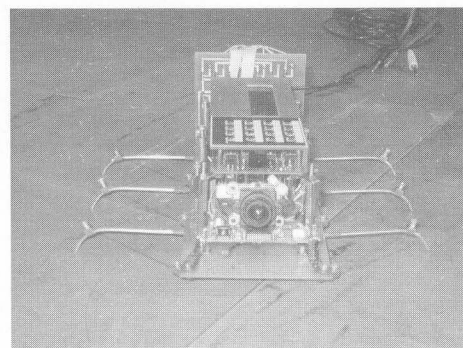
Robot jest wyposażony w kamerę CCD wykorzystywaną w transmisjach internetowych, przedstawioną na rys.8.



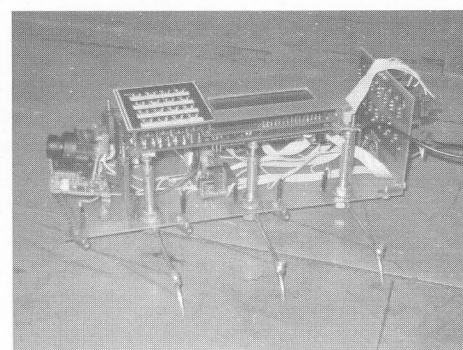
Rys. 8. Kamera zainstalowana w robocie

Bardzo istotną zaletą robota jest jego modułowość, co oznacza iż można zmieniać lub dodawać podzespoły robota w łatwy sposób. Poszczególne moduły można łatwo rozłączać do demontażu.

Kolejnym bardzo ważnym układem robota jest układ zasilania, podstawowym elementem tego układu jest stabilizator LM7805, który dostarcza napięcie zasilające. Na obecnym etapie projektu zdecydowano się zastosować zewnętrzne zasilanie ze względu na duży pobór prądu przez nitinol (około 1 A na każdy drut).



Rys. 9. Widok robota z przodu



Rys. 10. Widok robota z lewej strony

Zaprojektowane układy (rys.6) wchodzi w skład skonstruowanego sześcionożnego robota kroczącego, którego przedstawiono na rys.9 i rys.10.

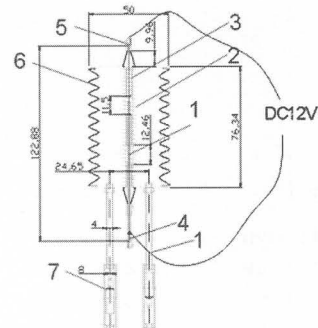
2.1 Kierunki dalszych prace

Obecnie trwają badania doświadczalne, które pomogą w polepszeniu niektórych rozwiązań konstrukcyjnych robota. Jednym z problemów przedstawionego robota powolny ruch konstrukcji, wynika on z faktu iż nitinol powraca do kształtu początkowego około 3 sekundy po zaniku przepływającego prądu.

Jednak różnorodność średnic drutu nitinolowego oraz odpowiedni sposób chłodzenia nitinolu pozwoli rozwiązać ten problem i polepszyć tę konstrukcję pod względem szybkości lokomocji.

3. Konstrukcja pompy cieczy

Inną ciekawą konstrukcją opracowaną w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH jest pompka cieczy. Jak wcześniej wspomniano stopy z pamięcią kształtu mają zdolność powracania, w odpowiednich warunkach, do nadanego im wcześniej kształtu. Związane z tym odkształcenia wynoszą dla polikryształów 1-8%, a dla monokryształów do 15%. Energia wyzwalana przy odkształcaniu jest rzędu 106-107 J/m². Zjawiskiem fizycznym wywołującym zmianę kształtu jest odwracalna przemiana martenzytyczna. Najpowszechniej i najczęściej stosowanymi materiałami z pamięcią kształtu są stopy niklowo-tytanowe Ni-Ti [6, 7, 8]. Ogólna nazwa tych stopów to Nitinol. Po raz pierwszy odkryto ich szczególne właściwości w 1961 roku w Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory [6, 7]. Układ pompki miał być łatwy w sterowaniu i prosty w konstrukcji, co powoduje niski koszt wykonania. Żywotność układu zakładano na małą ze względu na prototypowość urządzenia. Na rys.11 przedstawiono schemat części wykonawczej wykonanego układu pompki.



Rys. 11. Budowa pompki

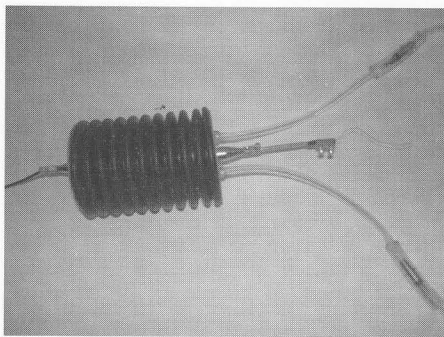
3.1 Zasada działania pompki

Głównym elementem układu jest mieszek (6). Wykonany jest on z miękkiej gumy, co pozwala na ściskanie małymi siłami.

Wewnątrz mieszka zamocowano układ rurek, (3) który zapewnia izolacje nitinolu od cieczy przepompowywanej. Układ rurek jest tak skonstruowany, że szczelnie przemieszczają się osiowo względem siebie rurki, co umożliwia swobodne ściskanie i rozszerzanie mieszka. Na zewnątrz układu rurek jest sprężyna (2) która pomaga powrócić pompce do stanu pierwotnego czyli stanu przed odkształceniem nitinolu. Wewnątrz układu rurek znajduje się nitinol, do którego na końcach (4) i (5) przyłożono napięcie. Ciecz przepompowywana jest poprzez układ zaworów zwrotnych (7). Praca pompki sterowana jest za pomocą zasilacza 12V o regulowanym natężeniu prądu. Istnieje możliwość zadawania odpowiedniej ilości cykli wraz z regulowanym czasem przestoju pomiędzy cyklami - czasu potrzebnego na schłodzenie nitinolu.

W celu zbadania cech funkcjonalnych pompki zbudowano układ przedstawiony na rys.11. W oparciu o ogólnie dostępne materiały wykonano prototyp pompki. Wykorzystano między innymi elementy gumowe stosowane w przemyśle samochodowym, wentyle rowerowe oraz zaciski elektryczne służące do regulacji siły naciągu nitinolu. Cały układ został przedstawiony na rys..3.

Powyższy układ przebadano pod względem wydajności, żywotności, sprawności a także możliwości technologicznych i ekonomicznych późniejszych zastosowań. Na podstawie przeprowadzonych ba-



Rys. 12. Zdjęcie prototypu pompki

dań wynika, że całkowite skrócenie mieszka uzyskano w granicach 4% długości. Wykonano także badania pracy pompki wypełnionej medium, którym była woda. Pomiary wykonano dla pojedynczego i podwójnego cyklu. Wyniki przeprowadzonych pomiarów dla pojedynczego cyklu przedstawiono w tabeli 2 dla podwójnego w tabeli 3.

Tab. 2. Pomiar pojedynczego cyklu

L. pomiarów	Seria 1 [ml]	Seria 2 [ml]	Seria 3 [ml]
1	2.25	2.25	2.25
2	2.00	2.00	2.00
3	2.25	2.25	2.25
4	2.00	2.00	2.00
5	2.75	2.75	2.75
srednia	2.25 [ml]	2.25 [ml]	2.25 [ml]

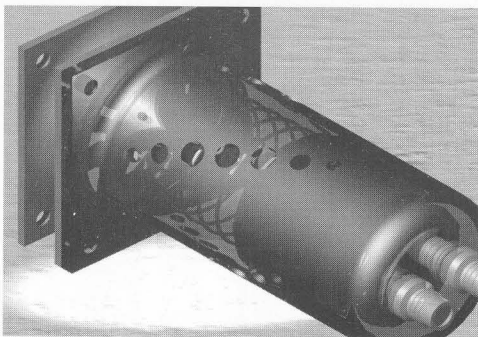
Tab. 3. Pomiar podwójnego cyklu

L. pomiarów	Seria [ml]
1	4,75
2	4,75
3	4,50
4	4,25
5	3,75
średnia	4,4 [ml]

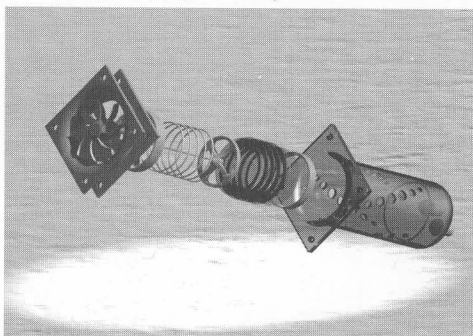
Wykonano badania układu dla jedno godzinnego czasu pracy i na tej podstawie wyznaczono wydajność pompki na poziomie 1,2 l/h.

Wyznaczono ilość cykli podczas 1h czasu pracy, która waha się w granicach 480-500 cykli na godzinę. Pompkę poddano badaniu większej niż 500 cykli pracy i zaobserwowano niewielki spadek wydajności po upływie 1000 cykli.

Wydajność pompki jest uzależniona od temperatury pracy nitinolu która to temperatura zależy od czasu przestoju pomiędzy cyklami. W celu poprawienia wydajności planuje się wykonanie dodatkowego



Rys. 13. Widok zewnętrzny pompki z wentylatorem



Rys. 14. Struktura złożeniowa

chłodzenia w postaci zamontowania wiatraka, który będzie nawiewał chłodne powietrze do komory z nitinolem. Widok zewnętrzny układu chłodzenia przedstawiono na rys.13. Natomiast strukturę wewnętrzną pompki w rozbiciu na poszczególne elementy na rys. 14.

Odpowiedni dobór poszczególnych elementów układu może z wielokrotnie wydajność pompki. Bardzo istotnym elementem jest dobór sprężyny rozpychającej mieszek. Za duża siła pochodząca od sprężyny powoduje wcześniejsze zerwanie nici nitinolu, który jest elementem krytycznym układu.

3.2 Zastosowanie

Pompka napędzana nitinolem może być wykorzystana do wszelkiego rodzaju układów smarujących. W tego typu układach żądane są niskie wydajności natomiast siła parcia jest istotnym czynnikiem, co nie stanowi większego problemu dla naszego układu. Zaletą przedstawionego układu jest niska emisja dźwięku a także niski pobór prądu, co może w przyszłości pozwolić na wykorzystanie tego typu pompki w medycynie. Niski koszt wykonania a także prostota sterowania powinno sprawić, że tego typu układy znajdą szeroka gamę użytkowników.

3.3 Kierunki dalszych prace

Następne kroki i działania powinny zmierzać kierunku zwiększenia żywotności konstrukcji. Jest to możliwe poprzez zastosowanie odpowiednich materiałów użytych do budowy pompki. Rozpoczęto prace nad stworzeniem innego typu pompki gdzie układ będzie napędzany poprzez materiał inteligentny, lecz zasada działania będzie oparta o budowę ludzkiego przełyku.

4. Podsumowanie

Jak widać po przedstawionych projektach zastosowanie materiałów inteligentnych w modelowaniu układów mechatronicznych jest bardzo szerokie. Ich wielką zaletą jest obecnie łatwy dostęp do materiałów inteligentnych oraz stosunkowo niska cena [6, 7]. Należy wspomnieć iż w przypadku materiałów inteligentnych takich jak nitinolu, jest on obojętny biologicznie, co stwarza możliwość szerokiego zastosowania np. w medycynie.

5. Literatura

- [1] BURATOWSKI T.: Podstawy robotyki, Wydawnictwo Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn, Kraków, 2004.
- [2] CRAIG J. J.: Wprowadzenie do robotyki, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [3] MORECKI A., KNAPCZYK J.: Podstawy robotyki, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1994.
- [4] FLATAU A.B., CHONG K.P.-"Dynamic smart material and structural systems", Engineering Structures, Vol.24, 2002.
- [5] MOSLEY M.J., MAVROIDIS C.-"Experimental Nonlinear Dynamics of a Shape Memory Alloy Wire Bundle Actuator", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.123,2001.
- [6] GANDHI M.V, THOMPSON B.S.-"Smart Materials and Structures", Chapman & Hall,1992.
- [7] MORAWIEC H., BOJARSKI Z.- „Metale z pamięcią kształtu“ PWN Warszawa 1989.
- [8] GIL F.J., PLANELL J.A. -"Thermal efficiencies of NiTiCu shape memory alloy", Thermochemica Acta Vol.327, 1999.
- [9] LIU Y., XIE Z., J. VAN HUMBEECK, PELAEY L., LIU Y. -"On the deformation of the twinned domain in NiTi shape memory alloys", Philosophical Magazine A, Vol.80, No. 8, 2000.
- [10] LIU Y., XIE Z., VON HUMBEECK J., DELAEY L. -"Deformation of shape memory alloys associated with twinned domain reconfigurations", Materials Science & Engineering A273-275,1999.
- [11] PELTON A.R., DUERIG T.-"Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies", SMST, California, USA, 2003
- [12] SRINIVASAN A. V., MCFARLAND D.M , Smart structures, Cambridge University Press 2001.

Title: The use of intelligent material in mechatronic constructions

Artykuł recenzowany