

Dorota STACHOWIAK*
Milena KURZAWA*
Irmina CHARCHUTA*

OPROGRAMOWANIE DO PROJEKTOWANIA AKTUATORÓW LINIOWYCH WYKONANYCH ZE STOPÓW Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU

W artykule przedstawiono algorytm doboru wymiarów aktuatorów wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu (SMA) aktywowanych cieplnie. Rozpatrzono dwa rodzaje aktuatorów: ciągnowe oraz sprężynowe. Opracowano również oprogramowanie wspomagające projektowanie aktuatorów liniowych wykonanych ze SMA. Bazując na opracowanym algorytmie oraz programie obliczeniowym zaprojektowano i zbudowano aktuatory ciągnowe wykonane z Flexinolu oraz sprężynowe wykonane z Nitinolu. Podano przykłady zastosowania zaprojektowanych aktuatorów.

SŁOWA KLUCZOWE: efekt pamięci kształtu, martenzyt, austenit, SMA, aktuator liniowy

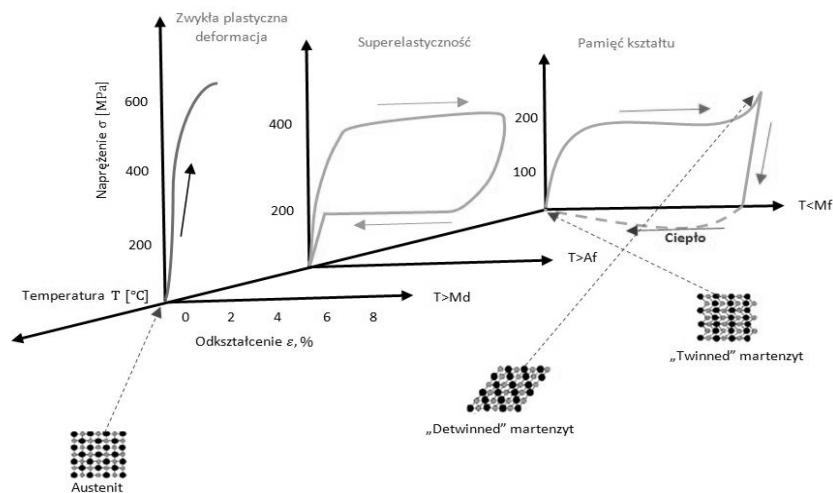
1. WPROWADZENIE

Efekt pamięci kształtu jest zjawiskiem fizycznym powstającym na skutek odwracalnej termosprężystej przemiany martenzytycznej [2, 5, 8]. Zmiana kształtu może być spowodowana poprzez zmianę: temperatury, pola magnetycznego lub naprężenia. Materiały podatne na efekt pamięci kształtu to przede wszystkim wybrane stopy metali, zwane stopami z pamięcią kształtu (z ang. SMA - *Shape Memory Alloys*). SMA charakteryzują się zdolnością do przyjmowania dwóch stabilnych struktur siatki krystalograficznej. W przypadku SMA aktywowanych cieplnie w niższych temperaturach przyjmowana jest postać zwana martenzytem (faza niskotemperaturowa), natomiast po przekroczeniu pewnej temperatury, SMA przyjmują postać zwaną austenitem (faza wysokotemperaturowa). W fazie martenzytu ułożenie cząsteczek jest jednoskośne, a siatka krystalograficzna nie wykazuje cech symetrii, materiał łatwo poddaje się plastycznym odkształceniom mechanicznym. W fazie austenitu materiał charakteryzuje się dużą sztywnością i sprężystością, siatka krystalograficzna jest symetryczna [2, 5, 8].

* Politechnika Poznańska.

Zjawisko pamięci kształtu jest ściśle związane z odwracalną termosprężystą przemianą martenzytyczną. Podczas przemiany fazowej, zachodzącej wewnątrz struktury materiału, wyróżnić można cztery charakterystyczne temperatury przemian, tzn. temperatury M_s , M_f (odpowiednio dla początkowego i końcowego formowania martenzytu) oraz temperatury A_s , A_f (odpowiednio dla początkowego i końcowego formowania się austenitu).

Z odwracalną przemianą martenzytyczną związany jest jedno i dwukierunkowy efekt kształtu oraz superelastyczność zwana także pseudosprężystością. Jednokierunkowy efekt pamięci kształtu powstaje w temperaturach niższych od M_f . Dwukierunkowy efekt pamięci kształtu powstaje wówczas, gdy materiał zapamiętuje kształt fazy wysokotemperaturowej oraz niskotemperaturowej. Przejście od jednego kształtu do drugiego odbywa się bez udziału naprężeń. Pseudosprężystość występuje po zastosowaniu obciążenia mechanicznego w przedziale temperatur A_f i M_d tj. temperatury transformacji, powyżej której martenzyt wywołany naprężeniem nie może już być uformowany [2, 8]. Na rysunku 1 przedstawiono zachowanie SMA ilustrujące efekt pamięci kształtu i superelastyczności.



Rys. 1. Charakterystyka opisująca relację pomiędzy naprężeniem, odkształceniem i temperaturą stopu SMA [na podstawie 2, 8]

Efekt pamięci kształtu obserwowany w SMA umożliwia zastosowanie stopów SMA jako elementy wykonawcze [1, 3, 6]. Zaletą użycia SMA jest możliwość formowania dowolnego kształtu. Niekonwencjonalne formy używane są bardzo rzadko. Powszechnie stosuje się kształty, takie jak drut, taśma, sprężyna, blacha [2, 4, 5]. W artykule przedstawiono strategię projektowania aktuatorów ciągnących wykonanych z drutów SMA oraz aktuatorów sprężynowych SMA.

2. ALGORYTM DOBORU WYMIARÓW AKTUATORÓW WYKONANYCH Z SMA

2.1. Dobór wymiarów aktuatora ciągnowego

W przypadku projektowania aktuatora ciągnowego SMA w pierwszym kroku należy wyznaczyć średnicę drutu d_c , która zależy od zakładanej siły F_c i maksymalnego naprężenia σ_{cA} w fazie austenitu:

$$d_c = \sqrt{\frac{4F_c}{\pi\sigma_{cA}}} \quad [\text{mm}]. \quad (1)$$

Następnie należy oszacować długości drutu l_{cA} i l_{cM} odpowiednio dla faz austenitu i martenzytu. Długość drutu l_{cA} w fazie austenitu opisuje zależność (2):

$$l_{cA} = l_{cw}(1 + \varepsilon_{cA}) \quad [\text{mm}], \quad (2)$$

w której l_{cw} to wymagana (swobodna) długość drutu, a ε_{cA} to odkształcenie w wysokiej temperaturze.

Odształcenie w fazie austenitu można wyrazić w postaci (3):

$$\varepsilon_{cA} = \frac{\sigma_{cA}}{E_A} \quad [-], \quad (3)$$

w której E_A to wartość modułu Young'a w fazie austenitu.

Wymaganą długość drutu l_{cw} można wyznaczyć z zależności (4):

$$l_{cw} = \frac{s}{\varepsilon_{cM} - \varepsilon_{cA}} \quad [\text{mm}], \quad (4)$$

gdzie: ε_{cM} to odkształcenie w fazie martenzytu, s to przemieszczenie (skrócenie) drutu.

Znając przemieszczenie drutu można wyznaczyć długość drutu l_{cM} w fazie martenzytu korzystając ze wzoru (5):

$$l_{cM} = l_{cA} + s \quad [\text{mm}]. \quad (5)$$

Siłę powrotu F_{cr} ciągną SMA do jego zdeformowanej fazy martenzytu można wyznaczyć z zależności (6):

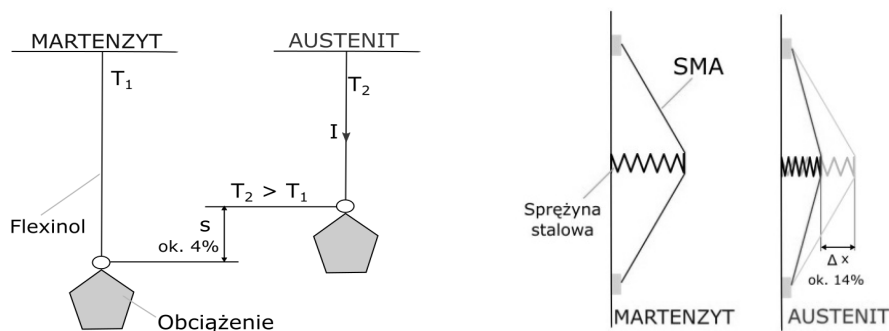
$$F_{cr} = \sigma_{cM} \frac{\pi d^2}{4} \quad [\text{N}], \quad (6)$$

w której naprężenie σ_{cM} w niskiej temperaturze wyrażono wzorem (7):

$$\sigma_{cM} = \varepsilon_{cM} E_M \quad [\text{MPa}], \quad (7)$$

gdzie: E_M to wartość modułu Young'a w fazie martenzytu.

Ciągną SMA mogą pracować w różnych konfiguracjach [1, 3, 7]. W najprostszym przypadku ciągną SMA przymocowane jest do sprężyny lub ciężarka. Ciągną z SMA podczas aktywacji kurczy się, wywołując naciąg sprężyny lub podnosi obciążenie. W takiej konfiguracji wywołane odkształcenie jest niewielkie, około 4%. Większe odkształcenie około 14% długości ciągną można uzyskać stosując układ ze sprężyną boczną – rys. 2.



Rys. 2. Układy z aktuatorem ciągnowym SMA: (a) układ prosty z obciążeniem, (b) układ ze sprężyną boczną

2.2. Dobór wymiarów aktuatora sprężynowego

Aktuatory sprężynowe SMA, w porównaniu do aktuatorów ciągnowych, charakteryzują się dużym odkształceniem, ale mniejszą siłą. Algorytm doboru sprężyny SMA różni się od algorytmu doboru zwykłej stalowej sprężyny [2, 4]. W artykule przedstawiono algorytm doboru wymiarów sprężyny SMA, która ze względu na obciążenie może być ściskana lub rozciągana.

W przypadku sprężyny wykonanej z drutu o przekroju okrągłym średnicę drutu d można opisać zależnością (8):

$$d = \sqrt{\frac{8FC}{\pi\tau}} \quad [\text{mm}], \quad (8)$$

gdzie: F to zakładana wartość siły w fazie austenitu, C to wskaźnik sprężyny ($C = D/d$), D to średnica sprężyny [mm], K to współczynnik korekcyjny, τ maksymalne naprężenie ścinające w fazie austenitu.

Współczynnik korekcyjny uwzględnia nierównomierność rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym drutu. Zwykle oblicza się go wg wzoru Wahl'a (9):

$$K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C}. \quad (9)$$

Wyrażenie (9) stosowane jest dla obciążenia zmęczeniowego. Dla obciążenia statycznego stosuje się współczynnik K_s wyrażony wzorem (10):

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C}. \quad (10)$$

Liczbę zwojów sprężyny n wyraża wzór (11):

$$n = \frac{S}{\pi DC \Delta\gamma}, \quad (11)$$

w którym S to wartość przemieszczenia sprężyny, $\Delta\gamma$ to różnica odkształcenia między fazą martenzytu γ_M a fazą austenitu γ_A , ($\Delta\gamma = \gamma_M - \gamma_A$).

Przy założeniu liniowego odkształcenia sprężyny, odkształcenie ścinające γ_A jest zależnością naprężenia ścinającego τ_A i modułu Kirchhoffa G_A w fazie austenitu:

$$\gamma_A = \frac{\tau_A}{G_A} [\text{MPa}]. \quad (12)$$

Ugięcie sprężyny δ_A w fazie austenitu oblicza się ze wzoru (13):

$$\delta_A = \frac{F8nC^3}{G_Ad} [\text{mm}]. \quad (13)$$

Przemieszczenie sprężyny S jest różnicą pomiędzy wartością ugięcia sprężyny w fazie martenzytu δ_M i w fazie austenitu δ_A . Ugięcie sprężyny w fazie martenzytu przyjmuje postać (14):

$$\delta_M = S + \delta_A [\text{mm}]. \quad (14)$$

Dla sprężyn z jednokierunkowym efektem pamięci kształtu siłę powrotu F_r stopu z pamięcią kształtu do jego zdeformowanej fazy martenzytu można wyrazić zależnością (15):

$$F_r = \frac{G_M d}{8nC^3} \delta_M [\text{N}], \quad (15)$$

w której G_M to moduł Kirchhoffa w fazie martenzytu.

Długość dla sprężyny rozciąganej w fazie martenzytu l_{rM} można opisać następująco:

$$l_{rM} = l_{rA} + S [\text{mm}]. \quad (16)$$

Długość swobodną sprężyny rozciąganej l_{rw} można wyrazić jako:

$$l_{rw} = l_b + 2(D-d) [\text{mm}], \quad (17)$$

gdzie l_b to długość sprężyny poddanej całkowitemu sprężeniu (18):

$$l_b = d(n+1) [\text{mm}]. \quad (18)$$

W fazie austenitu sprężyna rozciągana osiąga długość l_{rA} :

$$l_{rA} = l_{rw} + \delta_A [\text{mm}], \quad (19)$$

W przypadku sprężyny ściskanej, długość w fazie martenzytu l_{sM} , można wyrazić w postaci wzoru (20):

$$l_{sM} = d(n+3) [\text{mm}]. \quad (20)$$

W fazie austenitu długość l_{sA} sprężyny ściskanej można wyrazić jako:

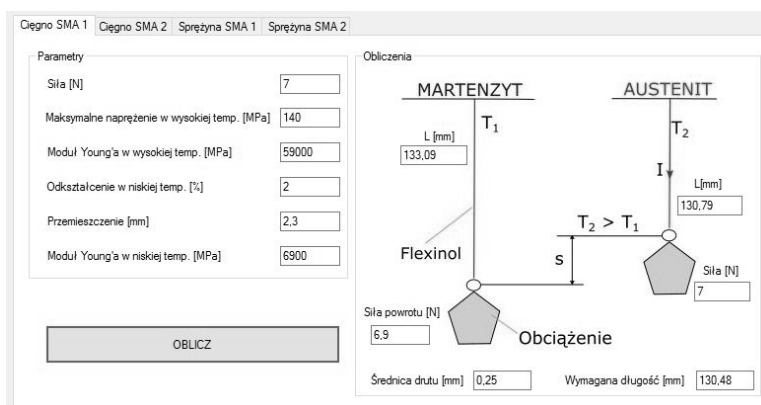
$$l_{sA} = l_{sM} + S [\text{mm}]. \quad (21)$$

Długość swobodną sprężyny ściskanej l_{sw} można wyrazić wzorem (22):

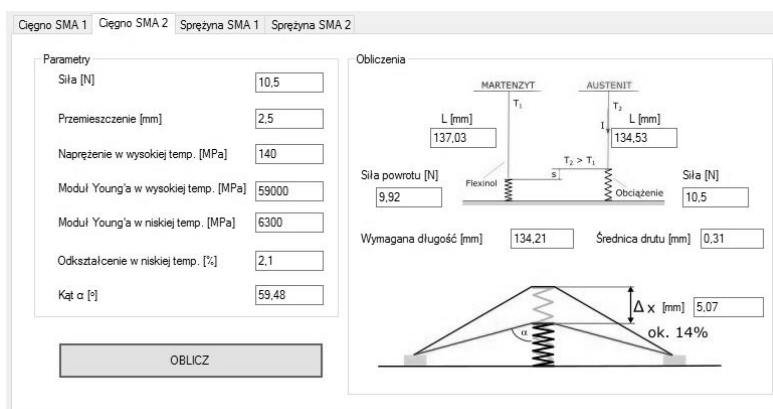
$$l_{sw} = l_{sA} + \delta_A [\text{mm}]. \quad (22)$$

3. PROGRAM OBLICZENIOWY

Na podstawie przedstawionego w rozdziale 2 algorytmu opracowano oprogramowanie własne służące do doboru parametrów aktuatorów liniowych wykonanych ze SMA. Aplikację opracowano w środowisku *Microsoft Visual Studio C#*. Interfejs programu obliczeniowego wykonano jako układ kilku zakładzek. W zakładkach „*Cięgno SMA 1*” (rys. 3) i „*Cięgno SMA 2*” (rys. 4) można dokonać obliczeń wymiarów aktuatorów ciągnowych SMA. Z kolei w zakładkach „*Sprężyna SMA 1*” (rys. 5) oraz „*Sprężyna SMA 2*” (rys. 6) dokonuje się obliczeń parametrów aktuatora sprężynowego SMA.

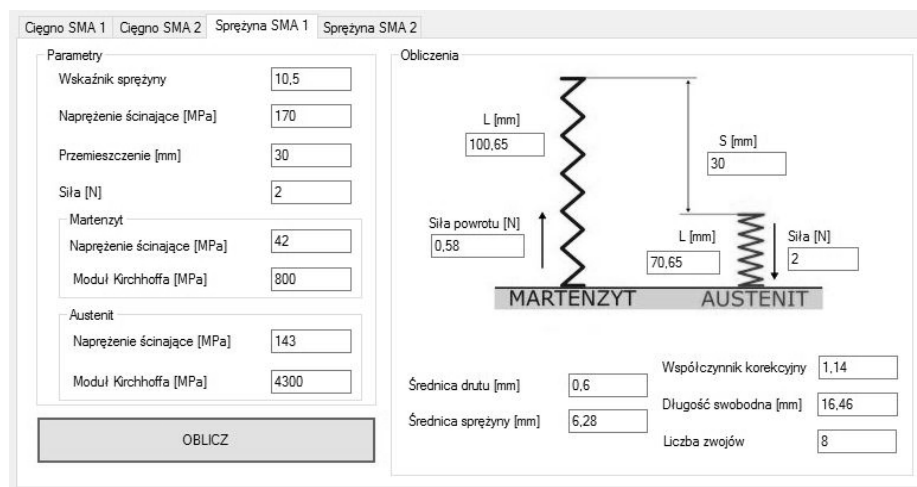


Rys. 3. Widok panelu programu do doboru wymiarów aktuatora ciągnowego SMA

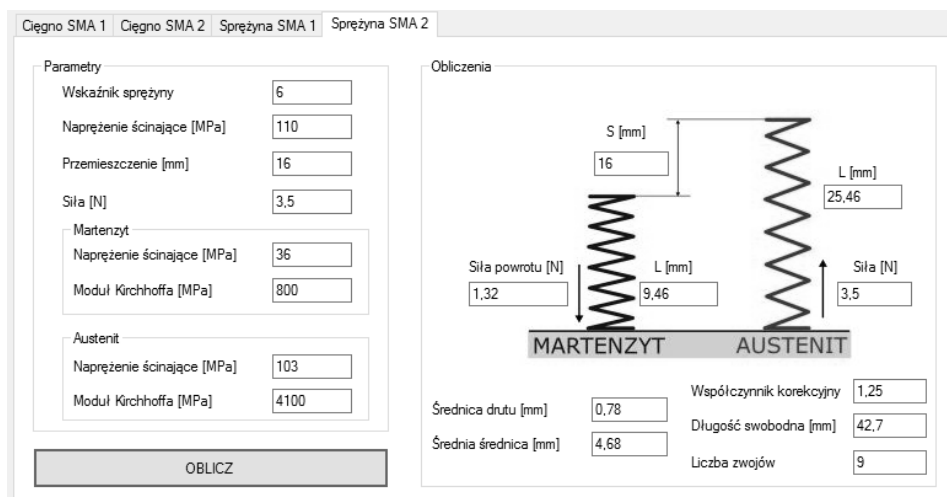


Rys. 4. Widok panelu programu do projektowania aktuatora ciągnowego SMA pracującego w konfiguracji ze sprężyną boczną

Wykonane oprogramowanie umożliwia użytkownikowi wprowadzenie wstępnych danych, takich jak: zakładane przemieszczenie, siłę, oraz parametry charakterystyczne dla zastosowanego materiału, np. moduł sprężystości w wysokiej i niskiej temperaturze. Jako wyniki obliczeń otrzymuje się m. in. takie parametry jak średnica i długość drutu (dla aktuatorów ciągnowych) oraz dodatkowo liczba zwojów i średnia sprężyny (dla aktuatorów sprężynowych).



Rys. 5. Widok panelu programu do projektowania rozciąganej sprężyny SMA

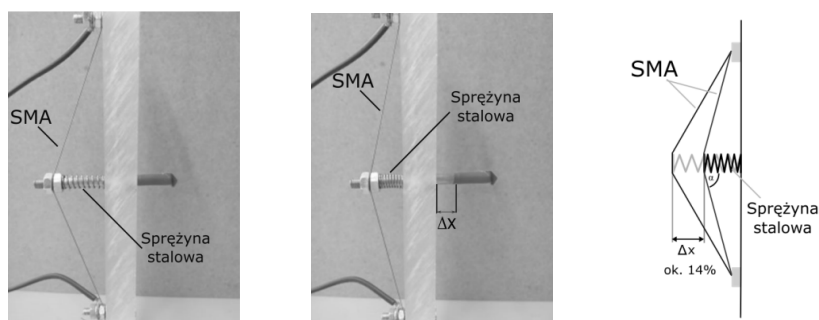


Rys. 6. Widok panelu programu do projektowania ściskanej sprężyny SMA

4. WYBRANE ZASTOSOWANIA AKTUATORÓW SMA

Jednym z najbardziej popularnych stopów z pamięcią kształtu, o szerokim zakresie temperaturowym przemiany martenzyt - austenit jest stop NiTi (Nikiel-Tytan), który występuje pod handlową nazwą Nitinol [2, 5]. Nitinol oferowany jest w różnych rozmiarach, przekrojach (np. druty o przekroju okrągłym lub prostokątnym) oraz temperaturach aktywacji. Stop NiTi dostępny jest także pod nazwą Flexinol [7]. Flexinol oferowany jest w postaci prętów dostępnych w dwunastu średnicach od 0,025 mm do 0,51 mm i o dwóch temperaturach aktywacji: 70°C i 90°C.

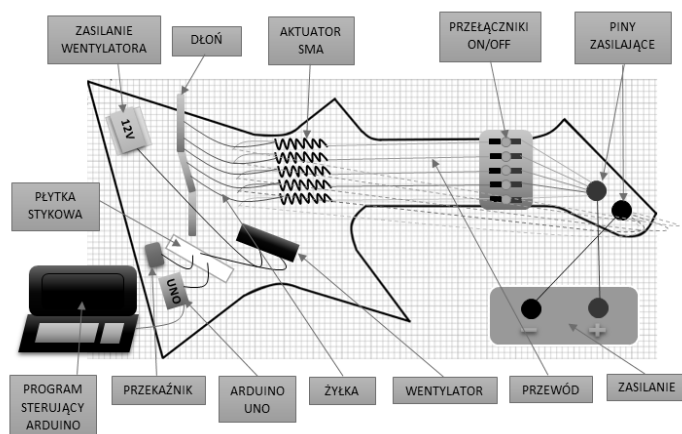
Opracowany algorytm i program obliczeniowy wykorzystano do zaprojektowania i wykonania aktuatora ciągnowego (rys. 7). Przyjęto przemieszczenie trzpienia równe 5 mm. Aktuator wykonano z Flexinolu o średnicy drutu 0,31 mm i długości 135 mm. Element ruchomy zbudowanego układu przemieścił się po aktywacji o założoną odległość. Prezentowany aktuator można zastosować jako wyłącznik termiczny.



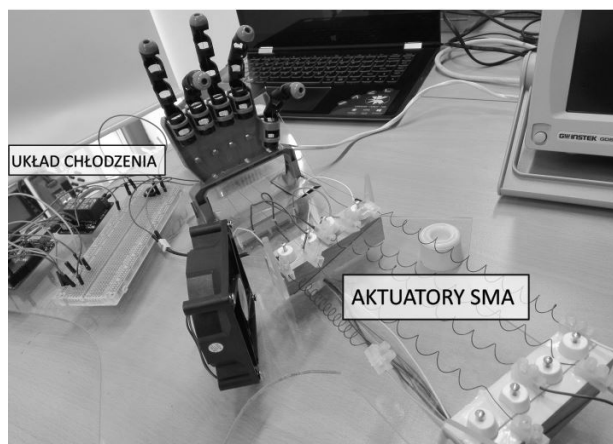
Rys. 7. Aktuator ciągnowy SMA w konfiguracji ze sprężyną boczną

Opracowany program wspomagający projektowanie aktuatorów SMA wykorzystano również do doboru sprężyn wykonanych ze SMA. Na jego podstawie zaprojektowano (rys. 8) i zbudowano (rys. 9) stanowisko do prezentacji działania aktuatorów sprężynowych SMA. Sprężyny SMA wykonano z Nitinolu i zastosowano do poruszania palcami dłoni robota. W celu sprawdzenia poprawności obliczeń projektowych, zbudowano 5 aktuatorów sprężynowych SMA o różnych parametrach wyjściowych siły i przemieszczenia. Przeprowadzone badania i testy wykazały, że sprężyny tylko częściowo realizują założone przemieszczenie pomimo, że aktuatory były zaprojektowane na określoną siłę wymaganą do ruchu palca. Dobór parametrów aktuatorów sprężynowych powinno się poprzedzić szczegółowymi pomiarami właściwości termicznych i mechanicznych materiałów lub dokładniejszymi obliczeniami np. połowymi. Przed-

stawiony w punkcie 3 algorytm doboru wymiarów aktuatorów sprężynowych SMA można zastosować tylko do wstępnego oszacowania jego wymiarów.



Rys. 8. Schemat zaprojektowanego stanowiska



Rys. 9. Widok stanowiska z sprężynami SMA aktywującymi palce dłoni

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono algorytm projektowania aktuatorów wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu. Rozpatrzono dwa rodzaje aktuatorów SMA: ciągnowe i sprężynowe. Na podstawie przeprowadzonych badań wykonanych aktuatorów stwierdzono, że opracowany algorytm i program jest wystarczający w procesie projektowania cięgien. Natomiast w przypadku sprężyn SMA opro-

gramowanie można zastosować tylko we wstępnym etapie projektowania aktuatorów sprężynowych SMA. Opracowane oprogramowanie oraz zbudowane aktulatory liniowe SMA można z powodzeniem zastosować w procesie dydaktycznym do przedstawienia właściwości i zastosowań stopów z pamięcią kształtu. W dalszym etapie badań oprogramowanie zostanie rozszerzone o inne konfiguracje pracy ciągłych SMA a także układy szeregowo i szeregowo – równoległe aktuatorów sprężynowych SMA.

LITERATURA

- [1] Kluszczynski K., Kciuk M., SMA actuators: theory, performance curves and design problems, *Compel*, vol. 32, no. 4, pp. 1417–1427, 2013.
- [2] Lagoudas D. C., *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, Springer, 2008.
- [3] Mohd Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M. A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and Design*, vol. 56, s. 1078–1113, 2014.
- [4] Pietrowski W., Stachowiak D., Calculation of dimensions of shape memory alloy spring actuator using finite element method, *Proceedings of XXIV Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits*, Helsinki, Finland, 2016.
- [5] Rao, A., Srinivasa, A., and Reddy, J., *Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators*, Springer, 2015.
- [6] Song G., Ma N., Li H.-N., Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering Structures* 28, pp. 1266–1274, 2006.
- [7] Technical Characteristics of Flexinol® Actuator Wires, Dynalloy, <http://www.dynalloy.com>, dostęp styczeń 2017.
- [8] Ziółkowski A., *Pseudospężystość stopów z pamięcią kształtu. Badania doświadczalne i opis teoretyczny*. Instytut podstawowych problemów techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2006.

THE SOFTWARE FOR DESIGN OF SHAPE MEMORY ALLOY LINEAR ACTUATORS

The paper presents the design strategy for shape memory alloy linear actuators thermally activated. The attention was focused on SMA wire actuator and SMA spring actuator. The in-house software for designing calculation of SMA actuators has been elaborated. On the basis on described algorithm and using in-house software the SMA wire actuator and SMA spring actuator have been designed and manufactured. The concept proposals of the linear actuator using as active element the Flexinol wire and actuator using Nitinol spring have been given.

(Received: 22. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)