

KONSTRUKCJA SIŁOWNIKÓW NAPĘDZANYCH SKRĘCONYMI WŁÓKNAMI NYLONOWYMI

Construction of the actuators powered by twisted nylon fibre

Arkadiusz PIETROWIAK, Olaf CISZAK, Marcin WIŚNIEWSKI, Katarzyna PETA

Streszczenie: W pracy przybliżono zasadę działania siłowników napędzanych skręconymi włóknami nylonowymi. Opisano właściwości włókien nylonowych zastosowanych do budowy siłowników i przytoczono fizyczne podstawy zachodzących w nich procesów skurczu. Przedstawiono autorskie rozwiązania koncepcyjne dotyczące konstrukcji siłowników. Opisano również rodzaje połączeń montażowych stosowanych w budowie siłowników napędzanych Skręconymi Włóknami Nylonowymi (SWN) oraz potencjalne zastosowania dla tego źródła napędu.

Słowa kluczowe: Skręcone Włókna Nylonowe, siłownik, połączenia montażowe, konstrukcja

Abstract: In this paper was presented the principle of actuators powered by twisted nylon fibers. It describes in detail the properties of the nylon fibers used to build actuators and quoted the physical basis occurring in these processes contraction. Presented proprietary solutions conceptual design of the actuators. Also describes the types of connections used in the assembly in the construction of actuators powered by Twisted Nylon Fibres (SWN) and potential applications for this power source.

Keywords: Twisted Nylon Fibres, actuator, assembly connection, construction

Wprowadzenie

Intensywny rozwój techniki i coraz większe wymagania stawiane materiałom inżynierskim spowodowały powstanie nowej grupy materiałów zwanej materiałami inteligentnymi (intelligent materials). Innymi powszechnie stosowanymi nazwami tej grupy są m.in. materiały adaptacyjne (adaptive materials), multi-funkcjonalne (multi-functional materials) lub materiały typu smart (smart materials) [9]. Grupa ta zyskała swoją nazwę w latach 80. XX w. Na ten okres przypadł najbardziej intensywny rozwój badań nad nowym zastosowaniem materiałów z tych grup m.in. w szybko rozwijającym się przemyśle lotniczym, samochodowym czy medycynie. Choć wymienione określenia często stosuje się zamiennie to coraz częściej wprowadza się rozróżnienie pomiędzy materiałami typu smart i inteligentnymi [4]. Według definicji materiał typu smart zapewnia przewidywalną zmianę właściwości pod wpływem oddziaływania bodźca, zaś materiał inteligentny ponadto powinien w tym samym czasie wykazywać zmianę właściwości o cechach sprzężenia zwrotnego. Można zatem stwierdzić, że materiały typu smart są podgrupą materiałów inteligentnych.

W rzeczywistości jednak „inteligencja” wspomnianych materiałów opiera się na szerszym zakresie właściwości niż w przypadku standardowych materiałów. Są to np.: zmienne w funkcji pola elektromagnetycznego, właściwości reologiczne (ciecze magnetoreologiczne), zmiana kształtu w funkcji temperatury otoczenia (materiały z pamięcią kształtu) lub przepływającego prądu (piezoelementy). Najczęstszym zastosowaniem tych materiałów

są człony wykonawcze maszyn i urządzeń [12]. Pod tym względem do najpopularniejszych materiałów tego typu zalicza się [3]:

- materiały piezoelektryczne – zmiana kształtu spowodowana odwrotnym efektem piezoelektrycznym. Odkształcenie jest niewielkie (poniżej 0,01%) przy stosunkowo dużej sile (do kilku kN). Dodatkową zaletą tych materiałów jest możliwość pracy z dużą częstotliwością odkształceń [12]. Przykładowym zastosowaniem są np. elementy wykonawcze zaworów hydraulicznych [6],
- materiały magnetostrykcyjne – zasada działania opiera się na zjawisku magnetostrykcji. Parametry pracy są porównywalne z piezoelektrykami. Materiały te znajdują zastosowanie m.in. w budowie czujników [6],
- elastomery o właściwościach dielektrycznych – polimery elektrostrykcyjne. Są to tworzywa sztuczne, zdolne do zmiany wymiaru pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Jeden z pierwszych materiałów użytych do budowy sztucznych mięśni (artificial muscles) [7],
- nanorurki węglowe – rurki o długości nanometrów wytworzone z atomów węgla. Elementy wytworzone przy użyciu tego materiału są porównywalnie mocniejsze od stali, lżejsze od aluminium i twardsze od diamentu [10]. Z tego względu nanorurki znajdują coraz szersze zastosowanie m.in. w takich gałęziach przemysłu jak lotnictwo, militaria oraz medycyna. Z powodzeniem są stosowane również do budowie sztucznych mięśni [2],

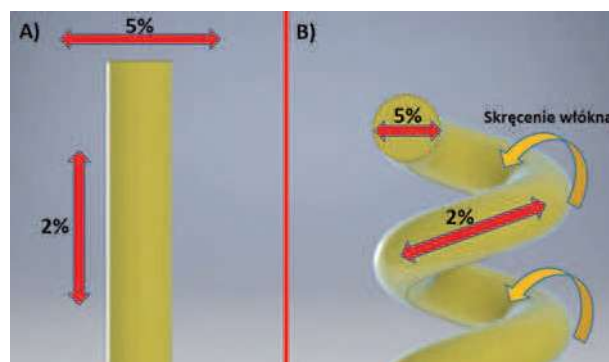
- materiały z pamięcią kształtu – najpopularniejszym materiałem tego typu są stopy niklowo-tytanowe (Ni-Ti). Kształt materiału bezpośrednio zależy od temperatury dzięki efektowi pseudoelastyczności. Materiały z pamięcią kształtu, w ostatnich latach są coraz powszechniej stosowane w budowie maszyn i pojazdów, a także coraz częściej w medycynie [11].

Grupa materiałów inteligentnych jest licznym i wciąż uaktualnianym zbiorem. Na świecie prowadzone są liczne badania nad ich nowymi zastosowaniami, np. w obrębie medycyny i biotechnologii. Jednym z niedawno opisanych materiałów jest nylon, który dzięki swoim właściwościom dielektrycznym jest stosowany np. jako baza do elastycznych tkanin przewodzących lub w budowie lekkich elementów wykonawczych [5]. Zespół pod przewodnictwem Baughmana w 2014 r. opublikował pracę, w której wykazał wykorzystanie odkształceń temperaturowych odpowiednio przygotowanego nylonu do generowania dużej siły i przemieszczeń [1].

Sztuczne mięśnie z żyłki wędkarskiej

Nylon jest handlową nazwą poliamidu, wyprodukowaną i opatentowaną w latach 30. XX w. przez firmę DuPont. Występuje pod wieloma postaciami handlowymi (wałki, profile itp.) i jest szeroko stosowany w budowie maszyn i urządzeń. Ze względu na dobry stosunek masy do wytrzymałości znalazł zastosowanie przy produkcji odzieży oraz sprzętu sportowego. To właśnie nylon w formie żyłki wędkarskiej stanowił przedmiot badań zespołu z Uniwersytetu w Dallas [1]. Najbardziej istotnym efektem przeprowadzonych badań było stwierdzenie, że poddane skręceniu włókna nylonowe potrafią, w odpowiednich warunkach, generować siłę ok. 100-krotnie większą niż ludzkie mięśnie.

Porównując skręcone włókna nylonowe (SWN) do ludzkich mięśni o tej samej długości i objętości, te pierwsze generują siłę 5,3 kW/kg. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że pod względem stosunku masy do mocy nylon jedynie nieznacznie ustępuje pod tym względem silnikom odrzutowym. Badaniom poddano kilka rodzajów włókien nylonowych, m.in. nylon 6, nylon 6,6 oraz posrebrzany nylon 6,6. Dla porównania wyniki zestawiono z żyłką wędkarską wyprodukowaną z Polietylenu (PE). Wszystkie materiały wykazały podobne tendencje do skurczu temperaturowego i zdolności do generowania przy tym siły. PE, będący próbką porównawczą, uzyskał ponad dwukrotnie słabsze wyniki w zakresie wydłużenia w stosunku do nylonu 6,6. Wykazano, że skurcz pojedynczego włókna, zależnie od jego uformowania, potrafi wynieść nawet do 49%. Dla porównania, skurcz ludzkich mięśni to jedynie 20% [8]. Najważniejszą zaletą przy tak dużym odkształceniu jest niewystępowanie efektu histerezy. Do pozostałych zalet SWN należy m.in. niski koszt wytworzenia, szybki czas reakcji oraz długi okres użytkowania bez zjawiska histerezy – nawet do miliona cykli.



Rys. 1. Wartość skurczu temperaturowego we włóknie prostym (A) oraz Skręconym Włóknie Nylonowym SWN (B)
Fig. 1. The temperature shrinkage in linear fiber (A) and Twisted Nylon Fibre (B)

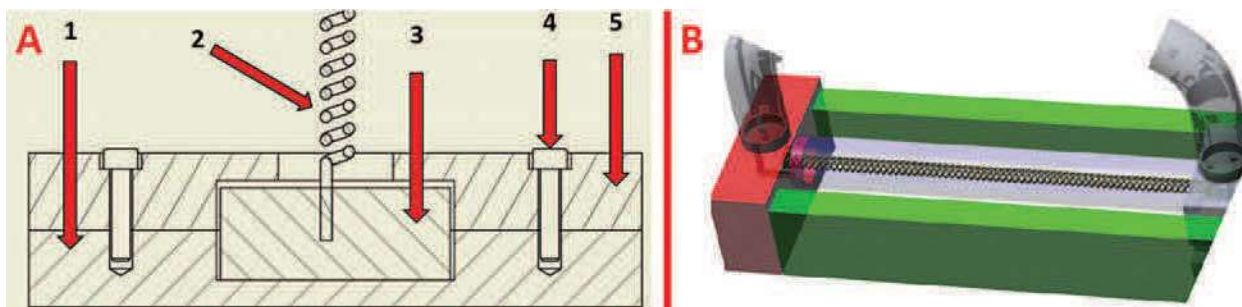
SWN – opis działania

W skręconych włóknach nylonowych aktywatorem skurczu jest temperatura. Jej wzrost powoduje skurcz, zaś spadek jego zanik. Włókno nylonowe w tradycyjnej postaci, przy podgrzaniu do temperatury bliskiej temp. zeszklenia generuje względny skurcz temperaturowy wzdłużny na poziomie 2%. W tym samym czasie skurcz w kierunku promieniowym wynosi 5%. W SWN występuje złożenie obu tych przemieszczeń, powstałe na skutek wykonania spirali na całym odcinku oraz wewnętrznego skręcenia pojedynczego włókna (rys. 1). Ostateczna wartość możliwego do uzyskania skurczu zależy od gęstości skrętu włókien – czyli ile razy pojedyncze włókno zostało skręcone wokół własnej osi.

Uformowanie SWN odbywa się dzięki częściowemu odebraniu pięciu stopni swobody jednemu z końców włókna. Unieruchomiony koniec powinien mieć możliwość przemieszczania się w kierunku wzdłużnym do włókna. Drugi koniec przymocowywany jest do wrzeciona obrotowego, tj. np. zamocowany nieruchomo silnik krokowy. Siła wymagana do skręcenia włókna jest niewielka i wynika z naprężenia wewnętrznego i oporu przemieszczania się dolnego zamocowania.

Jedno z zamocowań musi być suwliwe ze względu na zmniejszanie się długości skręcanej włókna. Jednocześnie masa dolnego zamocowania i wynikający z niej opór przesuwu musi być dobrany w taki sposób, by nie przemieszczał się zbyt łatwo. Samoistne przesunięcie się jednego z zamocowań w trakcie skręcania spowoduje splątanie się włókna. Z kolei zbyt duży opór może być przyczyną rozerwania wiązki. W obu tych przypadkach włókno nie nadaje się do dalszej eksploatacji.

Uzyskany przez skręcanie kształt włókna nie jest w pełni trwały. Jego częściowe utwalenie następuje dzięki jednorazowej aktywacji temperaturowej włókna. Po ochłodzeniu włókno jest gotowe do użycia. W przypadku konieczności jego przemieszczenia należy każdorazowo zwracać uwagę na utrzymanie naciągu, gdyż można je stosunkowo łatwo zaplątać. Aktywacja temperaturowa (skrócenie długości na skutek wzrostu temperatury)



Rys. 2. Montaż włókna w wózku jezdnym (A) i obrazek siłownika zasilanego wodą (B): 1 – podstawa wózka, 2 – skręcone włókno, 3 – rdzeń zalewany, 4 – śruby montażowe, 5 – pokrywa wózka
 Fig. 2. Installation of fiber in trolley (A) and the picture of the actuator supplied with water (B): 1 – base of trolley, 2 – twisted fiber, 3 – flooded core, 4 – mounting screws, 5 – cover of trolley

odbywa się przez ogrzanie SWN za pomocą obcego medium, którym może być powietrze lub woda. Oprócz swobodnych przepływów powietrza np. z nagrzewnicy lub otoczenia znane są aplikacje, które generują ciepło z użyciem drutu oporowego, oplecionego bezpośrednio na włóknie [14]. Rozwiązanie takie uzależnia jednak działanie napędu od dostępności zasilania.

SWN ze względu na temperaturowy charakter pracy obarczone są określoną bezwładnością, która przekłada się bezpośrednio na możliwą do osiągnięcia szybkość działania. Im grubsze włókno, tym większa jego pojemność cieplna i dłuższy okres oddawania ciepła. Czas ten zmienia się zależnie od medium i wartości jego przepływu wzdłuż włókna. Niezmiennym parametrem jest jednak górna granica stosowania, która dla nylonu wyznaczona została przez temperaturę zeszklenia i dla tego materiału wynosi ok. 180°C. W przypadku niebarwionego, transparentnego nylonu przekroczenie tej temperatury jest widoczne gołym okiem – materiał staje się mleczny. Zmiany są nieodwracalne, a utrzymanie tej temperatury pod obciążeniem skutkuje całkowitym zerwaniem włókna.

Konstrukcja siłowników

Istotną wadą SWN jest konieczność utrzymywania naciągu włókna, przez co znajduje się ono pod ciągłym obciążeniem. Częściowo wiąże się to z kolejnym negatywnym aspektem włókien nylonowych, jakim jest zdolność jedynie do pracy jednostronnej. Generowana podczas skurczu siła działa jedynie w kierunku wzdłużnym, skracając wymiar. Rozwijanie włókna po zaniku aktywatora odbywa się już ze znikomą wartością siły. Całkowity brak naciągu przy rozwijaniu może skutkować splątaniem włókna. Bardzo istotne jest, aby wymienione ograniczenia uwzględnić przy projektowaniu siłowników i elementów wykonawczych napędzanych SWN, tak by układ zawsze znajdował się w równowadze zapewniającej odpowiedni naciąg. Poniżej przedstawiono kilka koncepcji konstrukcji siłownika i występujących w nich połączeń montażowych, przy różnych metodach aktywacji cieplnej.

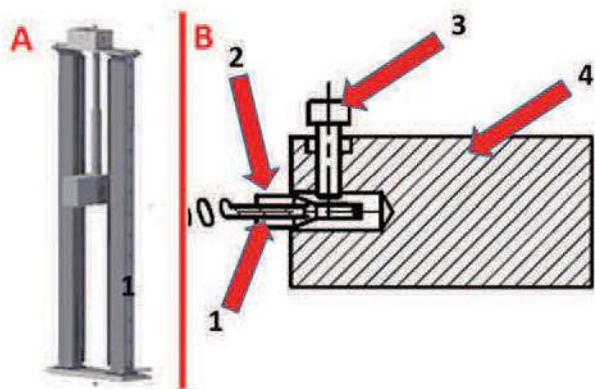
Siłownik przepływowy – wodny

Woda jest środowiskiem obojętnym dla nylonu, dzięki czemu możliwa jest ciągła praca w sytuacji, gdy wymiana ciepła zachodzi z otaczającą SWN cieczą. Pokazany na rys. 2b siłownik został zaprojektowany tak, by woda znajdująca się w nim mogła pozostać w stanie spoczynku oraz ciągłego przepływu. Druga opcja umożliwiła umieszczenie siłownika np. w ciągu wodnym. Ze względu na zastosowanie ogrzewania wodnego, ograniczony zostaje w tym przypadku zakres temperatur. Bezpośrednio przekłada się to na zakres ruchu siłownika. Przy temperaturze wody dochodzącej do 100°C można spodziewać się skurczu na poziomie maks. 10%. Użyteczny skok tak powstałego siłownika ogranicza się więc jedynie do max. 10% jego całkowitej długości.

Ruch prostoliniowy zapewniony jest w tym przypadku przez toczne prowadnice liniowe. Przymocowany do nich wózek jest punktem zaczepu dla włókna. Ze względu na zmniejszony zakres temperaturowy, ograniczona temperatura wrzenia wody nie zniszczy włókien znajdujących się wewnątrz giętkiego przewodu z wodą. Umożliwia to stosowanie połączenia zalewanego w obu punktach zaczepu włókna. Zostało ono zaprojektowane w oparciu o zalewanie przygotowanych końców włókna żywicą epoksydową w formie. Formowanie włókna następuje dopiero z uprzednio przygotowanymi końcami. Następnie w siłowniku występuje kształtowo-siłowe umocowanie końcówek montażowych (rys. 2a), uniemożliwiające jego wypadnięcie. Umożliwia to także wymianę uszkodzonych włókien. Żywica epoksydowana, tak jak nylon, dopuszczona jest do kontaktu z wodą i nie ma obaw o uszkodzenie złącza. W przypadku niewielkiego zapotrzebowania na siłę cała konstrukcja takiego siłownika może zostać wykonana z tworzyw sztucznych, co jest niewątpliwą zaletą. Potencjalnym źródłem energii tego typu napędu może być energia cieplna z układów chłodniczych i wymienników ciepła.

Siłownik przepływowy – powietrzny

Na potrzeby badań zaprojektowano również siłownik, w którym medium grzewczym jest przepływające



Rys. 3. Rysunek siłownika napędzanego przepływem powietrza (A) i występujące w nim połączenie montażowe (B): 1 – skręcone włókno, 2 – tulejka zaciskowa, 3 – śruba dociskowa, 4 – wózek jezdny

Fig. 3. Picture of an engine driven by air flow (A) and adopted assembly connection (B): 1 – twisted fiber, 2 – clamping sleeve, 3 – clamping screw, 4 – trolley

powietrze (rys. 3A). Konstrukcja siłownika zbliżona jest do wersji ogrzewanej przepływem wody. Ruch prostoliniowy zapewniony jest przez prowadnice liniowe. Ramę konstrukcji wykonano z profili stalowych, natomiast wózek toczny z aluminium. W ten sposób zredukowano masę wózka, a także zapewniono lepszą przewodność cieplną. Górną płytę siłownika wykonano w dwóch wersjach. Oprócz standardowego zaczepu do włókna jest także przyłącze umożliwiające zamocowanie silnika krokowego w celu wykonania splotu bezpośrednio w siłowniku.

Wykonane w ten sposób SWN pracuje w teleskopowej tulei. Jedna jej część wkręcana jest w gwintowany otwór wózka, druga natomiast w płytę górną. Różnica wymiarów obu rur wynosi 2 mm. Jest to potencjalne miejsce strat ciepła, które można dodatkowo uszczelniać przez gumowe kołnierze. Wejście medium zaplanowano na płycie głównej, gdzie zostawiono otwór gwintowany. Wyjście może odbywać się w sposób swobodny lub przez podłączenie węża do wózka jezdnego. Montaż włókien na obu końcach siłownika odbywa się za pomocą połączeń śrubowo-zaciskowych. Jest to rodzaj połączenia rozpowszechniony w złączach elektroinstalacyjnych. Na końcu włókna umieszczana jest tulejka stalowa, zaciskana na włóknie. Po umieszczeniu w otworze montażowym włókno z tulejką jest od góry dociskane wkręcaną śrubą. Docisk generowany jest więc przez siłę na śrubie. Tuleja zaciskowa służy do ochrony włókna przed zniszczeniem przy zaciskaniu. Połączenie przedstawiono na rys. 3B.

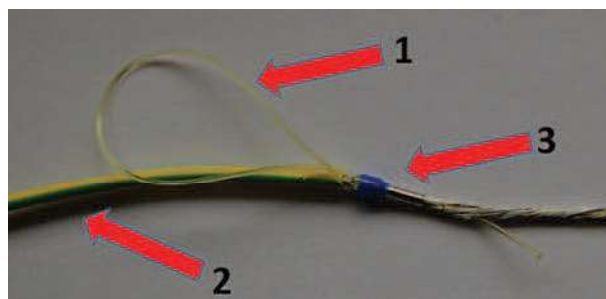
Zaletą tego siłownika jest możliwość stosowania napędów złożonych z kilku skręconych żył i generowanie dużych sił oraz przemieszczeń. Wadą jest z kolei konieczność ścisłej kontroli temperatury przepływającego powietrza. Przekroczenie temperatury zeszklenia, jak już wspomniano wcześniej, spowoduje zniszczenie napędu. Siłownik taki należy wyposażyć w odpowiednie układy

– pomiarowy i sterujący zaworem odcinającym. Układ tego typu można stosować np. w wyciągach spalin i układach odpylających. Szczególnie w instalacjach odpylających, gdzie filtry wykonywane są częściowo z nylonu, a temperatura pracy rzadko przekracza 140°C, warunki pracy napędu z SWN mogłyby podlegać kontroli istniejącej już aparatury.

Siłownik nagrzewany oporowo – połączenie montażowe

Zasada działania tego siłownika opiera się na nagrzewaniu nylonu owiniętym wokół niego drutem oporowym. Odpowiednio sterowany przepływ prądu pozwala na względnie dokładne sterowanie temperaturą. Układ prowadzenia ruchu można rozwiązać analogicznie jak w przypadku układu ogrzewanego powietrzem. Oplecione drutem oporowym włókno ma kompletny układ grzewczy, dzięki czemu może pracować swobodniej, bez izolacji od otoczenia. Brak izolacji poprawia także zdolność do oddawania ciepła. Układ musi być jednak odpowiednio zabezpieczony przed dostępem człowieka, ponieważ drut oporowy jest odstłoniętym przewodnikiem z prądem.

Temperatura dochodząca do 180°C uniemożliwia stosowanie połączenia zalewanego na bazie żywic. Połączenie śrubowo-zaciskowe, tak jak ma to miejsce w złączkach elektrycznych, powodowałoby przenoszenie zasilania na obudowę przez śrubę. Z tego też względu do tego rodzaju napędu zaleca się stosowanie połączenia zaciskanego z jednoczesną izolacją. Drut oporowy musi być w tym przypadku zaplatany wraz z włóknem. Po skręceniu włókna na obu końcach umieszcza się izolowane tuleje zaciskowe. Nadmiar włókna przeplata się przez tuleje, dzięki czemu uzyskuje się uchwyt oczkowy, znany z połączeń linowych stosowanych w stalowych linach mostowych. Siła zacisku uniemożliwia rozwarstwienie się włókna i drutu, a sposób wykonania zapewnia izolację od obudowy. Połączenie pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Połączenie zaciskowe dla włókna ogrzewanego drutem oporowym: 1 – zaczep pętlowy, 2 – izolowany drut oporowy, 3 – zaciskowa tuleja izolowana

Fig. 4. Terminal connection for fiber heated by resistance wire: 1 – hook loop, 2 – insulated resistance wire, 3 – insulated clamping sleeve

Podsumowanie

Układy wykonawcze zbudowane w oparciu o Skręcone Włókna Nylonowe wciąż należą do rzadkości. W literaturze można znaleźć pojedyncze publikacje poruszające ten zupełnie nowy temat. Opisane właściwości tego typu siłowników pozwalają sądzić, że zainteresowanie tym rodzajem napędu będzie rosnąć. Zaprezentowane w tekście przykłady rozwiązań konstrukcyjnych i dedykowanych im połączeń montażowych, będące efektem własnych badań i prac konstrukcyjnych, nie wyczerpują tematu. Przybliżają jednak mnogość możliwych rozwiązań i zastosowań dla tego typu urządzeń. Temperaturowy charakter pracy SWN jest źródłem sporych strat energii. Z tego powodu należałoby szukać zastosowania napędu w miejscach gdzie ciepło jest efektem ubocznym prowadzonych procesów jak np. procesy spalania, ogrzewania i chłodzenia.

LITERATURA

- [1] Baughman R.H. et. al. 2014. "Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread". *Science* (343): 868–872.
- [2] Baughman R.H. et. al. 2015. "Hierarchically buckled sheath-core fibers for superelastic electronics, sensors and muscles". *Science* (349): 400–404.
- [3] Cherubini A. et. al. 2015. "Experimental characterization of thermally-activated artificial muscles based on coiled nylon fishing lines". *AIP Advances* (5).
- [4] Ćwikła A. 2008. „Medyczne zastosowania materiałów inteligentnych”. *Scientific Bulletin of Chełm* (1): 15–28.
- [5] Hamamoto I. et. al. 2006. "Development of a flexible displacement sensor using nylon string coated with carbon and its application for McKibben actuator". *SICE-ICASE International Joint Conference – Conference Materials: 1943–1946*.
- [6] Kaleta J. 2013. „Materiały magnetyczne Smart. Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie”. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*.
- [7] Lai W. 2011. "Characteristics of dielectric elastomers and fabrication of dielectric elastomer actuators for artificial muscle applications", rozprawa doktorska. Iowa State University.
- [8] Madden J.D.W., S. Kianzad. 2015. "Twisted Lines : Artificial muscle and advanced instruments can be formed from nylon threads and fabric". *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: 32–35*.
- [9] Materiały inteligentne, <http://www.matint.pl/index.php>, dostęp 28.04.2016 r.
- [10] Mielcarek J., M. Kruszyńska, P. Sokołowski. 2009. „Zastosowanie nanorurek węglowych w medycynie”. *Farm Pol* (4): 251–254.
- [11] Sanusi KO, OL Ayodele, MTE Khan. 2014. "A concise review of the applications of NiTi shape-memory alloys in composite materials". *South African Journal of Science*. Vol. 110 (7/8).
- [12] Sapińska-Wcisło A. 2006. „Mechatroniczne człony wykonawcze z zastosowaniem materiałów inteligentnych”, rozprawa doktorska. Kraków: AGH.
- [13] Sędziak D. 2006. "Basic investigations of electrohydraulic servovalve with piezo-bender element". *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* (2): 185–190.
- [14] Yip M.C., G. Niemeyer. 2015. "High-performance robotic muscles from conductive nylon sewing thread". 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) – Conference Materials: 2313–2318.

mgr inż. Arkadiusz Piotrowiak – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: arkadiusz.piotrowiak@put.poznan.pl

dr hab. inż. Olaf Ciszak – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: olaf.ciszak@put.poznan.pl

mgr inż. Marcin Wiśniewski – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: marcin.wisniewski@put.poznan.pl

mgr inż. Katarzyna Peta – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: katarzyna.p.peta@doctorate.put.poznan.pl