

Profesor Tomasz Krzyżyński
Katedra Mechatroniki i Automatyki
Politechnika Koszalińska

Koszalin, 05.01.2026

Opinia o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Jonasza Hartwicha*

pt. Zastosowanie stopu NiTi w aktuatorach oraz układach sensorycznych wykonanych z kompozytów polimerowych

Badania właściwości układów mechanicznych o stałych lub zmiennych w czasie oddziaływaniach oraz „inteligentnych materiałów”, z których mogą być one wykonywane, początkowo zwykle podejmowane są w zakresie czysto poznawczym, a następnie w różnych dziedzinach możliwych zastosowań. Wraz z rozwojem inżynierii nowych inteligentnych materiałów obserwujemy szybki wzrost liczby innowacyjnych zastosowań tych materiałów, w szczególności jako inteligentnych sensorów lub elementów wykonawczych – aktuatorów, we współczesnych systemach pomiarowych i złożonych układach monitoringu stanu konstrukcji inżynierskich. W aspekcie niezawodnego działania urządzeń mechatronicznych często poszukiwane są rozwiązania oparte na materiałach z pamięcią kształtu, w przypadku których następuje zmiana właściwości na skutek aktywowanych przemian fazowych. Należy wspomnieć o ostatnio popularnych trendach badawczych dotyczących odzyskiwania energii w dowolnej postaci, w tym energii w układach odkształcalnych, gdzie poszukiwane są nowe rozwiązania oparte o inteligentne rozwiązania.

Mimo sporej liczby publikacji, różnego rodzaju raportów badawczych i innych opracowań zawierających wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych, tematyka projektowania i eksploatacji podukładów wykonanych z tzw. inteligentnych materiałów do celów sterowania lub pomiarów w urządzeniach mechanicznych nie traci na aktualności. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest między innymi rosnąca tendencja do zastępowania

* Postępowanie o nadanie mgr. inż. Jonaszowi Hartwichowi stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna prowadzone jest na podstawie przepisów ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 2018 r., przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Sławomir Duda, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Sebastian Sławski.

wykorzystywanych aktywnych podukładów mechatronicznych elementami integrującymi materiały inteligentne z kompozytami wykonanymi techniką przyrostową. Skupiając się tylko na zagadnieniach poruszanych w ocenianej pracy – zastosowaniach stopu Ni-Ti w podukładach urządzeń mechatronicznych – aktuatorach i sensorach wykonanych z kompozytów polimerowych, należy przede wszystkim rozpocząć od opracowania odpowiednich zweryfikowanych eksperymentalnie modeli obliczeniowych, które byłyby przydatne w procesie projektowania.

Brak takich modeli oraz związanych z tym studiów parametrycznych stał się motywacją do podjęcia przez Doktoranta, kierowanego przez Promotorów o znaczących kompetencjach i dorobku w zakresie modelowania i eksploatacji układów mechatronicznych, badań w przedmiotowym zakresie. Rozprawa mgr. inż. Jonasza Hartwicha dotyczy zatem istotnej i aktualnej tematyki badawczej opracowania popartych eksperymentem modeli i uzyskania rezultatów w przypadku projektowania, budowy i eksploatacji kompozytów ze stopem NiTi w roli materiału inteligentnego w zastosowaniach w układach wykonawczych i pomiarowych.

Doktorant, opierając się na dobrze dobranej literaturze (169 pozycji) postanowił zaproponować nowe metody wyznaczania własności elektromechanicznych drutów ze stopów NiTi, w aspekcie możliwych ich zastosowań w nieosłoniętych i zatopionych we wnętrzu struktury kompozytowej, jako aktuatorów i sensorów do monitorowania konstrukcji.

Przedłożona do recenzji praca liczy łącznie 163 strony (w tym 142 strony tekstu zasadniczego), zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim oraz jednostronicową informację o publikacjach i wystąpieniach konferencyjnych, gdzie Doktorant jest jednym z autorów. Konstrukcja rozprawy jest prawidłowa dla tego typu opracowań naukowych i obejmuje wstęp i wprowadzenie, znaczenie poznawcze i aplikacyjne tematyki badawczej, przegląd literatury oraz cel i zakres pracy, a następnie kilka rozdziałów zasadniczych merytorycznie. Początkowe rozdziały przybliżają dotychczasowy stan wiedzy i umiejscowienie tam badań własnych Doktoranta wraz z uzasadnieniem ich podjęcia, a końcowe zawierają podsumowanie i wnioski końcowe.

Cel i przedmiot rozprawy, struktura i zakres pracy.

Zasadniczym celem rozprawy jest przegląd na podstawie literatury oraz wybór na podstawie własnych badań teoretycznych i eksperymentalnych najlepszego opisu oddziaływań w połączonych układach elektromechanicznych, w szczególności nieosłoniętych i zatopionych we wnętrzu struktury kompozytowej drutach ze stopu NiTi. Za pomocą

autorskiego stanowiska badawczego i nowej metodyki wyznaczania własności elektromechanicznych drutów ze stopów NiTi przeprowadzono badania, które pozwoliły na znaczne pogłębienie wiedzy na temat własności stopów NiTi możliwych do potencjalnego wykorzystania w monitorowaniu strukturalnym i w aktuatorach typu „self-sensing”.

W Rozdziale pierwszym i drugim Doktorant zawarł wstępne rozważania dotyczące zastosowań materiałów inteligentnych, a następnie przedstawił obszerne i ciekawe wprowadzenie do zasadniczej tematyki pracy w postaci zastosowań materiałów opartych o stopy niklu i tytanu (NiTi), w szczególności w świetle ich właściwości elektromechanicznych pod wpływem przemian struktury krystalicznej.

W Rozdziale trzecim Doktorant dokonał przeglądu najważniejszych publikacji z zakresu tematycznego pracy, skupiając uwagę na rezultatach dotyczących zjawisk fizycznych i modeli materiałowych rozpatrywanych w rozprawie, przede wszystkim w zakresie zastosowań stopów NiTi w aktuatorach i w układach sensorycznych. Najważniejszym wnioskiem wynikającym z tego przeglądu jest stwierdzenie występowania w literaturze sporych rozbieżności w zakresie wyników pomiarów zależności pomiędzy własnościami mechanicznymi a elektrycznymi stopów NiTi, w szczególności w elementach zintegrowanych z typu „self-sensing” oraz w elementach sensorycznych stosowanych do monitorowania stanu konstrukcji inżynierskich, co w pewnym sensie stanowiło motywację podjęcia przez Doktoranta tejże tematyki.

W Rozdziale czwartym Doktorant przedstawił pokrótce cel przeprowadzonych badań, podając ich poszczególne etapy, również w formie dość szczegółowego schematu blokowego, przy czym etapy te odpowiadają strukturze przedłożonej rozprawy doktorskiej.

W Rozdziale piątym Doktorant dokonał prezentacji wytworzonej aparatury badawczej, szczegółowo omawiając poszczególne jej moduły składowe. Zbudowany moduł akwizycji danych umożliwia odczyt danych z czujników analogowych i pomiar rezystancji elektrycznej. Zastosowany moduł sterowania pozwala na wysyłanie poleceń do innych modułów oraz synchronizację zbieranych w czasie rzeczywistym danych pomiarowych. Moduły pomocnicze wspomagały pomiar przemieszczenia, aktywację aktuatorów NiTi lub pomiar siły. W module roboczym dokonywano m. in. realizacji cyklicznego obciążenia badanych próbek, a zróżnicowane konfiguracje modułów umożliwiały m.in. cykliczne rozciąganie lub zginanie.

W Rozdziale szóstym zawarto omówienie badań eksperymentalnych wpływu obciążenia mechanicznego na właściwości elektryczne stopów NiTi, wraz z podaniem zarysu metodyki i rezultatów oraz analizą i dyskusją wyników. Badania dotyczyły dwóch obszarów – oceny własności drutów ze stopów NiTi w świetle potencjalnego ich wykorzystania w układach

sensorycznych oraz oceny możliwego wykorzystania zmian właściwości elektrycznych drutów ze stopów NiTi wewnątrz struktury kompozytowej, w zastosowaniu do monitoringu konstrukcji.

W Rozdziale siódmym zawarto omówienie badań eksperymentalnych zmian własności stopów NiTi wynikających z przemian fazowych, wraz z podaniem zarysu metodyki i rezultatów oraz analizą i dyskusją wyników. Badania dotyczyły dwóch obszarów – oceny zmian własności stopów NiTi wynikających z przemian fazowych oraz oceny właściwości aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi w osnowie z PLA.

Rozdział ósmy poświęcony jest w całości prezentacji badań numerycznych stopów NiTi. Przedstawiono przyjęty do obliczeń model materiałowy i sposób eksperymentalnego wyznaczenia jego parametrów. Badania numeryczne dotyczyły dwóch obszarów – pasywnych struktur kompozytowych wykonanych na bazie stopów NiTi w osnowie z poliaktydu oraz aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi w osnowie z PLA. W obydwu przypadkach omówiono model numeryczny i użyte oprogramowanie oraz metodykę symulacji komputerowej, wraz z dyskusją uzyskanych rezultatów.

W Rozdziale dziewiątym i dziesiątym Doktorant przedstawił podsumowanie pracy i najważniejsze wnioski, a następnie informację o swoich dokonaniach w postaci publikacji i referatów konferencyjnych powiązanych tematycznie z przedłożoną rozprawą doktorską. Na końcu rozprawy dołączono jej streszczenie i spis cytowanej i omawianej w treści literatury.

Najważniejsze rezultaty uzyskane w rozprawie

Na wstępie Doktorant umiejscowił swoje badania na tle rezultatów publikowanych w ostatnich latach w światowej literaturze, czyniąc to w sposób obszerny i wyczerpujący.

Pierwsza grupa badań dotyczyła właściwości elektrycznych stopów NiTi możliwych do wykorzystania w układach sensorycznych. Wykazano występowanie wpływu odkształcenia i reorientacji struktur na zmianę rezystancji cienkich drutów ze stopu NiTi, w przypadku dwóch różnych rodzajów obciążenia. Pierwszym było cykliczne rozciąganie drutów ze stałym przemieszczeniem, gdzie badana próbka w każdym cyklu była rozciągana do osiągnięcia ustalonego położenia. Drugim było cykliczne rozciąganie drutów ze stałą siłą, gdzie badana próbka w każdym cyklu była rozciągana do osiągnięcia ustalonej siły. Zaobserwowano spadek rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu rozciągania w przypadku cyklicznego rozciągania próbki stopu NiTi ze stałym przemieszczeniem, natomiast podczas rozciągania ze stałą siłą, zaobserwowano wzrost wartości rezystancji elektrycznej.

W obydwu rodzajach obciążenia największą zmianę wartości rezystancji zaobserwowano podczas początkowych cykli.

Druga grupa badań dotyczyła właściwości elektrycznych stopów NiTi w strukturach kompozytowych. Zaprojektowano i wykonano próbki stanowiące proste kompozyty o osnowie z PLA z zatopionym wewnątrz drutem ze stopu NiTi, ułożonym w sposób analogiczny do rozety tensometrycznej. Tak powstałe próbki poddano próbie cyklicznego zginania i również w tym przypadku zaobserwowano powiązany z odkształceniem spadek rezystancji po każdym kolejnym cyklu obciążenia. Ponadto zauważono, że przebiegi rezystancji zarejestrowane dla drutów umieszczonych we wnętrzu osnowy z PLA są też bardziej stabilne od przebiegów zarejestrowanych dla nieosłoniętych drutów.

Kolejną grupą przebadanych zagadnień były właściwości aktuatorów wykorzystujących stopy NiTi. W celu określenia ich właściwości mechanicznych, wyznaczono krzywą rozciągania stopu NiTi za pomocą eksperymentu, a równolegle przeprowadzono badania symulacyjne w celu potwierdzenia zgodności przyjętego do obliczeń modelu materiałowego. W dalszych badaniach zbudowano aktuator będący kompozytem składającym się z zatopionego we wnętrzu osnowy drutu ze NiTi. Tak wykonane próbki obciążono stałą siłą przyłożoną z pomocą stempla w centralnej jej części. Na skutek aktywacji aktuatora, wywołując przemiany stopu NiTi, odkształcenie wywołane obciążeniem zostało częściowo skompensowane. Należy nadmienić, że przeprowadzone badania pozwoliły na weryfikację wyników uzyskanych podczas symulacji, co otworzyło możliwość wykorzystania opracowanego modelu numerycznego w szerszym zakresie badań symulacyjnych.

Przeprowadzono badania symulacyjne mające na celu określenie czy dobrany układ drutu w kompozycie jest odpowiedni z punktu widzenia monitorowania jego odkształceń, w aspekcie monitorowania stanu dowolnej konstrukcji. Symulowano cykliczne zginanie próbki kompozytowej, identyfikując najbardziej obciążone druty, które ulegając reorientacji struktury martenzytu powodują spadek rezystancji w funkcji cykli obciążenia.

W przypadku modeli układów opracowanych do badania wpływu przemian fazowych w stopach NiTi, stosowanych jako układy wykonawcze bądź pomiarowe uzyskano szereg istotnych i ważnych z punktu widzenia teorii i praktyki inżynierskiej rezultatów. Należy podkreślić, że większość badań przeprowadzona była za pomocą metod eksperymentalnych, a wybrane rezultaty badań symulacyjnych znalazły potwierdzenie podczas eksperymentu. Praca jest bogato ilustrowana wykresami, schematami i tabelami.

Uwagi szczegółowe

W rozprawie dostrzeżono kilka usterek redakcyjnych, które nie wpływają na jej przekaz merytoryczny. W zakresie uwag redakcyjnych komentarza wymaga Rysunek 2.2. W jego opisie w tekście pracy jest mowa o prognozie na rok 2026, a następnie czytamy o roku 2016, przy czym przywołane są publikacje dotyczące stanu na rok 2014 (lub 2011). Ponadto, podsumowanie pracy (Rozdział 9, str. 137 i 138), zawiera podobne sformułowania jak podsumowanie Rozdziału 6 (str. 73 i 88). Proszę również o wyjaśnienie terminu „fluktuacje powietrza” (str. 88 i 138). Ponadto, Doktorant w swej rozprawie bardzo często używa słowa „prawdopodobnie”, co sprawia, że nie wiemy, czy jest to oznaką braku pewności lub wiary co do uzyskanych wyników, czy też jest to zbyt potoczne zastąpienie sformowań typu „możliwe, zapewne, przypuszczalnie itp.”. Poniżej podaję przykłady i proszę o komentarz.

*Wynika to **prawdopodobnie** z faktu, iż różne czynniki wywierają różny wpływ na obserwowane zjawiska. (str. 73, str. 137). Zjawisko to możliwe było do zaobserwowania w większości próbek i wynika **najprawdopodobniej** z częściowej degradacji materiału osnowy wskutek cyklicznego obciążenia (str. 85). Istotny rozrzut danych w początkowych cyklach pomiędzy różnymi próbkami **prawdopodobnie** jest spowodowany ograniczoną dokładnością, z jaką zostały wykonane poszczególne próbki badawcze (str. 88). Wynika to **najprawdopodobniej** z faktu, iż w próbce kompozytowej odkształceniu w trakcie cyklu ulega fragment drutu o znacznie większej długości, w związku z czym początkowa rezystancja elektryczna drutu jest nawet o rząd wielkości większa (str. 88). **Najprawdopodobniej** przyczyną tego faktu jest wykorzystanie do zamodelowania osnowy parametrów materiałowych PLA pochodzących z katalogu producenta, a nie wyznaczonych na podstawie konkretnych badań materiałowych próbek wydrukowanych na drukarce 3D użytej w niniejszej pracy (str. 136). Przebiegi rezystancji zarejestrowane dla drutów umieszczonych we wnętrzu osnowy z PLA są też bardziej stabilne od przebiegów zarejestrowanych dla nieosłoniętych drutów, co jest **prawdopodobnie** związane z tym, iż drut ze stopu NiTi we wnętrzu osnowy jest w większym stopniu chroniony przed warunkami otoczenia, w tym zwłaszcza przed fluktuacjami powietrza (str. 138). Wynika to **najprawdopodobniej** z faktu, iż w próbce kompozytowej odkształceniu w trakcie cyklu ulega fragment drutu o znacznie większej długości, przy czym początkowa rezystancja elektryczna drutu jest nawet o rząd wielkości większa (str. 138). Te fragmenty drutu ulegają więc reorientacji struktury martenzytu z czego **najprawdopodobniej** wynika efekt spadku rezystancji w funkcji cykli obciążenia. (str. 139). Istotny rozrzut danych w początkowych cyklach pomiędzy różnymi próbkami **prawdopodobnie** jest spowodowany ograniczoną dokładnością, z jaką zostały wykonane poszczególne próbki badawcze (str. 163).*

Ogólna ocena merytoryczna

Pomimo faktu, iż opiniowana rozprawa nie ma tezy lub hipotezy badawczej, można w niej wyodrębnić trzy grupy zagadnień, które sformułowano i przebadano w sposób prawidłowy. W świetle zastosowań drutów ze stopów NiTi w układach sensorycznych i wykonawczych, zbadano wpływ obciążenia mechanicznego na właściwości elektryczne cienkich drutów ze stopu NiTi nieosłoniętych oraz w osnowie polimerowej, zbadano wpływ przemiany fazowej na zmiany właściwości mechanicznych cienkich drutów ze stopu NiTi i wykonanych z ich wykorzystaniem kompozytów oraz opracowano model symulacyjny badanych eksperymentalnie kompozytów, co pozwoliło na znaczne poszerzenie zakresu badań.

Przedłożoną pracę należy ocenić wysoko. Przede wszystkim ocena ta dotyczy rzetelnego, wyczerpującego i przystępnego przedstawienia sposobu realizacji postawionego w rozprawie celu naukowego, zarówno w zakresie podstaw teoretycznych, eksperymentu i badań symulacyjnych. Ponadto, ocena ta dotyczy efektywnego rozwiązania przez Doktoranta szeregu pozornie błahych, jednak istotnych problemów praktycznych związanych z przygotowaniem i samym przebiegiem eksperymentu. Na podkreślenie zasługuje również podjęty przez Doktoranta wysiłek budowy złożonego z dedykowanych modułów stanowiska do badań doświadczalnych, mających na celu rzetelną weryfikację opracowanych modeli rozpatrywanych układów. **Ponadto, jak wynika z dołączonego wykazu, część z prezentowanych w Rozprawie rezultatów została opublikowana w uznanych i renomowanych czasopismach oraz poddana dyskusji na międzynarodowych konferencjach, co stanowi przesłankę do Jej wyróżnienia.**

Podsumowanie i wniosek końcowy

Mając powyższe na uwadze oraz fakt, iż rozwiązywane problemy badawcze dotyczą bezpośrednio zagadnień teoretycznych i doświadczalnych zastosowań stopu NiTi jako materiału inteligentnego do stosowania we współczesnych mechatronicznych systemach pomiarowych i wykonawczych, należy stwierdzić, że przedłożona rozprawa doktorska prezentuje bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Przedstawiona rozprawa doktorska niewątpliwie wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta, o czym świadczą również publikacje z Jego udziałem oraz wystąpienia konferencyjne.

Bezdyskusyjny jest również fakt, że przedłożona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a ponadto stanowi potencjalne zastosowanie w wielu sektorach gospodarki opartych o nowoczesne systemy mechatroniki, gdzie zachodzi potrzeba sterowania za pomocą inteligentnych aktuatorów, bądź konieczność monitorowania stanu konstrukcji inżynierskich oparta o inteligentne sensory.

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorant wykazuje bardzo dobrą znajomość podjętej tematyki badawczej, poprawnie przeprowadził badania eksperymentalne i symulacyjne, wykazując się znaczącymi kompetencjami w zakresie stosowania procedur obliczeniowych i badań doświadczalnych. Przedstawiona rozprawa doktorska w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna spełnia wymogi przepisów ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 2018 r, w zakresie nadawania stopnia naukowego doktora. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr. inż. Jonasza Hartwicha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. Tomasz Krzyżyński

/podpis odręczny/

*wytaczenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)