

Gliwice, dn. 20.12.2024 r.

## RECENZJA

pracy doktorskiej

Pana mgr. inż. Piotra Waltera

pod tytułem

„Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych”

wykonanej pod opieką promotora  
Prof. dr hab. inż. Małgorzaty Jakubowskiej,  
i promotora pomocniczego  
dr. inż. Daniela Janczaka

Podstawą opracowania niniejszej recenzji była uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej nr 770/II-IM/2024 z dnia 9.10.2024 na podstawie, której zostałem powołany na recenzenta w przewodzie doktorskim mgra inż. Piotra Waltera.

### 1. Wprowadzenie

Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej podjął się opracowania sytemu pomiarowego opartego na sensorze rozciągnięcia wraz z systemem akwizycji oraz analizy danych. W dzisiejszych czasach, gdy rehabilitacja staje się jedną z ważniejszych dziedzin współczesnej medycyny, wspieranie jej za pomocą zaawansowanych technologii produkcji elementów z nowoczesnych materiałów jest niezwykle cenne i zasługuje na szczególną uwagę. Liczba urazów komunikacyjnych czy związanych z uprawianiem sportów wyczynowych i ekstremalnych, jak również obserwowane starzenie się społeczeństwa w krajach wysokorozwiniętych, nieodłącznie związana jest z koniecznymi do przeprowadzania zabiegami rehabilitacyjnymi. Wsparcie medycyny technologią łączącą nowoczesne materiały i metody pomiarowe znacząco rozszerza możliwości diagnostyczne i niesie ze sobą ogromne korzyści dla pacjenta. Zaproponowane w recenzowanej pracy rozwiązanie stanowi ciekawe rozwinięcie zagadnień monitorowania i oceny ruchu stawu w trakcie procesu rehabilitacji stawu. Łączy w sobie szczegółową wiedzę zarówno z zakresu zastosowania nowoczesnych materiałów kompozytowych o własnościach piezorezystancyjnych, jak również procesów ich wytwarzania. Uzupełnieniem jest w tym przypadku

wiedza aplikacyjna, informacje o ograniczeniach proponowanego rozwiązania, jak również wskazanie kierunków dalszego rozwoju. Interdyscyplinarność tej pracy jest w tym

przypadku nie do podważenia. Zawiera ona zagadnienia nie tylko z zakresu inżynierii mechanicznej, ale również łączy je z zagadnieniami z zakresu inżynierii materiałowej, analizy i przetwarzania sygnałów oraz medycyny, stanowiąc o wyjątkowym charakterze pracy. Opracowanie technologii uzyskiwania sensorów z opracowanego materiału kompozytowego w technologii sitodruku, umożliwia elastyczną produkcję sensorów rozciągnięcia, ich skalowalność oraz uniwersalność aplikacyjną. Biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy z zakresu zastosowań nowoczesnych materiałów inżynierskich w medycynie i rehabilitacji, a także po analizie dostępnej literatury stwierdzić należy, że podjęte przez Doktoranta rozważania i przeprowadzenie badań od zaprojektowania materiału, przez dobór technologii aż po uzyskanie gotowego układu pomiarowo-diagnostycznego wydają się być więcej niż celowe i bardzo dobrze wpisują się w nowoczesne trendy badań w tym zakresie, stanowiąc obiecujące rozwiązanie do wdrożenia w przyszłości.

## 2. Omówienie rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Piotra Waltera pt. **„Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych”** posiada klasyczny układ, który zawiera przegląd dostępnej literatury światowej, prowadzone badania własne oraz podsumowanie i wnioski pracy. Przeprowadzone badania własne obejmują obszary wytwarzania sensorów metodami wytłaczania oraz sitodruku oraz ich charakterystykę a także budowę sensora oraz stanowiska badawczo-pomiarowego.

Recenzowana praca liczy 218 stron, 8 rozdziałów, 38 tablic i 102 rysunki. Spis literaturowy liczy 416 pozycji literatury krajowej oraz zagranicznej. W 1 z nich Doktorant jest pierwszym współautorem, a publikacja indeksowana jest w bazie WoS i posiada IF. Prawdopodobnie przez pomyłkę publikacja ta znalazła się w spisie literatury dwukrotnie, pod numerem 153 i następnie 222.

Na początku pracy Autor zamieszcza streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis treści. Rozdział pierwszy rozpoczyna przegląd literatury, odnosząc się do zagadnień telemedycyny i telerehabilitacji. Druga część wprowadzenia to zagadnienia detekcji ruchu stawu wraz z charakteryzacją dostępnych systemów śledzenia ruchu, zjawisk zachodzących przy zgięciu stawu i związanych z tym metod detekcji oraz ich ograniczeń. Ta część pracy wprowadza w zagadnienie jednocześnie przybliżając obszar, w którym umiejscowione są realizowane w pracy zadania.

W rozdziale 2 dotyczącym dalej przeglądu literatury opisane zostały zagadnienia dotyczące sensorów rozciągnięcia z przetwornikiem piezoelektrycznym. Autor przedstawia definicję sensora oraz opisuje elementy składowe toru pomiarowego, potrzebnego do akwizycji danych. Opisuje efekt piezorezystywności oraz w sposób wystarczający kompozyty przewodnik-izolator. Charakteryzuje również parametry materiału piezorezystywnego tj. czułość sensora czy wrażliwość sensora na odkształcenia. Na końcu rozdziału dokonuje również przeglądu kompozytów piezorezystywnych stosowanych w telerehabilitacji. Rozdział ten jest zarazem ostatnim rozdziałem części teoretycznej.



Co do formy części przeglądowej nie mam większych zastrzeżeń, może poza błędami edycyjnymi i interpunkcyjnymi, to pewien niedosyt jednak może stwarzać jej objętość, ponieważ są to zaledwie 22 strony. Przy 165 pozycjach literaturowych, wykorzystanych w tej części, wskazanym byłoby tę część rozbudować. Jednak w obecnej formie również stanowi poprawne wprowadzenie w zagadnienia poruszane w części badawczej.

Część badawczą rozpoczyna rozdział 3. Po krótkim wstępie Autor formułuje cel pracy, którym jest **opracowanie nowatorskiego sensora rozciągnięcia opartego na kompozycie piezorezystywnym, który posłuży do pomiaru ruchu stawu w zastosowaniach telerehabilitacyjnych**. Następnie rozwija i tłumaczy zakres poruszanych zagadnień. Precyzuje cele szczegółowe, którymi są możliwości określenia: zakresu pomiarowego sensora, rozdzielczości pomiaru, jego żywotności, wymiarów i wagi oraz sposobu rejestracji, przetwarzania i prezentacji pozyskanych danych. W dalszej części Autor wyjaśnia zasadę i problem pomiaru, określa istotne warunki, w oparciu o dane literaturowe. W sposób jasny i uporządkowany wprowadza zatem pewną organizację swojej pracy, którą później konsekwentnie realizuje w następnych rozdziałach.

W rozdziale 4 opisane zostały prace nad wytworzeniem sensora rozciągnięcia techniką wytłaczania włókna piezorezystywnego. Użyto w tym celu wytłaczarki ślimakowej oraz materiału na bazie kompozytów termoplastycznych. Opisana została metodologia wytwarzania jak również dobór składników wykorzystywanego kompozytu. Wybrane 14 kompozycji włókna badano pod kątem spełnienia założonych kryteriów przewodności elektrycznej, a następnie te które spełniały przyjęte kryterium konduktywności powyżej  $10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  poddano dalszym badaniom w celu określenia ich własności elektrycznych i mechanicznych i przeprowadzono ten etap bardzo szczegółowo i poprawnie. W końcowej części rozdziału 4 zamieszczono również opis testu uzyskanego włókna na opasce stabilizującej, wskazując na sposób jego mocowania, pracę oraz problemy związane z jego zastosowaniem w proponowanej aplikacji. **Pojawia się tutaj również kolejny cel** wynikający z badań – rozpatrywanie zjawiska pełzania włókien w trakcie ich pracy, co niewątpliwie stanowi o przemyślanym prowadzeniu badań. Rozdział 4 zamyka podsumowanie, w którym Autor wskazuje na szczególne własności opracowanych włókien i określa ich potencjalne obszary zastosowań. Jednocześnie tłumaczy również, dlaczego nie mogą być one wykorzystywane w ramach opracowywanego sensora. Rozdział 5 rozprawy jest najobszerniejszym rozdziałem i skupia się na metodach wytwarzania warstw piezorezystywnych za pomocą technik sitodruku. W pierwszej części tego rozdziału Autor podejmuje się wstępnych badań, w których określa przydatność poszczególnych materiałów (kompozyt SBS, elektroprzewodzące pasty do sitodruku, kompozyt na bazie żywicy winylowej, kompozyt o osnowie PDMS oraz kompozyt na bazie TPU) do wytworzenia elastycznej warstwy piezoelektrycznej, spełniającej kryteria postawione zdefiniowanemu sensorowi rozciągnięcia. Materiały te testowano pod kątem spójności struktury, występowania odkształceń plastycznych i wspomnianego już w rozdziale 3 pełzania, adhezji do podłoża oraz prostoty metod wytwarzania. Ta część również została przygotowana



bardzo dobrze, Autor prezentuje wyniki w sposób jasny, z niewielkimi usterkami edycyjnymi, o których wspomnę na końcu recenzji. Badania prowadzone są jednak w sposób konsekwentny i przemyślany, co niewątpliwie stanowi o jakości tej rozprawy.

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych, Autor typuje materiał spełniający założone kryteria (kompozyt na bazie TPU) i następnie przechodzi do badań nad wytworzeniem pasty piezorezystywnej, opartej na tym kompozycie. Podejmuje badania wpływu wypełniacza kompozytu, wykorzystując sadzę techniczną, wielościennie nanorurki węglowe oraz płatki grafenu, określa: stopień wypełnienia kompozytu, kształt i rozmiary fazy węglowej, siłę oddziaływania między fazą węglową a osnową oraz stopień dyspersji cząstek. W dalszej części tego rozdziału, prezentowane są prace związane z przygotowaniem własnego materiału do sitodruku ze względu na fakt, że proponowany kompozyt TPU nie jest komercyjnie dostępny w postaci gotowej pasty do sitodruku. Część ta zatem stanowi również pewien rozdział badań rozwojowych nad opracowaniem materiału wsadowego do sitodruku, co zasługuje na wyróżnienie. W kolejnych podrozdziałach Autor opisuje konsekwentne dostosowywanie uzyskiwanego materiału do potrzeb wydruku sensora rozciągnięcia, ilustrując te rozważania zarówno uzyskiwanymi wynikami, opisem, jak i prezentacjami graficznymi, co znacząco ułatwia zrozumienie zagadnienia. Na koniec podaje również parametry sitodruku, charakteryzuje strukturę uzyskanego sensora i określa warunki jego mocowania w opasce tekstylnej. Całość kończy stwierdzeniem, że przeprowadzone testy pozwalają na zastosowanie opracowanego rozwiązania w gotowym układzie pomiarowym, który nie ma negatywnego wpływu na swobodę ruchu użytkownika a zatem spełnia kryteria stawiane mu na początku.

W rozdziale 6 Autor dokonuje charakteryzacji trzech past stosując dobrane wcześniej parametry sitodruku. Badaniom poddane zostały warstwy jedno-, dwu-, trzy-, cztero- i pięciowarstwowe przez co możliwe było precyzyjne określenie optymalnego wariantu budowy sensora pod kątem jego własności użytkowo-pomiarowych. Wykonane zostały zarówno próbki do badań piezorezystywności, jak i prototypowych wersji sensora. Przeprowadzone w kolejności badania topografii nadruków pozwoliły na określenie obliczeniowe rezystywności powierzchniowej i oporności właściwej uzyskanych warstw, a następnie poprzez pomiary rezystancji określenie powtarzalności procesu produkcyjnego. Obszerne badania przedstawione w tej części pozwoliły na wytypowanie optymalnego wariantu (nadruki 3-warstwowe), które stanowiły kompromis pomiędzy wymaganiami stawianymi uzyskiwanym warstwom a czasem ich wytwarzania. W ostatnim podrozdziale tej części analizie poddane są właściwości piezorezystywne uzyskanych warstw. Również w tej części należy podkreślić, że Autor rozprawy bardzo sprawnie i w jasny sposób prowadzi czytelnika przez analizowane zagadnienia za pomocą prezentacji wyników, ilustracji oraz dyskusji.

W rozdziale 7 Autor prezentuje prototypowy sensor śledzenia ruchu wykonany w technice sitodruku, opracowany na podstawie badań prowadzonych w poprzednich rozdziałach. Opracowany sensor zbudowany z 3 warstw uzyskanego kompozytu piezorezystywnego na podłożu z folii PET podłączono



do układu pomiarowego, który również został zaproponowany przez Autora. W rozdziale tym, bardzo szczegółowo opisane zostały zarówno założenia, budowa układu pomiarowego, jak i jego działanie. Zaprojektowano i wykonano również obudowę co spowodowało, że opracowany czujnik zyskał formę aplikacyjną. Uzupełnieniem tego jest przedstawiona w podrozdziale 7.1.3 aplikacja na urządzenia mobilne, pozwalająca na obsługę sensora i bezprzewodowe zbieranie danych. Po raz kolejny podkreślę, że Autor doprowadza swoje rozważania do końca, prezentując kompletne rozwiązanie w tym zakresie, wraz z opisem, testami oraz oceną uzyskanych wyników.

Rozdział 8 jest jednocześnie ostatnim rozdziałem rozprawy, w którym Autor dokonuje podsumowania wyników swojej pracy nad opracowaniem sensora piezorezystywnego do zastosowań telerehabilitacyjnych. Ta część odbiega formą od typowych opracowań, gdzie po podsumowaniu zwykle zamieszczane są wypunktowane wnioski. Tutaj tego ostatniego elementu zabrakło, co jednak nie powoduje, że rozdział ten jest niekompletny. Podsumowanie jest syntetyczne, krótkie jak na tak szeroki zakres prezentowanych badań i analiz. Dodatkowo Autor wskazuje w nim motywację i cel podjęcia badań, wszystkie istotne etapy swoich prac, określa podstawowe problemy badawcze z którymi mierzył się podczas ich wykonania oraz po przedstawieniu osiągnięć formułuje również bardzo szeroko perspektywy rozwoju. To ostatnie jest szczególnie cenne w świetle podjętej tematyki oraz uzyskanych wyników, ponieważ pozwala to mieć nadzieję, że proponowane rozwiązanie będzie rozwijane, udoskonalane nie tylko z korzyścią dla dziedziny Inżynieria Mechaniczna czy Inżynieria Materiałowa, ale również dla nauk medycznych. **I to w tej pracy zasługuje na szczególne wyróżnienie, ponieważ możliwość służenia, za pomocą nowoczesnych rozwiązań technicznych i materiałowych, poprawie i ochronie zdrowia ludzkiego stanowi najwyższy cel i wartość.** Ponadto Autor wskazuje jednak również inne rozwiązania z zastosowaniem opracowanych sensorów w aplikacjach diagnostycznych obiektów architektonicznych budowanych w oparciu o materiały tekstylne. Jest to również pośrednio związane z ochroną zdrowia i życia ludzkiego poprzez zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania tego typu obiektów. W pełni zgadzę się z opinią Pana Profesora Andrzeja Koteli, że proponowane rozwiązanie ma bardzo wysoki potencjał rozwojowy i użytkowy i nie tyle powinno, co musi być dalej rozwijane, chociażby patrząc przez pryzmat planów zasygnalizowanych przez Autora dysertacji. Co ważne, rozwój ten możliwy jest, zarówno w zakresie materiałowym, jak i całej strefy związanej z akwizycją i dalszym przetwarzaniem danych.

Pomimo mojej jednoznacznie bardzo wysokiej oceny recenzowanej pracy, poniżej przedstawiam uwagi, które nasunęły mi się podczas jej lektury.

1. Autor formułuje temat pracy jako „Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych. Następnie na stronie 34 – za cel pracy Autor stawia opracowanie sensora piezorezystywnego, który posłuży do pomiaru ruchu stawu w zastosowaniach telerehabilitacyjnych, by następnie na



i ewentualnie różnych dla obu regulowanych stref? Czy mogło to mieć wpływ na opisane później problemy z transportem mieszaniny?

9. Na stronie 50 – dyskusyjne jest moim zdaniem wyznaczanie linii trendu dla wyników z rys. 11 – trzy punkty nie są w tym przypadku reprezentatywne, szczególnie przy zaprezentowanych wynikach.

Pozostałe uwagi edycyjne:

- na stronie 11 – wymieniając kolejno Autor stosuje duże litery (strony 13, 16 i dalej) – należałoby to ujednolicić,
- na stronie 12 – kropki przed nawiasami kwadratowym bibliografii (również dalej w całej pracy) – kropkę stawiamy po nawiasie z przypisem,
- na stronie 26 – po wzorze Autor w pracy zwykle objaśnienia wymienia od myślników, a w tym przypadku ciągłym tekstem,
- na stronie 125 – użyto określenia „srebrowe” – raczej poprawnym terminem jest „srebrne”,
- na str. 166 – użyto określenia „fenomenalnymi” – w przypadku prac naukowych, a w szczególności technicznych, należy unikać tego typu stwierdzeń zastępując je określeniami „wysokiej jakości”, „szczególnymi” itp.

Wszystkie przekazane powyżej uwagi traktuję nie jako zarzuty do pracy, umniejszającej jej wartości, a jedynie jako dyskusję z Doktorantem. Mam nadzieję, że przekazane uwagi będą pomocne w dalszych badaniach prowadzonych przez Autora oraz publikacjach prezentowanych wyników.

Moja ostateczna ocena opiniowanej pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Waltera jest bardzo pozytywna. Jestem pod bardzo dużym wrażeniem podjętego przez Doktoranta zagadnienia opracowania od samych założeń, nie tylko do opracowania materiału i gotowej postaci sensora, ale również kompletnego rozwiązania diagnostycznego. Rozwiązania, które moim zdaniem może być bez przeszkód przekazanie do testów, ponieważ w żaden sposób nie przeszkadza w normalnych zabiegach rehabilitacyjnych. Recenzowana praca udowadnia, że Doktorant osiągnął wystarczający poziom wiedzy, aby prowadzić badania, planować ich zakres i konsekwentnie je realizować, analizując wyniki, odrzucając błędne rozwiązania i jednocześnie wyciągać z tych działań wnioski. Poziom merytoryczny pracy oceniam wysoko, a prezentowane wyniki badań własnych są oryginalne, stanowią wartościowe uzupełnienie istniejącego już stanu wiedzy w zakresie budowy, wytwarzania sensorów rozciągnięcia z jednoczesnymi możliwościami ich zastosowania w zastosowaniach telerehabilitacyjnych, ale również jak sam Autor wspomniał, możliwe są inne obszary. W mojej opinii przedstawiona praca doktorska Pana mgr. inż. Piotra Waltera w pełni zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną i formalną.

stronie 42 cel ten rozszerzyć do opracowania kompletnego rozwiązania sensorycznego z uwzględnieniem montażu tekstronicznego oraz przetwarzania rejestrowanego sygnału. W mojej ocenie to jest chyba najlepsze określenie całej pracy zawartej w recenzowanej dysertacji i oddaje cały zakres opracowania. Jest to również moim zdaniem duże osiągnięcie Doktoranta.

2. Na stronie 15 – pojawia się termin ‘mocap’ jako skrót od ‘motion capture’ – ponieważ praca jest w języku polskim to lepiej byłoby stosować termin ‘przechwytywanie ruchu’ bądź ‘śledzenie ruchu’ podając anglojęzyczną terminologię w nawiasie.
3. Podobnie na stronie 26 użyto skrótu GF – ang. gauge factor – do którego nie zastosowano polskiego odpowiednika. Dodatkowo znaczenie skrótu wyjaśniono dopiero dwie strony dalej (na stronie 28). Wszelkie skróty i akronim należy podawać z pełnymi nazwami przy ich pierwszym użyciu.
4. Na stronie 34 – Autor stwierdza, że materiał sensora podlega naprężeniom rozciągającym i zginającym. W przypadku zginania elementu mogą w nim powstać naprężenia rozciągające lub ściskające, w zależności od obszaru elementu. W takim razie powstaje pytanie: co to są naprężenia zginające i jak powstają?
5. Ponadto należy również zadać pytanie czy te naprężenia były zmierzone (np. przy rozciąganiu w rozdziale 5)? Prowadzono badania próbek przy rozciągnięciu 10, 20 i 30%, jednak nie znalazłem nigdzie wartości naprężeń z tych prób. Czy te wartości zmierzono?
6. Na stronie 35 – według opisu zamieszczono schemat ideowy sensora i umiejscowienie materiału piezorezystywnego na opasce – jednak moim zdaniem zarówno rys. a jak i b raczej obrazuje umiejscowienie sensora. Pytanie co Autor rozumie w tym przypadku pod pojęciem schematu ideowego sensora? Dodatkowa uwaga – dodanie strzałek (obrazujących kierunek rozciągnięcia) w przypadku rys. b z pewnością nie zmniejszy jego czytelności, a poprawi na pewno jego znaczenie.
7. Na stronie 37 – rys. 7 – brakuje opisu wielkości na osi rzędnych prezentowanego wykresu – oprócz opisu powinno się ono znaleźć również na osi, a ewentualnie oznaczenie należy umieścić w nawiasie. Ta usterka pojawia się w dalszej części pracy w wielu miejscach, dlatego nie wymieniam ich wszystkich.
8. Na stronie 46 – zawarto informację, że zastosowano wyciągarkę o regulowanych strefach, ale obie nastawiono na temperaturę 150°C. Czy podjęto próby przy innych temperaturach





## Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana praca doktorska Pana mgr. inż. Piotra Waltera pod tytułem „Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych” spełnia wymogi formalne stawiane pracom na stopień doktora nauk Inżynieryjno-technicznych, w rozumieniu zapisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Wnoszę zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Piotra Waltera do publicznej obrony, jak również procedowanie kolejnych etapów w zakresie ubiegania się przez Doktoranta o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie: Inżynieria Mechaniczna. Jednocześnie wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o wyróżnienie tej rozprawy.

  
dr hab. inż. Tomasz Kik, Prof. PŚ