

dr hab. prof. Tomasz Klekiel, prof. UZ
Instytut Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
Wydział Nauk Inżynieryjno-Technicznych
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Licealna 9
65-419 Zielona Góra

Wpłynęło
do Biura Wydziału MII
dnia 10.09.2026
Lp. 735
Grywał

Zielona Góra, 3.09.2026

Recenzja

rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Radosława Wolnego

**pt. „BADANIA EKSPERYMENTALNE WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH TKANEK
MIĘKKICH KRĘGOSŁUPA”**

Wprowadzenie

Recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej Uchwała 40/2026 z dnia 17.06.2026.

Oceniana praca została przygotowana zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki w formie tematycznie spójnego zbioru artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych. Rozprawa doktorska Pana Radosława Wolnego składa się z pięciu publikacji oraz zawiera szczegółowy opis stanowiący syntezę dokonań i podsumowanie wyników badań.

Przedmiotem badań Doktoranta jest metodologia prowadzenia badań eksperymentalnych tkanek miękkich, w tym więzadeł kręgosłupa i opony twardej, oparta na badaniach wytrzymałościowych prowadzonych zarówno na standardowych maszynach wytrzymałościowych jak również na autorskich stanowiskach zaprojektowanych m. in. w celu uzyskania odpowiednich warunków środowiskowych i z uwzględnieniem kierunków obciążeń i prędkości odkształceń. Wykorzystano autorskie oprogramowanie do analizy wyników badań,

Celem ocenianej pracy było „C1: opracowanie spójnego protokołu eksperymentalnego badań więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej. Protokół obejmuje przygotowanie i mocowanie próbek, przebieg testu, pomiar geometrii i odkształcenia, przetwarzanie i analizę danych oraz „C2: pozyskanie danych materiałowych więzadeł i opony twardej kręgosłupa w postaci użytecznej do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym”. Sformułowane cele odpowiadają na potrzebę uzyskania wiarygodnych, powtarzalnych i porównywalnych danych mechanicznych dla więzadeł kręgosłupa i opony twardej. Opracowanie spójnego protokołu (C1) stanowi niezbędną podstawę do pozyskania odpowiednio przygotowanych danych materiałowych (C2), które mogą zostać wykorzystane do identyfikacji praw konstytutywnych i budowy modeli numerycznych.

Do oceny przedstawiono dokument zawierający 58 stron autorskiej syntezy oraz zbiór przedruków 5 publikacji wskazanych przez doktoranta do oceny. Przedstawiona do oceny synteza dorobku zawiera: streszczenie, podziękowania, opis cyklu publikacji, osiągnięcia, aktywność naukową doktoranta, Część pierwsza zawierająca obszernie wprowadzenie do tematyki realizowanej pracy, oraz główne osiągnięcia zarówno doktoranta jak i całego zespołu. Część druga stanowi przedruk publikacji wskazanych do oceny, a Część trzecia to oświadczenia współautorów.

Opis zawartości pracy

Układ rozprawy, na który składa się pięć tematycznie powiązanych publikacji w czasopismach naukowych, stanowi gruntowną analizę problemu sformułowanego w celu. Efekt w postaci propozycji protokołu eksperymentalnego badań, zwłaszcza układów biologicznych, wymagał przeprowadzenia wielu żmudnych i precyzyjnych eksperymentów. Wnioski płynące z ich realizacji stanowią cenną wiedzę nie tylko ze względu na uzyskane wyniki badań, lecz także na doświadczenie zdobyte w trakcie ich przeprowadzania.

Streszczenie przedstawione w części pierwszej analizowanego dokumentu zawiera następujące rozdziały: Wstęp, Rozwój protokołu eksperymentalnego, Synteza załączonych publikacji, struktura cyklu publikacji, prace uzupełniające poza cyklem publikacji, Podsumowanie i perspektywy dalszych badań. Załączono także Suplement szczegółowo opisujący podstawy anatomiczne i mechaniczne metodyki badawczej użytej w pracy.

W części drugiej ocenianego dokumentu znajduje się pięć publikacji naukowych, których merytoryczna zawartość stanowi grunt dla realizacji celów sformułowanych w rozprawie:

A1: pt. „Influence of a Lighting Column in the Working Width of a W-Beam Barrier on TB51 Crash Test” podejmuje istotny problem inżynierii bezpieczeństwa dróg, jakim jest interakcja między certyfikowanymi urządzeniami pasywnymi w sytuacjach, gdy ich strefa robocza nie jest wolna od przeszkód. Głównym celem pracy była analiza wpływu instalacji słupa oświetleniowego na wyniki testu zderzeniowego TB51. Autorzy weryfikowali, czy systemy, które indywidualnie spełniają wymogi normy EN 1317 oraz EN 12767, działają bezpiecznie. Praca dostarcza dowodów eksperymentalnych oraz numerycznych, które jednoznacznie wskazują na niepożądane interakcje w badanej konfiguracji, prowadzące do awarii barier w kontekście przekierowania autobusu.

Metodologia badań przedstawiona w tym artykule jest kompleksowa i opiera się na podejściu hybrydowym łączącym pełnoskalowy test zderzeniowy z symulacjami metodą elementów skończonych. Badania eksperymentalne przeprowadzono na torze testowym IBOS w ramach zmodyfikowanego testu TB51, z użyciem autobusu 13-tonowego poruszającego się z prędkością zbliżoną do normatywnej. Symulacje numeryczne wykorzystywały oprogramowanie LS-Dyna, w którym zmodelowano barierki, słup oświetleniowy, grunt oraz pojazd oraz właściwości materiałowe. Przedstawione badania mają znaczenie dla badań nad wytrzymałością ludzkiego ciała, ponieważ pokazują, jak zachowanie infrastruktury drogowej podczas zderzenia wpływa na ruch pojazdu i obciążenia działające na jego pasażerów. Uzyskane w testach i symulacjach dane stanowią cenną wiedzę dla analiz biomechanicznych, pozwalających ocenić obciążenia organizmu człowieka oraz potencjalne ryzyko obrażeń dla różnych scenariuszy wypadków.

A2: pt. „Mechanical response of human thoracic spine ligaments under quasi-static loading: An experimental study” przedstawia wyniki badań nad właściwościami mechanicznymi więzadeł kręgosłupa piersiowego u ludzi. Głównym celem pracy było zbadanie właściwości geometrycznych i mechanicznych więzadeł kręgosłupa piersiowego człowieka poddanych jednoosiowemu, quasi-statycznemu rozciągnięciu. Autorzy wypełnili lukę w istniejącej literaturze z uwagi na ograniczone dane z badań tych struktur. Cel autorów pracy został osiągnięty. Autorzy dostarczyli zestaw danych dla pięciu typów więzadeł (ALL, PLL, CL, LF, ISL + SSL) z kręgosłupów piersiowych czterech dawców, wykonali szczegółową analizę statystyczną oraz porównali wyniki z innymi badaniami (np. Myklebust, Chazal). Metodologia badań opierała się na wykorzystaniu czterech kręgosłupów piersiowych z programu darowania ciał. Zostają z nich wyizolowane specyficzne funkcjonalne jednostki kręgosłupa (FSUs), a następnie przygotowano próbki typu kość-więzadło-kość (BLB). Kluczowym elementem metodyki było zastosowanie wzmacniania części kostnych za pomocą żywicy epoksydowej oraz opasania drutem, co miało na celu zapobieganie oderwaniu tkanki podczas testu. Próbkę poddano procesowi kondycjonowania (preconditioning) oraz testom rozciągania na własnym stanowisku badawczym z kontrolą warunków środowiskowych (temperatura 36,6 °C, wilgotność 95%). Warto zaznaczyć, że w tekście brakuje szczegółowych informacji dotyczących czasu przechowywania próbek przed zamrożeniem lub mrożenia po sekcji, co może wpłynąć na wiarygodność porównań z badaniami, które nie stosowały zamrażania.

A3: pt. „The role of sand filler in enhancing the mechanical properties of polymethylmethacrylate composites” przedstawia wyniki badań wpływu użycia piasku jako wypełniacza w mieszance żywicy PMMA służącej do formowania części chwytnej próbek kostnych. Ocenie podlegał wpływ metody kształtowania części chwytnej próbek na właściwości mechaniczne układu ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w badaniach biomechanicznych. Autorzy połączyli badania eksperymentalne z modelowaniem numerycznym w celu ustalenia, w jaki sposób dodatek wypełniacza wpływa na kluczowe parametry mechaniczne, a także zweryfikowano, czy zwiększenie sztywności żywicy poprzez dodatek piasku może poprawić precyzję testów biomechanicznych poprzez redukcję przemieszczeń żywicy w maszynie testowej. Metodologia badań polega na opracowaniu czterech mieszanin i wykonaniu próbek i przeprowadzeniu testów zgodnie z normą ASTM

D638 i z użyciem techniki Korelacji Obrazów Cyfrowych (DIC). Dodatkowo zastosowano metodę elementów skończonych (FEM) w oprogramowaniu ABAQUS, modelując cząstki piasku jako sfery losowo rozmieszczone w macierzy żywicy, aby symulować zachowanie materiału dla różnych udziałów objętościowych wtrąceń.

A4: pt. „Experimental evaluation and constitutive modelling of cervical spine ligaments under low and high strain rates”, dotyczy badań nad odpowiedzią układu biomechanicznego czterech więzadeł szyjnych kręgosłupa człowieka, a mianowicie więzadła podłużnego przedniego (ALL), podłużnego tylnego (PLL), żółtego (LF) oraz torebkowego (CL), pobranych od starszych dawców (w wieku 70–90 lat), zarówno w warunkach niskiej prędkości odkształcenia ($0,5 \text{ s}^{-1}$), jak i wysokiej (50 s^{-1}). Istotnym osiągnięciem pracy było odniesienie wyników badań do modelu konstytutywnego, który precyzyjnie odwzorowuje uzyskane dane eksperymentalne, co miałoby wspierać dalsze badania *in silico* oraz konstrukcję systemów bezpieczeństwa. Autorzy wskazują na istotne niedobory danych w istniejącej literaturze, szczególnie w zakresie danych dotyczących populacji osób starszych oraz wpływu szybkości obciążenia na właściwości tych struktur.

A5: pt. „Exploring the mechanical behavior of the spinal dura mater: experimental insights and measurement dilemmas” zawiera kompleksową analizę właściwości mechanicznych opony twardej rdzenia kręgowego (spinal dura mater) w kontekście wyzwań pomiarowych związanych z jej wymiarami i anizotropią. Głównym celem pracy było zbadanie zachowania próbki pod wpływem jednoosiowego rozciągania oraz ocena wpływu na parametry mechaniczne czterech kluczowych czynników: aplikacji farby do punktowania (speckle-paint), metody pomiaru odkształceń (korelacja cyfrowa obrazu DIC w porównaniu do przemieszczenia uchwytów maszyny), procesu kondycjonowania (preconditioning) oraz demografii dawców. Autorzy postawili sobie również za zadanie standaryzację geometrii próbek za pomocą adaptera drukowanego w technologii 3D oraz wyznaczenie funkcji Poissona (w formie Henckiego). Kluczowym aspektem metodycznym było porównanie wyników z przemieszczenia uchwytu maszyny wytrzymałościowej z pomiarami za pomocą DIC. To pozwoliło na wykrycie systematycznych błędów pomiarowych, takich jak sztywnienie wywołane pokryciem próbki sztywną warstwą spekli/facetek oraz niedoszacowanie odkształceń w metodzie globalnej.

Ocena pracy

Ocenione artykuły dotyczą w szczególności realizacji celu postawionego w dysertacji. Podstawą uzyskania wiarygodnych i porównywalnych wyników badań eksperymentalnych tkanek biologicznych jest opracowanie spójnego i powtarzalnego protokołu badawczego, uwzględniającego specyfikę badanego materiału, jego właściwości mechaniczne oraz wrażliwość na sposób przygotowania i prowadzenia eksperymentu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej, których właściwości mechaniczne są zależne między innymi od geometrii próbki, sposobu jej zamocowania, warunków prowadzenia testu oraz zakresu i sposobu pomiaru odkształcenia. Z tego względu celem C1 jest opracowanie spójnego protokołu eksperymentalnego badań więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej, obejmującego przygotowanie i mocowanie próbek, przebieg testu, pomiar geometrii i odkształcenia, a także przetwarzanie i analizę uzyskanych danych. Standaryzacja tych etapów

jest niezbędna do ograniczenia wpływu czynników metodycznych na wyniki oraz zapewnienia ich powtarzalności i porównywalności pomiędzy poszczególnymi próbkami oraz seriami eksperymentalnymi. Opracowany protokół ma jednocześnie stanowić podstawę do pozyskania danych o odpowiedniej jakości, zakresie i formie, umożliwiającą ich dalsze wykorzystanie w analizach mechanicznych i modelowaniu numerycznym.

Zaproponowany w wyniku realizacji badań protokół eksperymentalny stanowi kompleksową i ustandaryzowaną procedurę prowadzenia badań mechanicznych więzadeł kręgosłupa oraz opony twardej, obejmującą cały łańcuch postępowania – od pozyskania i kwalifikacji materiału biologicznego, poprzez jego preparowanie, przechowywanie i przygotowanie próbek do badań, aż po wykonanie próby mechanicznej, pomiar geometrii i odkształcenia, przetwarzanie danych oraz identyfikację parametrów materiałowych. Protokół zakłada jednoznaczne określenie sposobu pobierania i orientacji próbek względem struktur anatomicznych i kierunku przebiegu włókien, warunków ich przechowywania i nawodnienia, wymiarowania oraz przygotowania powierzchni i końców próbek, a także sposobu ich mocowania w uchwytach. Kolejnym elementem jest standaryzacja warunków prowadzenia testów, w szczególności sposobu przygotowania próbek, doboru zakresu obciążenia oraz szybkości odkształcenia, z uwzględnieniem zależności właściwości mechanicznych badanych tkanek od szybkości obciążenia. Istotną część procedury stanowi również jednoznaczne określenie sposobu pomiaru siły, przemieszczenia i odkształcenia, w tym zastosowania pomiarów optycznych, takich jak cyfrowa korelacja obrazu, w przypadkach, w których klasyczny pomiar przemieszczenia nie zapewnia wystarczającej informacji o rzeczywistym odkształceniu tkanki.

W odróżnieniu od istniejących procedur, które koncentrują się zazwyczaj na określonym typie tkanki, rodzaju testu lub wybranym parametrze mechanicznym, proponowany protokół integruje poszczególne etapy badań w jednolity schemat ukierunkowany nie tylko na uzyskanie krzywych siła–przemieszczenie czy naprężenie–odkształcenie, lecz przede wszystkim na uzyskanie danych o jakości i strukturze odpowiedniej do identyfikacji praw konstytutywnych. Jest to szczególnie istotne w przypadku opony twardej, dla której sposób przygotowania próbki, jej geometria, orientacja włókien, stan nawodnienia oraz metoda wyznaczania odkształcenia mogą istotnie wpływać na uzyskane właściwości materiałowe. W przypadku więzadeł dodatkowym aspektem jest uwzględnienie ich anizotropii oraz zależności odpowiedzi mechanicznej od szybkości odkształcenia. Protokół zakłada zatem takie zaprojektowanie eksperymentu, aby możliwe było nie tylko określenie podstawowych właściwości mechanicznych tkanek, ale również rozdzielenie wpływu czynników eksperymentalnych od rzeczywistej odpowiedzi materiałowej.

Kluczową cechą proponowanego podejścia jest bezpośrednie powiązanie procedury eksperymentalnej z dalszym etapem identyfikacji materiałowej. Uzyskane dane są przetwarzane w sposób zapewniający możliwość wyznaczenia parametrów odpowiedniego prawa konstytutywnego, z uwzględnieniem nieliniowości, anizotropii oraz w zależności od badanego materiału i warunków obciążenia, efektów zależnych od czasu lub szybkości odkształcenia. Następnie dopasowane modele są weryfikowane poprzez porównanie ich odpowiedzi z wynikami eksperymentalnymi. W efekcie protokół nie kończy się na uzyskaniu danych eksperymentalnych, lecz prowadzi do utworzenia zwalidowanego zbioru parametrów

materiałowych, który daje się bezpośrednio wykorzystać jako dane wejściowe do modeli numerycznych, w szczególności modeli metody elementów skończonych. Tym samym proponowany protokół stanowi rozszerzenie istniejących metod badań o zintegrowany etap identyfikacji i walidacji właściwości konstytutywnych, zapewniając ciągłość pomiędzy badaniem eksperymentalnym, charakterystyką materiałową i modelowaniem numerycznym.

Oryginalność proponowanego rozwiązania nie polega zatem na wprowadzeniu całkowicie nowej metody obciążania czy pomiaru, lecz na integracji i standaryzacji elementów obecnych w dotychczasowych badaniach oraz dostosowaniu ich do wspólnego celu, jakim jest uzyskanie wiarygodnych i porównywalnych danych materiałowych dla więzadeł kręgosłupa i opony twardej. Analizowane publikacje dostarczają wartościowych procedur dotyczących poszczególnych tkanek, różnych szybkości obciążenia, metod pomiaru odkształcenia oraz identyfikacji modeli konstytutywnych, jednak różnią się między sobą sposobem przygotowania próbek, ich geometrią, mocowaniem, warunkami testu i sposobem przetwarzania wyników. Proponowany protokół ma na celu uporządkowanie tych elementów i określenie jednolitych zasad postępowania, tak aby uzyskiwane dane były nie tylko powtarzalne i porównywalne pomiędzy seriami badań, lecz także bezpośrednio użyteczne w identyfikacji praw konstytutywnych i dalszym modelowaniu numerycznym.

Realizacja celu C1 bezpośrednio warunkuje osiągnięcie celu C2, którym jest pozyskanie danych materiałowych więzadeł i opony twardej kręgosłupa w postaci użytecznej do identyfikacji praw konstytutywnych i zastosowań w modelowaniu numerycznym. Dane eksperymentalne dotyczące tkanek biologicznych muszą bowiem nie tylko odzwierciedlać ich rzeczywiste zachowanie mechaniczne, lecz również posiadać odpowiednią strukturę i jakość umożliwiającą wyznaczenie parametrów opisujących zależności pomiędzy obciążeniem, odkształceniem i odpowiedzią mechaniczną materiału. Opracowanie jednolitego sposobu prowadzenia badań pozwoli na uzyskanie danych, które mogą być bezpośrednio wykorzystane do identyfikacji modeli konstytutywnych opisujących zachowanie więzadeł i opony twardej, a następnie do implementacji tych modeli w symulacjach numerycznych. Jest to szczególnie istotne w kontekście modelowania biomechaniki kręgosłupa, gdzie poprawność odwzorowania właściwości tkanek miękkich ma bezpośredni wpływ na wiarygodność wyników obliczeń.

Znaczenie opracowania protokołu eksperymentalnego wykracza zatem poza samą organizację badań laboratoryjnych. Protokół stanowi łącznik pomiędzy eksperymentem a późniejszym etapem identyfikacji właściwości materiałowych i modelowania numerycznego. Precyzyjne określenie sposobu przygotowania i mocowania próbek, warunków oraz przebiegu testu, metod pomiaru geometrii i odkształcenia oraz procedur przetwarzania danych pozwala ograniczyć niekontrolowaną zmienność wyników i zwiększyć ich wartość naukową. W konsekwencji realizacja celów C1 i C2 umożliwia stworzenie uporządkowanego, spójnego zbioru danych materiałowych dla więzadeł kręgosłupa i opony twardej, który stanowi podstawę do opracowania i weryfikacji praw konstytutywnych oraz budowy bardziej wiarygodnych modeli numerycznych dla innych struktur biologicznych. Takie podejście zapewnia ciągłość pomiędzy badaniem eksperymentalnym, identyfikacją właściwości materiałowych a ich praktycznym wykorzystaniem w analizach obliczeniowych.

Uwagi krytyczne

Analiza wyników badań i wniosków sformułowanych zarówno w części pierwszej jak i poszczególnych publikacjach wskazuje, że pomimo systematycznego rozwoju metod eksperymentalnych stosowanych do charakterystyki mechanicznej tkanek kręgosłupa nadal brakuje spójnego i zwalidowanego protokołu, który integrowałby przygotowanie i standaryzację próbek, kontrolę ich geometrii, orientacji i stanu nawodnienia, sposób mocowania, warunki obciążenia, pomiar rzeczywistego odkształcenia oraz przetwarzanie danych w sposób ukierunkowany bezpośrednio na identyfikację praw konstytutywnych. Znane publikacje dostarczają wartościowych, lecz rozproszonych rozwiązań. Część z nich koncentruje się na właściwościach mechanicznych więzadeł kręgosłupa, część na problemach eksperymentalnych związanych z oponą twardą, a kolejne na uwzględnieniu zależności materiałowych od szybkości odkształcenia i opracowaniu modeli konstytutywnych. Jednocześnie różnice w przygotowaniu próbek, ich geometrii i orientacji, sposobie mocowania, procedurach przygotowania próbki, metodach wyznaczania odkształcenia oraz warunkach obciążenia utrudniają bezpośrednie porównywanie wyników i ograniczają możliwość ich jednoznacznego wykorzystania w modelowaniu numerycznym.

Zaproponowane przez Doktoranta badania wypełniają po części tę lukę poprzez integrację i ustandaryzowanie poszczególnych etapów badań w ramach jednego protokołu eksperymentalno-identyfikacyjnego, opracowanego równocześnie dla więzadeł kręgosłupa i opony twardej. Kluczową wartością proponowanego rozwiązania jest zaprojektowanie procedury eksperymentalnej „od końca”, tj. z uwzględnieniem wymagań stawianych danym przez identyfikację praw konstytutywnych i modele numeryczne. Pozwoli to nie tylko ograniczyć źródła niepewności eksperymentalnej i zwiększyć powtarzalność wyników, ale przede wszystkim uzyskać dane materiałowe o zdefiniowanej jakości i strukturze, umożliwiające wiarygodną identyfikację parametrów konstytutywnych oraz ich bezpośrednią implementację i walidację w modelach numerycznych. W konsekwencji proponowane podejście wypełnia istniejącą lukę metodologiczną, integrując dotychczas rozwijane niezależnie elementy badań eksperymentalnych, charakterystyki materiałowej oraz modelowania w jeden spójny proces, prowadzący od rzeczywistej tkanki biologicznej do zwalidowanego modelu jej zachowania mechanicznego.

Temat podjęty w dysertacji pozostaje otwarty na dalsze badania i rozwinięcie, choć przedstawione wyniki stanowią istotny etap w procesie standaryzacji procedur badawczych właściwości mechanicznych tkanek biologicznych. Osiągnięcia Doktoranta są znaczące i zasługują na uznanie. Jednocześnie, w toku merytorycznej analizy ocenianej rozprawy nasuwają się uwagi i pytania, które wymagają dodatkowego wyjaśnienia lub dyskusji. W związku z powyższym Doktorant powinien odnieść się do następujących kwestii:

1. **Brak jednolitej procedury badawczej** – poszczególne publikacje stosują różne sposoby przygotowania, wymiarowania, mocowania i obciążania próbek, co utrudnia bezpośrednie porównywanie wyników. Czy można sformułować ogólne wytyczne dotyczące procedur przygotowania tkanek biologicznych?

2. **Niepełna standaryzacja geometrii próbek** – występują różnice w długości, szerokości i przede wszystkim grubości próbek, które mogą istotnie wpływać na wyznaczone właściwości materiałowe, szczególnie w przypadku cienkiej opony twardej. Pominięty został również aspekt czasu, jaki upływa od momentu śmierci dawcy do przeprowadzenia badania próbki (czas post-mortem).
3. **Niewystarczająca kontrola orientacji próbki** – w przypadku tkanek włóknistych kierunek pobrania próbki względem przebiegu włókien ma zasadnicze znaczenie dla odpowiedzi mechanicznej. Czy kierunek obciążenia powinien być jednoznacznie określony i jakie znaczenie dla kierunku obciążenia w badaniach ma fakt, że dana tkanka jest obciążona ciśnieniem wewnątrzoponowym jak np. opona twarda?
4. **Różne procedury obciążeń** – brak jednolitego określenia liczby cykli, zakresu odkształcenia, szybkości obciążenia i kryterium stabilizacji próbki, które mogą wpływać na uzyskiwane krzywe mechaniczne. Czy wiadomo w jakim zakresie te czynniki mają wpływ na wyniki badań i jak unikać tego typu błędów systematycznych?
5. **Niewystarczająca kontrola stanu nawodnienia** – tkanki biologiczne są bardzo wrażliwe na utratę wody, a różne warunki przechowywania, rozmrażania i przygotowania mogą zmieniać ich właściwości mechaniczne. Jakie warunki w tym zakresie należy zachować i jakie płyny powinno się stosować?
6. **Brak pełnej kontroli wpływu szybkości odkształcenia** – badania wskazują na istotną zależność odpowiedzi więzadeł i opony twardej od szybkości obciążenia, ale nie wszystkie istniejące dane są uzyskiwane w sposób pozwalający na jednoznaczne określenie tej zależności. Jakie powinny być kryteria doboru tych prędkości?
7. **Brak bezpośredniego powiązania eksperymentu z identyfikacją modelu** – część badań kończy się na wyznaczeniu parametrów mechanicznych, podczas gdy dla modelowania numerycznego potrzebne są dane odpowiednio przygotowane do identyfikacji konkretnego prawa konstytutywnego. Jakie uogólnienia są dozwolone i praktykowane w tym zakresie?
8. **Niedostateczna walidacja modeli konstytutywnych** – samo dobre dopasowanie modelu do jednej krzywej eksperymentalnej nie gwarantuje jego poprawności w innych warunkach obciążenia. Model powinien być weryfikowany na niezależnych danych, w różnych zakresach deformacji i szybkości obciążenia. Jakie powinny być wytyczne dotyczące liczebności próbki, oceny statystycznej i walidacji samego eksperymentu?

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest wartościowym i oryginalnym opracowaniem naukowym. Przyjęta metodyka badawcza jak i przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że Doktorant biegle porusza się w swojej tematyce badawczej. Przedstawiony cykl publikacji jest spójny tematycznie i metodologicznie oraz wpisuje się w dyscyplinę poprzez rozwój i zastosowanie metod mechaniki materiałów, badań eksperymentalnych, identyfikacji

właściwości mechanicznych oraz modelowania numerycznego. Podejmowana problematyka obejmuje analizę odpowiedzi materiałów i konstrukcji na działanie obciążeń statycznych i dynamicznych, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki materiałowej, zachowania nieliniowego, anizotropii, zależności od szybkości odkształcenia oraz opracowywania i walidacji modeli konstytutywnych.

Istotną część dorobku stanowią badania eksperymentalne więzadeł kręgosłupa i opony twardej, w których rozwijane są metody przygotowania i mocowania próbek, pomiaru ich geometrii i odkształcenia oraz wyznaczania właściwości mechanicznych. Uzyskane wyniki są następnie wykorzystywane do identyfikacji parametrów praw konstytutywnych i budowy modeli numerycznych, w tym modeli wykorzystujących metodę elementów skończonych. Prace te rozwijają zatem nie tylko wiedzę o właściwościach tkanek biologicznych, lecz przede wszystkim warsztat inżynierski w zakresie eksperymentalnej mechaniki materiałów, modelowania ich zachowania oraz analizy odpowiedzi materiałowej pod wpływem różnych rodzajów obciążenia.

Zastosowanie rozwijanych metod do analizy obciążeń dynamicznych oraz problematyki bezpieczeństwa człowieka i transportu uzasadnia wybór dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej, do której skierowano ocenianą dysertację. Publikacje dotyczące mechaniki tkanek i modelowania biomechanicznego, szczególnie w kontekście bezpieczeństwa w transporcie lądowym, stanowią uzupełnienie badań nad zachowaniem konstrukcji i materiałów poddawanych obciążeniom dynamicznym, w tym obciążeniom występującym podczas zdarzeń wypadkowych. Tworzą one spójny obszar badawczy obejmujący mechanikę eksperymentalną, identyfikację właściwości materiałowych oraz modelowanie numeryczne, ukierunkowane na analizę odpowiedzi materiałów i struktur na oddziaływania mechaniczne. W konsekwencji przedstawiony dorobek należy postrzegać jako rozwój metod i narzędzi inżynierskich znajdujących zastosowanie zarówno w mechanice konstrukcji, analizie bezpieczeństwa transportu, jak i w biomechanice oraz modelowaniu zachowania człowieka w warunkach obciążeń mechanicznych.

W dorobku publikacyjnym doktoranta (baza Scopus) znaleziono 7 prac, które mają bezpośredni związek z ocenianą rozprawą. Do oceny przedstawiono 5 pozycji, których głównym autorem jest doktorant.

Zgodnie z obowiązującą ustawą o szkolnictwie wyższym, wymogiem formalnym do ubiegania się o tytuł doktora nauk technicznych jest minimum jedna publikacja lub monografia i doktorant spełnia to kryterium. Podsumowując, należy uznać na podstawie oceny rozprawy oraz dotychczasowego dorobku, że doktorant prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie oraz posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w tym oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Radosława Wolnego pt: „Badania eksperymentalne właściwości materiałowych tkanek miękkich kręgosłupa” spełnia warunki ujęte w art. 13. Ust 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz

o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2017r poz. 1789) oraz art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. poz. 1669). Na podstawie dokonanej **pozytywnej** oceny, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej o skierowanie rozprawy doktorskiej Pana Radosława Wolnego do dalszych etapów postępowania przewidzianych dla przewodów doktorskich oraz dopuszczenia ocenionej pracy do publicznej obrony.

Tomasz Klewel