

Bielsko-Biała, dnia 17 kwietnia 2026r

## **RECENZJA**

### **ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Jakuba Szarego**

#### **PROJEKT I REALIZACJA ORTEZY STABILIZUJĄCEJ STAW KOLANOWY PRZY ZA- STOSOWANIU DRUKU 3D ORAZ POWŁOK KOMPOZYTOWYCH**

##### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Recenzja została przygotowana w oparciu o Uchwałę Nr 6/20/2024-2028 Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Łódzkiej z dnia 27 lutego 2026r roku w sprawie powołania Komisji Doktorskiej w postępowaniu o nadanie mgr inż. Jakubowi Szaremu stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa Politechniki Łódzkiej, powołując mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr inż. Jakuba Szarego, o czym poinformowany zostałem przez Zastępcę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Łódzkiej Panią Prof. dr hab. inż. Katarzynę Grabowską pismem z dnia 6 marca 2026r.

##### **2. Kryteria oceny rozprawy**

Biorąc pod uwagę wymagania na podstawie art. 201 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571), § 1 ust. 4 uchwały nr 35/2024 Senatu Politechniki Łódzkiej z dn. 29 maja 2024 r. w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz szczegółowego trybu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego, § 16 ust. II załącznika do uchwały nr 21/2022 Senatu Politechniki Łódzkiej z dn. 27 kwietnia 2022 r. w sprawie uchwalenia Regulaminu Interdyscyplinarnej Szkoły Doktorskiej Politechniki Łódzkiej i § 15a ust. 4 pkt 3 i ust. II uchwały nr 88/2019 Senatu Politechniki Łódzkiej z dn. 10 lipca 2019 r. (Statut Politechniki Łódzkiej) podczas oceny rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Szarego przyjąłem



następujące kryteria: znaczenie, aktualność i oryginalność podjętej tematyki, stopień rozeznania Autora w przedmiotowym obszarze badań, poprawność sformułowania celów i hipotez badawczych, zasadność zastosowania metodyki badań, spójność struktury rozprawy oraz jej stronę warsztatową.

### **3. Charakterystyka Rozprawy Doktorskiej**

Przewód doktorski mgr inż. Jakuba Szarego jest prowadzony na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Szarego została wykonana w 2026 roku, w ramach kształcenia Interdyscyplinarnej Szkoły Doktorskiej na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej, w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Marcin Barburski, prof. uczelni z Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Instytutu Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej.

Tematyka rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Szarego dotyczy opracowania, wytworzenia oraz oceny rozwiązania indywidualnie dopasowanej ortezy stabilizującej staw kolanowy, bazującej na kompozycie wielowarstwowym (MLC), łączącym drukowany 3D (3DP) rdzeń z zewnętrznymi warstwami wzmacniającymi w postaci struktur włókienniczych impregnowanych żywicą epoksydową.

Rozprawa Doktorska Pana mgr inż. Jakuba Szarego została opracowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy V”, którego celem jest połączenie badań naukowych z praktycznym zastosowaniem ich wyników. Opracowany plan eksperymentu i realizowany program badań przez Autora Rozprawy Doktorskiej prowadzono we współpracy z przedsiębiorstwem MDH, producentem wyrobów medycznych. Eksperyment badawczy ukierunkowano na opracowaniu nowej technologii wytwarzania materiału kompozytowego przeznaczonego do produkcji ortez stawu kolanowego o niskiej masie, wysokiej wytrzymałości oraz indywidualnym dopasowaniu do anatomii pacjenta. W ramach dalszych działań badawczych wykorzystano technologię skanowania i druku 3D wzmacnianego strukturami włókienniczymi impregnowanymi żywicą. Na uwagę zasługuje fakt, że Autor posługuje się wiedzą praktyczną zdobytą podczas projektowania i realizacji własnych projektów układów kompozytowych, co istotnie potwierdza, udokumentowane doświadczenie zawodowe w tej tematyce. Na etapie analizy literatury pojawiają się już akcenty pewnej polemiki odnoszącej się do inżynierii materiałowej,

ze szczególnym uwzględnieniem struktur kompozytowych, kompozytów i techniki drukowania 3D. Rozważana problematyka jest nowa, bardzo aktualna, ma charakter interdyscyplinarny, a poruszane zagadnienia mają zasięg nie tylko krajowy, ale również międzynarodowy. Rozprawa Doktorska składa się z wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu, określenia celu, hipotez, dziewięciu rozdziałów podzielonych na podrozdziały, bibliografii. Opiniowana praca liczy łącznie 133 strony. Bibliografia zawiera 202 pozycje prezentowane na 13-tu stronach. Wykaz wybranych skrótów i terminów jest obszerny, zamieszczony na dwóch stronach.

We wprowadzeniu – Wstępie, uzasadniono potrzebę podjęcia badań, polegającego na opracowaniu prototypu indywidualnie dopasowanej ortezy stawu kolanowego, zbudowanej w oparciu o kompozyt warstwowy. Wykorzystany Autorski kompozyt charakteryzował się wysoką sztywnością i wytrzymałością przy wykorzystywaniu niskiej masy.

W ramach prowadzonego eksperymentu czynnego, stosowanego szczególnie w ustalaniu relacji w warunkach laboratoryjnych, z kontrolowaniem zmian cech stanu i wielkościami zmiennymi, opracowano szczegółowy program badań umożliwiający wytworzenie nowoczesnego materiału o określonych właściwościach mechanicznych. Tego typu modelowanie jest najczęściej stosowane dla potrzeb identyfikacji i optymalizacji modelu fizycznego nowego lub modernizowanego obiektu.

Największą zaletą Rozprawy Doktorskiej jest jego interdyscyplinarny charakter. Program badań obejmuje elementy inżynierii materiałowej, mechaniki tekstyliów, projektowania inżynierskiego, a także inżynierii odwrotnej. W skład wytworzonych kompozytów wchodziły głównie włókna węglowe, struktury włókiennicze nowej generacji na bazie carbonu oraz włókna szklane. Zastosowanie tego rodzaju włókien przy produkcji materiałów kompozytowych jest znane od wielu lat, jednak do produkcji określonych materiałów kompozytowych zakłada się stosowanie komponentów, które na rynku światowym nie są zbyt często wykorzystywane,

z uwagi na trudności przy ich przetwarzaniu. Z reguły kompozyty składają się z dwóch lub większej ilości różnych materiałów o celowo zmieszanych warstwach, możliwych do wyodrębnienia metodami mechanicznymi. Warstwy rozłożone są w kontrolowany sposób, nadają optymalne właściwości mechaniczne. Kompozyty te po odpowiednim zaprojektowaniu posiadają określone właściwości mechaniczne, lepsze niż indywidualne składniki. Składnik ciągły kompozytu, który często występuje w większej ilości nazywany jest osnową lub matrycą (matrix). W osnowie osadzone są włókna lub ziarna (cząstki) nazywane ogólnie napełniaczem (filler)

wzmocnieniem lub zbrojeniem (reinforcement). W ramach programu badań wykorzystywano włókna nowej generacji, w tym nowe struktury włókiennicze, gdzie na powierzchni znajdował się materiał stanowiący spoiwo kompozytu, to jest odpowiednio wykorzystana żywica (lepiszcze). Kompozyt stanowiący koncepcję ortezy posiadał indywidualne cechy uwzględniające określone wymagania stawiane przez producenta ortezy stawu kolanowego, z zastosowaniem kompozytu warstwowego. Kluczowym elementem koncepcji przy budowie ortezy była proponowana przez Autora technologia produkcyjna przy powstawaniu elementów, podzespołów z materiału kompozytowego, a także elementów stanowiących mechanizm przegubowy. W pierwszej części Rozprawy Doktorskiej wskazano na innowacyjny charakter materiałów, z jakich mają powstawać kompozyty. Innowacyjny charakter tego typu materiałów jest bez wątpienia najważniejszy, jednakowoż koncepcja produkcyjna wykorzystywana w ramach kształtowania ortezy ma charakter innowacyjności procesowej. Proces produkcyjny w ramach proponowanego programu badań składał się z wielu części, z których każda posiada indywidualne cechy innowacyjności. Zaproponowany przez Autora proces budowy obiektu inżynierskiego miał niewątpliwie charakter interdyscyplinarny. W swoich założeniach wykorzystuje elementy inżynierii odwrotnej, inżynierii materiałowej, zaawansowanej mechaniki tekstyliów, techniki pomiarowej opartej o najnowsze trendy i metrologii w odniesieniu do materiałów konstrukcyjnych. Tego typu połączenie wielu dyscyplin w jedną całość ma niewątpliwie charakter innowacyjności procesowej i produktowej. W celu uwypuklenia najistotniejszych cech procesu produkcyjnego w ramach Rozprawy Doktorskiej Autor przedstawił proces produkcyjny w sposób graficzny, w postaci schematu. Zaproponowany proces produkcyjny składał się z wielu części, przy czym pierwsza część obejmuje proces projektowania i symulacji właściwości mechanicznych przy pomocy MES (Metody Elementów Skończonych) materiałów kompozytowych w odniesieniu do konkretnego elementu konstrukcyjnego, natomiast kolejne części zawierają proces technologiczny kształtowania elementów konstrukcyjnych poszczególnych podzespołów, w tym wycięcie warstw, łączenie warstw, proces utwardzania, usunięcia nadmiaru materiału. Ostatnia część procesu dotyczy kontroli materiałów konstrukcyjnych i gotowych elementów. Przedmiotem Rozprawy Doktorskiej jest ocena innowacyjnego charakteru stosowanej technologii produkcji kompozytów, wraz z wprowadzeniem na rynek innowacyjnego produktu w postaci ortezy stawu kolanowego. Analizując literaturę przedmiotu można zauważyć, że innowacja technologiczna w obrębie procesu to zmiana w stosowanych przez przedsiębiorstwo metod wytwarzania. Metody te mogą polegać na dokonywaniu zmian

w urządzeniach lub organizacji produkcji, mogą też stanowić połączenie tych dwóch rodzajów zmian lub być wynikiem wykorzystania nowej wiedzy. W przypadku recenzowanej Rozprawy Doktorskiej innowacyjność jest również efektem produkcji i dostarczenia nowych udoskonalonych produktów, które nie mogłyby być wytworzone, czy też dostarczone przy pomocy tradycyjnych metod. Celem wprowadzenia innowacyjnych produktów przy zastosowaniu nowych technologii jest możliwość wykorzystania materiałów nowej generacji, a mianowicie włókien węglowych do produkcji określonych produktów zgodnych z indywidualnymi potrzebami klienta. Stosowanie nowych technologii powoduje zwiększenie efektywności produkcji i dostarczenia innowacyjnych produktów zgodnych z oczekiwaniem i zapotrzebowaniem rynku na dany produkt. Zaprezentowane novum technologiczne powstało w wyniku działalności innowacyjnej, obejmującej wiele działań o charakterze badawczym, technicznym, organizacyjnym, finansowym i handlowym. Głównym celem realizowanej Rozprawy Doktorskiej było opracowanie i wdrożenie nowego innowacyjnego produktu w postaci ortozy stawu kolanowego, a także tworzenie nowych formuł oraz ustalanie nowych specyfikacji elementów kompozytowych z włókien węglowych i innych rodzajów włókien dedykowanych do branży produktów w zastosowaniach medycznych. Stosowanie tego typu rozwiązań powoduje znaczną redukcję masy i bezpośrednio przedkłada się na zmniejszenie energochłonności i emisji zanieczyszczeń. W ramach pracy Autor opracował koncepcję produkcji elementów z materiału kompozytowego dedykowanego do budowy ortez stawu kolanowego. Wyprodukowane elementy kompozytowe, poza unikatowymi elementami konstrukcyjnymi w odniesieniu do komponentów, charakteryzowały się szeregiem unikalnych parametrów i funkcjonalności niedostępnych dla producentów konkurencyjnych, spowodowanych brakiem możliwości technologicznej. Konkurencyjność produkowanych elementów odnosiła się głównie do obniżenia wagi elementów zastępowanych przez elementy z kompozytów na bazie carbonu. Zastosowanie materiałów kompozytowych na bazie włókien węglowych zwiększa ogólną wytrzymałość elementów konstrukcyjnych. Opracowane materiały konstrukcyjne, posiadały lepsze właściwości mechaniczne względem tradycyjnych elementów wytworzonych np. ze stali, czy też aluminium. Mały wolumen produkcji, przy początkowo wysokiej cenie jednostkowej powoduje, iż istotą zaproponowanej koncepcji jest rozwój i wdrożenie nowości w ramach dostarczonego klientowi produktu. Dodatkową wartością dodatnią jest możliwość wytwarzania innowacji produktowej w oparciu o zoptymalizowany proces produkcyjny ukierunkowany o realizację zasady zrównoważonego rozwoju. Zastosowanie najlepszych dostępnych rozwiązań

w obszarze procesowym stanowił niezbędne narzędzie do projektowania i formułowania specyfikacji nowych elementów kompozytowych z włókien na bazie carbonu i innych włókien, np. szklanych. Równie ciekawym założeniem Autora jest rozwój poprzez tworzenie własnych rozwiązań materiałowych (receptura kompozytu), we współpracy z ośrodkami naukowymi i Uniwersytetami. Ważnym elementem przy opracowaniu koncepcji produkcyjnej było zapotrzebowanie rynku na produkty kompozytowe. Rynkiem docelowym, na którym zostaną wdrożone rezultaty koncepcji wdrożeniowej, jest rynek producentów kompozytowych, głównie z włókien węglowych. Zaznaczyć trzeba, że większość rynku oparta jest o surowiec, w którym głównym komponentem są włókna węglowe. Z uwagi na skomplikowany charakter produkcji oraz zróżnicowane konstrukcje szkieletu, zastosowanie innych włókien jako komponentów jest bardzo rzadko użytkowane w praktyce. Głównym atutem Autora Rozprawy Doktorskiej „Doktoratu Wdrożeniowego” jest możliwość projektowania i wytwarzania kompozytów wieloskładnikowych opartych na różnych rodzajach materiałów wchodzących w skład kompozytu. Produkcja kompozytów wieloskładnikowych znajduje zastosowanie w wielu najbardziej zaawansowanych gałęziach przemysłu, w tym motoryzacyjnym, lotniczym, kosmicznym oraz co najciekawsze w medycynie. Zastosowanie innowacyjnych komponentów wytworzonych z materiału kompozytowego przekłada się na obniżenie masy konstrukcyjnej, co ma szczególne znaczenie w realizacji produkcji ortez stawu kolanowego. Autor wykorzystywał wzmocnienia stosowane w kompozytach z osnową polimerową na bazie włókien szklanych i węglowych. Tego typu materiały znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, budowie jachtów. Niska masa jest niezbędna do uzyskania wysokiej wydajności, niezawodności i sprawności obiektu inżynierskiego, jakim niewątpliwie jest orteza stawu kolanowego. Autor Rozprawy Doktorskiej, na podstawie przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu, zwraca uwagę, iż ogromną zaletą kompozytu jest możliwość indywidualnego dostosowywania do parametrów projektowych i konstrukcyjnych poprzez odpowiednią orientację włókien, architekturę przestrzenną, która umożliwia wytwarzanie obiektów 3D na bazie plastra miodu. Programowanie odpowiednich właściwości fizyko-chemicznych oraz mechanicznych powoduje, że kompozyt może mieć charakter izolacyjny, bądź przewodzić, np. prąd czy ciepło. Odpowiednio zaprojektowany umożliwia również wprogramowanie w materiał konstrukcyjny charakterystyk odnoszących się do energii pochłaniania uderzeń, dźwięku. Może też przybierać różne kształty o zoptymalizowanych wymiarach. Wykorzystanie inżynierii materiałowej, przy konstrukcji kompozytów, spowodowało rozwój kompozytów z włókien

węglowych jako materiału przyszłości. Trend, jaki utrzymuje się w ostatnich latach, wymusza zastosowanie materiałów innowacyjnych, inteligentnych, ze względu na konieczność dostosowania do rosnących wymogów gospodarki niskoemisyjnej, konieczność redukcji odpadów i zastosowania zasady zrównoważonego rozwoju, oraz rosnących wymagań klientów, dotyczących np. wytrzymałości, jakości końcowego wyrobu.

Praca zasadniczo podzielona jest na dwie części, gdzie podział ten został wyraźnie uwypuklony na część poświęconą analizie literatury przedmiotu i część aplikacyjną, stanowiącą materiał i metody badań, a także opracowany plan eksperymentu.

Celem pracy było „opracowanie, wykonanie i weryfikacja prototypu indywidualnie dopasowanej ortozy stawu kolanowego, zbudowanej w oparciu o nowy kompozyt warstwowy, charakteryzujący się wysoką sztywnością oraz wytrzymałością, przy zachowaniu niskiej masy. Konstrukcja ortozy została oparta na hybrydowym połączeniu rdzenia wytwarzanego technologią druku 3D z zewnętrznymi warstwami kompozytowymi, wzmocnionymi strukturami włókienniczymi”.

Hipotezy pracy określono następująco:

Hipoteza H1: *„Zastosowanie zewnętrznej warstwy wzmacniającej w postaci struktury włókienniczej impregnowanej żywicą epoksydową na elementach polimerowych wytwarzanych technologią druku 3D prowadzi do poprawy ich właściwości wytrzymałościowych w porównaniu z elementami niewzmocnionymi”*.

Hipoteza H2: *„Technologia przyrostowa, w połączeniu z zewnętrznymi warstwami wzmacniającymi, umożliwi wytwarzanie indywidualnie dopasowanych ortez stawu kolanowego o wymaganych właściwościach mechanicznych”*.

Na początku Dysertacji Autor zamieścił streszczenie. Rozdział pierwszy odnosi się do celu poruszanej problematyki. Rozdział drugi wprowadza czytelnika w zwięzłą, zwięźle opisaną, podjętą tematykę. Częściowo uzasadnia również podjętą tematykę i informuje o tym, że Rozprawa Doktorska powstała w oparciu o doświadczenie zawodowe, co było kluczowe przy realizacji, nie tylko działań związanych z analizą literatury przedmiotu, ale także prowadzeniem eksperymentu i programu badań. Ważnym aspektem opiniowanej dysertacji jest fakt, iż jest to doktorat wdrożeniowy, łączący badania naukowe z realnym wdrożeniem rozwiązania w organizacji.



Osobiście uważam, że zamieszczanie streszczenia na początku Dysertacji jest rzadko spotykane. Treść, stanowiąca tytuł rozdziału drugiego, ma istotny charakter w bardzo szerokim ujęciu. Autor opisuje zagadnienia związane z biomechaniką i budową stawu kolanowego, a następnie sprawnie przechodzi do opisu i charakterystyk ortez stawu kolanowego, prezentując grupy ortez ze względu na ich przeznaczenie i wymagania użytkowe. W tym samym rozdziale znajduję opis produkcji indywidualnych ortez stawu kolanowego, połączony z metodologią prowadzenia pomiarów anatomicznych pacjentów. W dalszej części tego samego rozdziału Autor dokonuje przeglądu stosowanych materiałów i technologii w produkcji ortez.

W tym samym rozdziale Autor prezentuje stosowane materiały i technologie wytwarzania kompozytów z rdzeniem drukowanym 3D, opisuje technologie przyrostowe w zastosowaniach inżynierskich i medycznych. W kolejnym podrozdziale zamieszcza informacje dotyczące technik formowania kompozytów z żywic duroplastycznych. Dostatecznie Autor w tym samym drugim rozdziale, a dokładnie w podrozdziale 2.4.3, zamieszcza informacje dotyczące włókien. Uważam, że rozdział drugi w swojej konstrukcji samej dysertacji jest trochę chaotyczny i moim zdaniem powinien być bardziej przemyślany i uporządkowany. Powinien posiadać pewną hierarchię tematyczną. W ramach toczony problematyki omówiono zastosowanie haftu technicznego oraz przedstawiono istniejące rozwiązania w zakresie wzmocnienia kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania tkanin. Przedstawiono również problem dotyczący ram prawnych i zgodności wyrobu z obowiązującymi normatywami. Z treści, jaka została zawarta w tym podrozdziale, należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, że Autor zdefiniował tego typu materiały jako złożony obiekt inżynierski, składający się z wielu połączonych ze sobą cech mechanicznych, właściwości fizycznych i odpornościowych. Już na tym etapie Autor słusznie zwraca uwagę, że podjęta tematyka jest trudna i złożona.

Autor powołuje się na dostępne metody badań zawarte w normach przedmiotowych, szczegółowo opisując metody badań oraz wymagania stawiane kompozytom, a także metody, które zostały wprowadzone w ramach badań realizowanych w ośrodkach naukowych w kraju i na świecie. Analiza przestudiowanej tematyki stanowiła punkt wyjścia do wyznaczenia i określenia wymagań, jakie Autor wprowadził do planu eksperymentu, uzupełniając ją o zaproponowane cechy, właściwości mechaniczne i zjawiska związane z identyfikacją układu inżynierskiego, obejmującego ortezę stawu kolanowego. Wyczerpująco zostały przedstawione sposoby oceny właściwości mechanicznych zaprezentowane, zarówno w normach, jak i dostępnej literaturze przedmiotu.

W rozdziale trzecim – Badania wstępne – Autor przeprowadził identyfikację właściwości określających parametry kompozytów w kontekście układów wzmocnień służących do wykonania preformy tychże kompozytów. Dzięki tym badaniom uważam, że dokonana identyfikacja konfiguracji materiałowych oraz warunków technologicznych została wykonana prawidłowo i stanowiła przyczynek do dalszych badań.

Rozdział czwarty – Badania wpływu przygotowania powierzchni elementów drukowanych 3D na adhezję połączeń klejonych w próbie ścinania stanowił punkt wyjścia do rozważań, jakie zostały przeprowadzane w rozdziale piątym Dysertacji. W ramach prezentowanej Dysertacji Autor zaproponował program badań. W zamierzeniu zbudował plan eksperymentu czynnego, który obejmował:

- opracowanie struktur włókienniczych,
- opracowanie planu eksperymentu i przeprowadzenie prób wytrzymałościowych, testu zginania, testu ściskania,
- ocenę strukturalną obiektu badań,
- ocenę właściwości mechanicznych.

W dalszej części planu eksperymentu, opartego o wcześniejsze analizy, Autor dokonał wnikliwej oceny wykorzystywanej metody badawczej. Podstawą tego typu postrzegania zjawisk było założenie, że jeśli nastąpiło zdarzenie (skutek), to musi zajść pierwotna przyczyna tego zjawiska. Przy założeniach, jakie postulował Autor i otrzymanych zależnościach przyczynowo-skutkowych, Doktorant zbudował model obiektu badań i wykazał, że metody planowania eksperymentu mają charakter uniwersalny. Dzięki temu była możliwość zaplanowania dalszego eksperymentu i wykorzystania bogatej wiedzy na ten temat. Z punktu widzenia rozważań eksperymentalnych Autor określił cel badań doświadczalnych, spełniających założenia planu zdeterminowanego, który to najlepiej nadaje się do identyfikacji modelu obiektu badań, gdyż układy tego planu determinują ustalone założenia teoretyczne.

Z zawartych założeń Autor przeszedł do kolejnego układu planu eksperymentu stanowiącego:

- weryfikację uzyskanych wyników,
- ocenę przydatności nowo utworzonego kompozytu i wartości użytkowej obiektu badań,
- identyfikację strukturalną obiektu badań,
- ocenę i weryfikację założeń projektowych i konstrukcyjnych obiektu badań.

Uważam, że przedstawiony przez Doktoranta program badań został bardzo dobrze opracowany i niewątpliwie posiada cechy naukowości.

Rozdziały czwarty oraz piąty, które odnoszą się bezpośrednio do wnikliwej analizy literatury przedmiotu, własnych przemyśleń i twórczej krytyki, uważam za najważniejszą część Dysertacji.

Rozdział szósty dotyczy modelowania właściwości sprężystych materiałów kompozytowych. Na podstawie zweryfikowanego modelu MES Autor stwierdza możliwość kształtowania sztywności kompozytu MLC a opracowana metodyka nadaje się do projektowania wyrobów kompozytowych.

Rozdział siódmy poświęcony jest części wdrożeniowej indywidualnie dopasowanej ortyzy stawu kolanowego. Autor Rozprawy Doktorskiej na wstępie przedstawił proces wytwarzania ortyzy, obejmujący skanowanie 3D kończyny pacjenta, projektowanie oraz wytwarzanie poszczególnych elementów składowych ramy ortyzy oraz ich impregnację metodą infuzji żywicy. W świetle zaproponowanego schematu procesu produkcyjnego ortyzy stawu kolanowego Autor przeprowadził skanowanie 3D kończyny dolnej, a następnie zaprojektował prototyp ortyzy odnosząc się do wcześniejszych rozważań zawartych w rozdziale drugim.

Autor Dysertacji sformułował następujące wnioski:

1. Impregnowane żywicą struktury włókiennicze znacząco zwiększają moduł sprężystości i wytrzymałość kompozytów drukowanych 3D.
2. Struktury plecione dobrze dopasowują się do rdzenia o złożonej geometrii.
3. Haft techniczny pozwala precyzyjnie kształtować włókna wzmacniające, zgodnie z rozkładem obciążeń i może być stosowany jako wzmocnienie w kompozytach o przestrzennej geometrii.
4. Chropowatość powierzchni rdzenia poliamidowego jest kluczowa dla trwałości połączeń klejonych żywicą epoksydową.
5. Modele analityczne są przydatne do wstępnej estymacji modułu sprężystości kompozytu MLC, natomiast model numeryczny MES wykazuje większą dokładność.

Należy zwrócić uwagę, że podejmowana tematyka jest stosunkowo nowa. Nadrzędnym celem Dysertacji było sformułowanie przez Autora podstaw teoretycznych umożliwiających kształtowanie właściwości mechanicznych kompozytów przeznaczonych na ortyzy stawu kolanowego.



W części badawczej Autor zawarł wszystkie uwagi, jakie podniósł w Dysertacji, a także odniósł się do konstruktywnej krytyki charakteryzującej się dojrzałym podejściem do zagadnień, tym samym sugerując sposób lub sposoby rozwiązania problemu poddanego naukowej dyskusji. **Można ten rodzaj krytyki naukowej zaliczyć do krytyki wyższego poziomu, w przeciwieństwie do zwykłej krytyki pozbawionej tej cechy.**

Uważam, że przedstawiony program badań jest bardzo dobrze opracowany i niewątpliwie posiada cechy naukowości. Dzięki wiedzy praktycznej i teoretycznej Doktorant podjął się naukowo poszerzyć tą trudną tematykę. **Uwzględniając powyższe uwagi wstępne, podjętą przez Kandydata tematykę Rozprawy Doktorskiej uważam za istotną i oryginalną, zarówno ze względów poznawczych, jak i użytecznych.**

#### **4. Ogólna charakterystyka zawartości rozprawy**

Praca ma właściwą strukturę, treść kolejnych rozdziałów jest uzasadniona. Praca spełnia wszystkie wymogi formalne. Jest obszerna, ale unika powtórzeń i zbędnego rozciągania tekstu, wnikliwie i szczegółowo omawiając przedstawiane zagadnienia. Napisana jest poprawnym językiem naukowym, w sposób interesujący dla czytelnika. Zawiera wszystkie potrzebne przypisy objaśniające i poprawne odsyłacze literaturowe, a cytaty są wyraźnie oddzielone od tekstu autorskiego.

Poprawnie są też ponumerowane i przedstawione tabele i zestawienia. Wykaz wybranych skrótów i terminów jest obszerny. We wprowadzeniu uzasadniono potrzebę podjęcia badań. W ramach prowadzonego eksperymentu czynnego, stosowanego szczególnie w ustalaniu relacji w warunkach laboratoryjnych z kontrolowaniem zmian cech stanu i wielkościami zmiennymi, opracowano szczegółowy program badań umożliwiający określenie wzajemnych relacji strukturalnych analizowanych kompozytów. Tego typu modelowanie jest najczęściej stosowane dla potrzeb identyfikacji i optymalizacji modelu fizycznego nowego lub modernizowanego obiektu badań. Tło badawcze zostało wnikliwie scharakteryzowane poprzez odpowiedni dobór literatury przedmiotu, w większości pozycji opublikowanych w recenzowanych czasopiśmie naukowych. Analizując strukturę pracy doktorskiej można stwierdzić, że Doktorant ma opanowany warsztat badawczy i bardzo dobrze zaprezentował zarówno materię teoretyczną, jak i empiryczną. Praca poświęcona jest zagadnieniu w pełni aktualnemu, wpisując się w prowadzone w szeregu ośrodkach zagranicznych i krajowych. Oceniana rozprawa doktorska przedstawia szeroko zakrojone badania nad wybranymi

zagadnieniami, dlatego też uważam, że z punktu widzenia podjętej tematyki badawczej oceniana praca reprezentuje odpowiedni poziom naukowy oraz ma walor oryginalności, a zatem odpowiada warunkom, stawianym rozprawom doktorskim w obowiązującej Ustawie o stopniach i tytule naukowym.

**Reasumując uważam, że postawiony przez Doktoranta problem badawczy ma wybitnie charakter dysertabilny i w pełni nawiązuje do współczesnych osiągnięć oraz potrzeb nowoczesnej nauki.** Rozważana problematyka jest nowa, bardzo aktualna, ma charakter interdyscyplinarny, a poruszane zagadnienia mają zasięg nie tylko krajowy, ale również międzynarodowy.

## 5. Analiza zakresu, celu i charakterystyka treści pracy

Tematyka Rozprawy Doktorskiej jest istotna, zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Poznawcze znaczenie, to pozyskanie nowej wiedzy, przy wykorzystaniu metod oceny właściwości mechanicznych kompozytów.

Autor rozprawy sformułował poprawnie cele rozprawy. **Na podstawie przeprowadzonej analizy danych empirycznych hipotezy zostały potwierdzone i zweryfikowane w sposób pozytywny.** Przyjętą w recenzowanej rozprawie metodykę rozwiązania problemu badawczego uznaję za poprawną. Analizowane zagadnienie jest złożone, a jego ocena kłopotliwa i trudna. Jednocześnie należy podkreślić, że podjęcie badań w tym temacie jest ważne, nie tylko ze względu na znaczenie poznawcze, ale i użyteczne. Stąd też wynika moja pozytywna ocena zarówno tematu, sformułowania celów, jak i zakresu i etapów badań podjętych przez Doktoranta. Praktyczne znaczenie tej pracy to walidowane w warunkach rzeczywistych opracowane, modele oparte o narzędzia wykorzystujące metodę elementów skończonych.

## 6. Ocena merytoryczna

Dokonany przegląd treści rozdziałów upoważnia do stwierdzenia, że Autor podjął się trudnego zadania badawczego i wykonał je w stopniu bardzo dobrym. Prezentacja wyników prac badawczych świadczy także o dobrej znajomości Doktoranta realiów praktycznych.

Realizację sformułowanych celów pracy oraz weryfikację postawionych hipotez Autor oparł na podejściu badawczym składającym się z dwóch faz:

- analitycznej - bazującej na metodzie analizy i studiowania literatury przedmiotu, wykorzystanej dla potrzeb wyjaśnienia podstawowych pojęć związanych z tematyką rozprawy,

- diagnostyczno-projekcyjnej opartej na własnych badaniach empirycznych i podejściu indukcyjno-dedukcyjnym, która zaowocowała identyfikacją kluczowych parametrów zmiennych wejściowych, a przede wszystkim opracowaniem modeli numerycznych.

Autor Rozprawy Doktorskiej podjął temat istotny z punktu widzenia czysto poznawczego, jak i utylitarnego.

- Układ rozprawy jest poprawny.
- Praca mieści się w obszarze prowadzonych badań nad nowoczesnym ujęciem opisu podstaw teoretycznych umożliwiających kształtowanie właściwości mechanicznych kompozytów.
- Badania prowadzone w ramach Dysertacji można zaliczyć do grupy badań nowoczesnych i co godne podkreślenia: mających bezpośrednie zastosowanie w praktyce, przy równoczesnym bardzo wysokim poziomie teoretycznym tych badań.
- Doktorant wykazał się bardzo dobrym rozeznaniem literatury przedmiotu oraz wiedzy praktycznej.
- Autor bardzo dobrze orientuje się w poruszonym zagadnieniu i wyraża się językiem dojrzałego naukowca.

Oceniając podejście badawcze stwierdzam, że Doktorant posłużył się bardzo dobrze dobranymi narzędziami badawczymi, właściwymi do podjętej problematyki.

## 7. Spostrzeżenia i uwagi krytyczne

Uważam, że rozprawa została napisana klarownie i logicznie. Układ pracy jest prawidłowy, choć kolejność podrozdziałów budzi pewne zastrzeżenia. Język użyty w pracy jest prawidłowy. Pod względem edycyjnym pracę oceniam bardzo dobrze, w tekście występują sporadycznie: błędy literowe, gramatyczne, czy też skróty myślowe.

- Str. 12 wiersz 1 - „rozwiązani” – powinno być - rozwiązanie.
- Str. 14 wiersz 7 - „omówiono włókna” – niefortunne sformułowanie.
- Str. 22 wiersz 25 - „w praktyce pomiarów antropometryczny” – powinno być - antropometrycznych.
- Str. 24 wiersz 7 - „ortezy stawy” – powinno być ortezy stawu.
- Str. 29 wiersz 33 - „niską temperaturę” – powinno być – niską temperaturą.
- Str. 35 wiersz 22 - „włókno szklane” – powinno być - włókna szklane.
- Str. 37 wiersz 14 - „Włókna lnu i zaliczane” – powinno być – Włókna lnu i konopi.

- Str. 37 wiersz 30 - „konstrukcyjny materiałach” – powinno być - konstrukcyjny w materiałach.
- Str. 39 wiersz 6 - jak rozumieć zapis „Jej istotną zaletą jest wysoka powtarzalność ułożenia włókien oraz kąta plecenia, osiągnana dzięki dodatkowemu sterowaniu CNC ruchem rdzenia i prędkościami przędz”, proszę o wyjaśnienie.
- Str. 42 wiersz 3 - „odznaczają wysoką zdolność” – powinno być - odznaczają się wysoką zdolnością.
- Str. 61 wiersz 6 - „wyraźnie gorsze” – powinno być – wyraźnie gorsze.
- Str. 61 wiersz 20 - „cechować się mniejszą” – powinno być – cechuje się mniejszą.
- Str. 63 wiersz 1 - „Analiza dostępnej literatury wskazują” – powinno być - Analiza dostępnej literatury wskazuje.
- Str. 65 wiersz 3 - „Pozostałe próbki została” – powinno być - Pozostałe próbki zostały.
- Str. 77 wiersz 27 - „szwy używany” – powinno być – szwy używane.
- Str. 88 wiersz 16 - „dobrą” – powinno być – dobre.
- Str. 96 wiersz 18 - „wybranego” powinno być – wybranych.
- Str. 98 wiersz 14 - „W tabeli 14 obok wyników modelowania zaprezentowano również różnice względny odniesiony do wartości referencyjnej” – co Autor miał na myśli, proszę o wyjaśnienie.
- Str. 110 wiersz 6 - „podudzie” – powinno być – podudzia.
- Str. 111 wiersz 3 - „przedstawione na” - brak odniesienia do rysunku.
- Str. 111 wiersz 4 - „Tapicerka” – powinno być – Tapicerkę ramy.
- Str. 111. Wiersz 11 - „mechanizm” – powinno być – mechanizmu.
- Str. 114. Wiersz 3 - „Wiążę” – powinno być Wiąże.
- Str. 118. Wiersz 37 - „opracowanie” – powinno być – opracowania.
- Str. 119. Wiersz 1 - „zgodnie” – powinno być – zgodne.

## 8. Wniosek końcowy

Autor pracy wykazał się bardzo dobrym opanowaniem nowoczesnego warsztatu naukowego, prezentując na wysokim poziomie znajomość zagadnień związanych metrologią włókienniczą, projektowaniem płaskich wyrobów włókienniczych.

- Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.
- Przyjęty cel rozprawy został zrealizowany.

Autor zidentyfikował lukę poznawczą i na podstawie analizy literatury stwierdził brak wystarczającej liczby publikacji w tym obszarze.

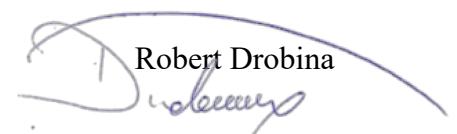
Autor poprawnie zdefiniował przedmiot badań, prawidłowo przedstawił plan badań i wyniki swoich dociekań. We właściwy sposób zrealizował wszystkie etapy procesu badawczego, w tym wnioskowania, a także wykazał się bardzo dobrym rozeznaniem w dziedzinie wiedzy i bardzo dobrym przygotowaniem w oparciu o analizę literatury przedmiotu.

Zrealizowane zadanie badawcze świadczy o tym, że Autor potrafi zdefiniować ciekawy problem badawczy, opracować plan eksperymentu, przeprowadzić badania oraz wyciągnąć wnioski. Dodatkowym walorem opracowania są wnioski o wybitnie użytecznym charakterze.

Bardzo pozytywnie oceniam Rozprawę Doktorską w aspekcie metodologicznym i merytorycznym co stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

**Biorąc pod uwagę merytoryczne i formalne aspekty rozwiązania tematu podjętego w pracy stwierdzam jednoznacznie, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Szarego pt.: „PROJEKT I REALIZACJA ORTEZY STABILIZUJĄCEJ STAW KOLANOWY PRZY ZASTOSOWANIU DRUKU 3D ORAZ POWŁOK KOMPOZYTOWYCH” spełnia wymagania art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce stawiane Dysertacjom doktorskim.**

Konkludując, stawiam wniosek o przyjęcie opracowania przedstawionego do recenzji - jako Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Jakuba Szarego na stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

  
Robert Drobina