

Warszawa, 16.08.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Joanna Ryszkowska  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Warszawska  
02-507 Warszawa  
ul. Wołoska 141

## Recenzja

rozprawy doktorskiej pani mgr inż. **Magdaleny Zajdel**  
pt. **„Hybrydowe materiały kompozytowe stosowane na elementy maszyn w branży automotive”**

Podstawą do wykonania recenzji była uchwała **Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza** z dnia 12 lipca 2023 r.

### **Informacje o ocenianej rozprawie doktorskiej**

Rozprawa mgr inż. Magdaleny Zajdel **„Hybrydowe materiały kompozytowe stosowane na elementy maszyn w branży automotive”**, została wykonana pod opieką promotora prof. dr hab. inż. Mariusza Oleksego i promotora pomocniczego dr inż. Bartłomieja Sobolewskiego. Badania prowadzono w ramach drugiej edycji programu „Doktorat wdrożeniowy” pomiędzy Politechniką Rzeszowską, a firmą Splast Sp. z o.o. w latach 2018 – 2023.

### **Ocena układu rozprawy doktorskiej**

Praca o objętości 231 stron zawiera: cel i zakres pracy, wprowadzenie, wstęp teoretyczny, metodykę badawczą, w której znalazł się opis: materiałów zastosowane do badań, aparatury i sprzętu laboratoryjnego, otrzymywania kształtek do badań właściwości mechanicznych, oraz poszczególnych badań i stanowisk do ich pomiarów. Następnie Doktorantka przedstawiła analizę i omówienie wyników pracy, przedstawiając w kolejnych podrozdziałach wyniki poszczególnych badań i ich omówienie. Pracę zamyka podsumowanie i wnioski, a po nim znalazł się spis literatury, streszczenie i abstrakt.

Praca mgr inż. Magdaleny Zajdel ma typowy dla prac doktorskich układ, z nieco zmienioną kolejnością rozdziałów, rozdział „Cel i zakres pracy” znalazł się na początku, a nie pomiędzy częścią literaturową i badawczą. Udział część literaturowej stanowi ok. 30% pracy, co stanowi o właściwej proporcji część literaturowej i badawczej. Praca jest bardzo obszerna.

Została napisana poprawnym językiem, ale pojawiają się w niej błędy stylistyczne. Autorka posługuje się pojęciami zwyczajowymi, a nie sformułowaniami naukowymi, lub nazwami zaczerpniętymi z języka angielskiego np. *automotive*. Odnośniki do literatury są podane w przypadkowej kolejności, a nie w kolejności pojawiania się. Przyjmuje się, że rozdziały: Wprowadzenie, Cel i zakres pracy oraz Podsumowanie i wyniki pracy, są ponumerowane, a w tytułach rozdziałów nie używamy skrótów.

### **Ocena zastosowanego piśmiennictwa**

Autorka rozprawy w literaturze zawarła 200 pozycji. W tym 11 pozycji to strony internetowe, ale dotyczące statystyk, materiałów i ich właściwości. Jedyne 24 pozycje to odnośniki po polsku, a pozostałe są publikacjami po angielsku, co stanowi ok. 90%. W pracy wykorzystano 63 pozycje wydane po 2018 roku, a więc w ciągu ostatnich pięciu lat.

Większość publikacji dotyczy materiałów stosowanych do wytwarzania kół zębatach, metod ich modyfikacji, technologii stosowanych do wytwarzania kół zębatach i metod ich badań oraz metod badań polimerowych przekładni zębatach.

Zacytowane przez Doktorantkę pozycje literatury zostały dobrane we właściwy sposób, a ich zawartość została wykorzystana poprawnie.

### **Ocena celu rozprawy**

W rozdziale: „Cel pracy i zakres badań”, mgr inż. Magdalena Zajdel omówiła cel rozprawy doktorskiej. Doktorantka przyjęła za cel opracowanie i zbadanie kompozytów na osnowie termoplastycznych tworzyw konstrukcyjnych przeznaczonych do otrzymywania kół zębatach formowanych wtryskowo, wykorzystywanych w branży *automotive*. Autorka przyjęła, że zwiększy się sprawność zaprojektowanej przekładni oraz obniży zużycie kół zębatach wytwarzanych z tworzyw sztucznych o zmodyfikowanym składzie materiałowym.

Cel pracy został poprawnie sformułowany.

Podjęcie tematyki pracy jest uzasadnione zwiększającym się zastosowaniem polimerów w branży motoryzacyjnej oraz ciągłym dążeniem do zmniejszenia masy pojazdów. Jednocześnie trzeba mieć na uwadze bezpieczeństwo użytkowania i koszty produkcji takich wyrobów. Na te aspekty uzasadniające podjęcie tematyki pracy zwraca uwagę także jej Autorka. Dotychczas często do wytwarzania części samochodowych stosowane są termoplasty, jednakże w wielu ich zastosowaniach nie spełniają one w sposób należyty swojej funkcji. Dlatego też podjęcie tematu wytwarzania takich elementów z kompozytów polimerowych jest w pełni uzasadnione.

Warte podkreślenia jest fakt, że Doktorantka w ramach rozprawy zwraca uwagę na kryteria oceny służące do wyboru techniki kształtowania wyrobów z polimerów.

### **Ocena zastosowanych metod badawczych**

Autorka rozprawy metodykę badań opisała w rozdziale „Metodyka badawcza”. W tym rozdziale opisała metodykę badań: właściwości mechanicznych a w tym, oznaczenia cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania, udarności i twardości; analizę mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, oraz sposób przygotowania projektu geometrii dwóch typów kół zębatach, symulacji numerycznej procesu wtrysku kół zębatach, projektu formy wtryskowej kół zębatach z wymiennym gniazdem formującym, procesu wtrysku kół zębatach, opis pomiarów geometrii formy wtryskowej oraz kół zębatach za pomocą skanera optycznego, oraz pomiarów dokładności geometrycznej wykonanych za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej, stanowiska do badań wytrzymałości trwałościowej kół zębatach i opis procesu otrzymywania nowych kompozycji przy pomocy wylączarki ślimakowej.

Sposób opisu metodyki badań jest przedstawiony starannie, zawiera opis badań, opis zastosowanych narzędzi i metodykę ich prowadzenia.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Celem rozprawy było opracowanie i zbadanie kompozytów na osnowie z termoplastycznych tworzyw konstrukcyjnych przeznaczonych do otrzymywania kół zębatach formowanych wtryskowo, wykorzystywanych w przemyśle samochodowym. Dodatkowym celem było zwiększenie sprawności zaprojektowanej przekładni wykonanych z opracowanych kompozytów polimerowych oraz obniżenie zużycia kół zębatach wytwarzanych z tych kompozytów. Cel oceniłam we wcześniejszej części recenzji.

We wprowadzeniu do pracy Doktorantka uzasadnia podjęcie tematu pracy. Niewątpliwie przemysł motoryzacyjny jest jedną z branż, która bardzo intensywnie się rozwija, a jej rozwój wymaga wdrażania nowych materiałów i technologii. Aby zmniejszyć masę pojazdów, a w konsekwencji zużycie paliw od wielu lat wprowadza się w tej branży nowe materiały lżejsze od dotychczas stosowanych. Jedną z grup materiałów stosowanych w tej branży są termoplasty polimerowe, z których produkowane są koła zębatach stosowane do wytwarzania przekładni zębatach. Ponieważ cechy polimerów są inne niż cechy metali, aby zwiększyć popularność polimerowych przekładni konieczne jest zwiększenie ich cech

wytrzymałościowych i przedłużenie trwałości, dlatego tematyka rozprawy wpisuje się w te trendy.

Firma Splast produkuje wiele elementów z polimerów na potrzeby branży motoryzacyjnej i jest zainteresowana wdrażaniem nowych rozwiązań w swojej produkcji. Dlatego prowadzenie badań w zaproponowanej w doktoracie przez mgr inż. Majkę Odalanowską tematyce jest bardzo pożądanym rozwiązaniem. Zwłaszcza, że jest to tzw. „doktorat wdrożeniowy” realizowany na podstawie umowy pomiędzy Politechniką Rzeszowską, a firmą Splast Sp. z o.o.

We „Wstępie teoretycznym” Doktorantka przedstawiała: opis charakterystyki wybranych materiałów polimerowych stosowanych do otrzymywania elementów maszyn. W opisie tym przedstawiła opis właściwości mechanicznych, reologicznych i użytkowych wybranych tworzyw polimerowych, z których są otrzymywane elementy maszyn, a w tym polioksymetylen (POM), poliamidów: poliamidu 6 (PA 6), poliamidu 6.6 (PA 6.6), poliamidu 4.6 (PA 4.6); poliiftalamidu (PPA) i polieteroeteroketonu PEEK oraz badania kół zębatach z tych polimerów i wnioski z analizy literatury dotyczącej badań polimerowych kół zębatach. W kolejnej części wstępu teoretycznego Autorka zawarła opis metod modyfikacji właściwości mechanicznych wytypowanych tworzyw, w tym między innymi opis badań kół zębatach wykonanych z modyfikowanych polimerów. Istotnym elementem opisów w części teoretycznej jest charakterystyka technologii formowania wtryskowego jako głównej metoda otrzymywania polimerowych kół zębatach oraz szerszy opis polimerowych przekładni zębatach. Ta część pracy została zamknięta podsumowaniem, w którym Doktorantka przedstawiła przesłanki do podjęcia prac w ramach pracy doktorskiej. W grupie elementów produkowanych na potrzeby przemysłu samochodowego, metodą formowania wtryskowego są koła zębata. Większość z materiałów polimerowych, z których wykonywane są koła zębata to polimery krystaliczne, w związku z tym trudny jest proces ich formowania, ze względu na ich skurcz. W odniesieniu do kół wytwarzanych z polimerów brak wytycznych i norm, dotyczących konstrukcji przekładni formowanych wtryskowo, a dopuszczenie ich do stosowania odbywa się na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Dlatego podjęcie badań rzadko opisywanych w literaturze polimerów i ich kompozytów jest zasadne. W szczególności brakuje badań nad PA 4.6 czy PPA, które odznaczają się dobrymi właściwościami mechanicznymi i stanowią doskonałą osnowę do otrzymania kompozytów hybrydowych.

W części nazwanej „Metodyka badawcza” Doktorantka opisała materiały zastosowane do badań, aparaturę i sprzęt laboratoryjny oraz metody badań stosowane do zrealizowania celów doktoratu. Przedmiotem badań w ramach rozprawy było dziesięć materiałów

polimerowych: niemodyfikowany PA6, PA6 z dodatkiem 30% mas. włókna szklanego, niemodyfikowany poliamid 6.6, poliftalamid modyfikowany włóknem szklanym w ilości 35 % mas. stabilizowany termicznie i z dodatkiem środka smarnego, poliftalamid modyfikowany włóknem szklanym w ilości 30 % mas.; poliamid 66 modyfikowany włóknem szklanym w ilości 35 % mas.; poliamid 66 modyfikowany włóknem szklanym w ilości 50 % mas.; poliamid 46 stabilizowany termicznie z dodatkiem środka smarnego; poliamid 46 z dodatkiem teflonu PTFE; poliamid 66 modyfikowany PTFE oraz włóknem szklanym w ilości 30 % mas., stabilizowany termicznie. Do dodatkowej modyfikacji wybranych polimerów i kompozytów zaproponowano: wielościenne nanorurki węglowe (CNT), środek smarny oparty na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych (SM) oraz kompatybilizator chemicznie modyfikowany polietylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym (E926). Opis sprzętu laboratoryjnego został wykonany w poprawny sposób, zawiera nazwę sprzętu, ale też jego producentów.

Do metodyki badań zastosowanych w pracy odniosłam się już we wcześniejszej części recenzji. Metodyka badań została przedstawiona w przejrzysty sposób. Metody i techniki badawcze oraz metody projektowania zostały właściwie dobrane i opisane.

W części nazwanej „Analiza i omówienie wyników pracy” rezultaty pracy Doktorantka przedstawiła w dwunastu podrozdziałach. W pierwszych czterech podrozdziałach Autorka opisała wyniki oznaczenia: udarności, cech wytrzymałościowych wyznaczonych podczas statycznej próby rozciągania oraz twardości, a także wyniki analiza mikrostruktury za pomocą SEM. Kolejny podrozdział dotyczył opisu procesu importu modelu kół zębatych i jego poprawy po wstępnej poprawie z zastosowaniem generatora MES.

Następny podrozdział zawierał opis symulacji numerycznych związanych z położeniem punktów wtrysku dla obu rodzajów kół zębatych. Symulacje te ułatwiły dobór rozmieszczenia tych punktów, oraz ich geometrii, co może wpłynąć na poprawę jakości ostatecznego wyrobu i znaczną redukcję kosztów dzięki skróceniu czasu projektowania oraz ilości prób technologicznych. Przeprowadzone analizy pozwoliły Autorce stwierdzić, że linie łączenia strugi nie będą miały wpływu na wytrzymałość trwałościową zębów kół. Ponadto pozwolą na wyeliminowanie odkształcenia spowodowanego różnicami wartości skurczów tworzywa w kierunku grubości ścianki i płaszczyzny przekroju podziału. Kolejny etap realizacji pracy Autorka opisała w podrozdziale pt: Analiza modelu formy wtryskowej kół zębatych”. Znalazł się w nim opis wykonania modelu konstrukcji formy wtryskowej wyposażonej w dwie wymienne wkładki, które formowały geometrię kół, a w tym opis: gniazda formującego, układu

wlewowego, układu chłodzenia, układu wypychania wypraski, układu usuwania wlewka, napędy płyt i segmentów, elementy prowadzące i ustalające podział formy.

Następny etap realizacji pracy Doktorantka opisała w podrozdziale pt: „Analiza procesu wtrysku kół zębatach z wykorzystaniem opracowanej formy wtryskowej”. Opis ten wskazuje, że mgr inż. Majka Odalanowska analizy te prowadziła zgodnie z procedurami stosowanymi w firmie Splast. Zweryfikowano sposób zakładania formy, pracę formy w cyklu jałowym, operację wtryskiwania, jakość wyprasek i przygotowaną dokumentację. Następnie skontrolowano poprawność wypełniania gniazd formujących koła zębata, ustalono punkt przełączenia ciśnienia wtrysku na docisk oraz określono czasu chłodzenia. Po tych etapach wykonano korekty narzędziowe i wykonano trzy serie wtrysków obu typów kół zębatach, które przeanalizowano. Na potrzeby badań wykonano po 25 szt. obu rodzajów kół zębatach wykonanych z różnych materiałów kompozytowych (łącznie ok. 600 szt.).

W dziewiątym podrozdziale zamieszczono wyniki analizy geometrii wkładek formujących oraz wyprasek obu rodzajów kół zębatach. Autorka rozprawy zaobserwowała liczne odchyłki mierzonych kół zębatach względem modelu CAD, ale wskazała na przyczyny tego zjawiska.

Dziesiąty podrozdział zawiera analizę dokładności geometrycznej wykonanej za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40 obu rodzajów kół wykonanych z różnych materiałów.

Natomiast rozdział 11-ty zawiera wyniki analizy badań trwałościowych przekładni zębatach. W rozdziale opisano wyniki badań trwałościowych przekładni z różnych materiałów, określono wpływu wstępnego docierania korygującego na wytrzymałość trwałościową przekładni oraz wyniki testów trwałościowych przekładni z zastosowaniem wytypowanych hybrydowych kompozycji polimerowych. Na podstawie przeprowadzonych badań trwałościowych stwierdzono, że kompozycja kompozytowa, która charakteryzuje się najlepszymi wynikami pod kątem wytrzymałości trwałościowej to PA46/PTFE/CNT/SM.

W ostatnim podrozdziale przedstawiono wyniki analizy geometrii zębów obu rodzajów kół po testach trwałościowych.

Po tym rozdziale Autorka zamieściła „Podsumowanie i wnioski”, literaturę, streszczenie i abstract.

Po analizie zawartości pracy przedstawionej powyżej można stwierdzić, że mgr inż. Magdalena Zajdel podjęła w rozprawie bardzo istotną i aktualną tematykę dla branży samochodowej dotyczącą wytwarzania kół zębatach metodą wtryskiwania z hybrydowych kompozytów termoplastów polimerowych. W pracy przedstawiono też niezwykle istotny z

punktu widzenia poszerzenia zastosowań takich kół procesu oceny takich wyrobów. Wyniki szerokiego zakresu badań dotyczące: badań kompozytów termoplastów polimerowych, projektowania form wtryskowych, procesu wtryskiwania kół zębatach, ich oceny oraz oceny przekładni z wytworzonych kół, uzyskane w pracy pozwolą rozszerzyć zakres zastosowań kół zębatach na inne branże. Wartość merytoryczną pracy oceniam wysoko.

### **Ocena omówienia wyników badań**

Wyniki badań Doktorantka przedstawiła i omówiła we właściwy sposób. W trakcie omawiania wyników znalazły się odniesienia do wyników badań przedstawionych w literaturze. Wyniki analiz zostały we właściwy sposób omówione i zinterpretowane. Korzystne byłoby określenie zmian procentowych cech polimerów wyznaczonych w pracy.

### **Ocena możliwości praktycznego zastosowania wyników badań**

Praca doktorska była współrealizowana w ramach współpracy z firmą Splast, która jest zainteresowana wdrożeniem wyników rozprawy do swojej praktyki.

### **Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego**

Problem naukowy postawiony przez Doktorantkę: ocena materiałów i technologii w procesie wytwarzania kół zębatach oraz oceny wytworzonych kół i przekładni jest oryginalnie rozwiązany problemem naukowym.

### **Uwagi i pytania dotyczące rozprawy**

- W pracy, zwłaszcza w części związanej z opisem wyników badań znajdują się błędy stylistyczne np. na str. 110 .....W dalszym rozumowaniu, przełożyło się to na zwiększenie...
- W opisie składu kompozytów Autorka posługuje się pojęciem % wag., poprawnym wydaje się % mas.
- W pracy badane są procesy przetwarzania wtryskowego, a brakuje jednej z podstawowych charakterystyk przetwarzanych materiałów: wskaźnika szybkości płynięcia polimerów i kompozytów przed i po modyfikacji.
- Które z cech hybrydowych kompozytów według Autorki rozprawy zdecydowały o tym, że materiał PA46/CNT/SM wykazał najlepsze właściwości w testach trwałościowych przekładni.
- Czy analizowano hybrydowe kompozyty PA46/CNT/SM o innej zawartości dodatków niż zaproponowane w rozprawie.

**Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Zajdel jest bardzo interesującą pracą naukową. Doktorantka wykazała się wiedzą teoretyczną, doświadczeniem badawczym i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wyniki badań związane z rozprawą doktorską przedstawiła w publikacji z listy JCR, której jest pierwszym autorem.

**Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej**

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej opinie stwierdzam, iż praca **mgr inż. Magdaleny Zajdel** pt. „**Hybrydowe materiały kompozytowe stosowane na elementy maszyn w branży automotive**”, odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę. Doktorantka zrealizowała cele pracy i szeroki zakres badań. Dlatego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej.

