

RECENZJA

pracy doktorskiej **mgr inż. Pawła POSUNIAKA**

**„ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA SKUTKÓW UDERZENIA SAMOCHODU OSOBOWEGO W TYLNE
URZĄDZENIE ZABEZPIECZAJĄCE POJAZDU CIĘŻAROWEGO”**

(Promotor: dr hab. inż. Jerzy Jackowski, prof. WAT)

Podstawa opracowania:

uchwała nr 33/RDN IM/2025 z dnia 19.02.2025 r. wyznaczająca recenzentów pracy w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr. inż. Pawłowi POSUNIAKOWI i podpisana w konsekwencji UMOWA O DZIEŁO NR 39/W100/501-00/2025 z dnia 2025-03-21 pomiędzy Wojskową Akademią Techniczną im. Jarosława Dąbrowskiego a recenzentem.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

1.1. Charakterystyka redakcji pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy łącznie 183 strony (numeracja stron kończy się na stronie 183 w załączniku 3), z czego 140 strony stanowi tekst rozprawy (od strony 17 do strony 157), 9 stron spis literatury (na stronach 158-166 i zawiera 108 pozycji). Praca zawiera także 3 załączniki:

- Załącznik 1. Wyniki badań zderzeniowych dla wybranych absorberów – str. 167-171
- Załącznik 2. Wyniki badań zderzeniowych dla crash-boxów stosowanych w pojazdach str. 172-175
- Załącznik 3. Równania opisujące model matematyczny zderzenia str. 176-183.

Praca zawiera także:

- 2 strony spisu treści (nienumerowane),
- Wykaz ważniejszych oznaczeń- 2 strony nienumerowane
- Spis tabel - 3 strony nienumerowane,
- Spis rysunków - 5 stron nienumerowanych.

Liczba wymienionych pozycji wynosi 46 tabel i 92 rysunki. Praca nie zawiera wydzielonego streszczenia ani w języku polskim ani w angielskim. Pracę podzielono na 11 rozdziałów:

1. Wprowadzenie
2. Wymagania normatywne tylnych urządzeń zabezpieczających
3. Analiza rozwiązań konstrukcyjnych RUPD
4. Przegląd baz patentowych
5. Cel i zakres rozprawy
6. Koncepcja RUPD absorbującego energię
7. Stanowisko do badań wytrzymałościowych
8. Badania eksperymentalne struktur energochłonnych
9. Opracowanie nowatorskiego absorbera energii uderzenia
10. Model matematyczny zderzenia samochodów
11. Podsumowanie

Po „Podsumowaniu” następują jeszcze: Bibliografia, Załączniki (1–3).

1.2. Charakterystyka treści pracy

ROZDZIAŁ 1 – Wprowadzenie

Doktorant w rozdziale 1 przedstawił istotę problemu wypadków drogowych w ujęciu ogólnym, a w szczególności zderzeń tylnych pomiędzy samochodem osobowym a samochodem ciężarowym. Autor zaprezentował związane z tym zjawiskiem skutki społeczne i ekonomiczne (np. koszty ofiar) w oparciu o dane polskie i międzynarodowe. Na podstawie analizy literatury Doktorant określił i przeanalizował typowe rodzaje zderzeń tylnych.

Doktorant wykazał, że w Polsce wypadki typu najechanie pojazdu na tył innego pojazdu stanowią drugi pod względem częstości rodzaj kolizji drogowych (około 11–12 % wszystkich wypadków i 5–8 % ofiar śmiertelnych). Autor zauważył, że w dostępnych polskich źródłach statystycznych nie wyróżnia się odrębnie kategorii najechania samochodów osobowych na tył samochodów ciężarowych. W związku z tym sięgnął do statystyk ze Stanów Zjednoczonych, z których wynika, że 21 % wypadków z udziałem samochodów osobowych i ciężarowych to najechania na tył pojazdu ciężarowego. Na podstawie literatury amerykańskiej Autor oszacował ponadto, że 90 % wszystkich przypadków najechania stanowią zderzenia centralne lub offsetowe.

Doktorant zwrócił także uwagę, że w ostatnich kilkunastu latach liczba samochodów osobowych w Polsce wzrosła o ponad 50 %, a samochodów ciężarowych – o ponad 30 %, co dodatkowo zwiększa ryzyko zdarzeń tylnych. Odnotował również, że w literaturze opisuje się wzrost liczby tego typu wypadków, gdy pojazd konwencjonalny porusza się za pojazdem zautomatyzowanym.

ROZDZIAŁ 2 – Wymagania normatywne tylnych urządzeń zabezpieczających

Doktorant w rozdziale 2 zestawiał i przeanalizował obowiązujące w różnych regionach świata wymagania normatywne i prawne względem tylnych urządzeń zabezpieczających (RUPD - ang. Rear Underrun Protective Device) stosowanych w pojazdach ciężarowych (na podstawie 5 źródeł). Celem tej analizy było rozpoznanie przepisów i metod badawczych tylnych urządzeń zabezpieczających.

Najważniejsze treści przedstawione w rozdziale 2 obejmują:

- **porównanie wymagań w różnych regionach:** Doktorant zestawiał warunki badań RUPD zgodnie z normami Stanów Zjednoczonych, Kanady, Unii Europejskiej oraz Chin;
- **omówienie parametrów normatywnych**, m.in. minimalnej wysokości przekroju belki RUPD, maksymalnego przeswitu pod spodnią częścią urządzenia oraz wartości sił przykładanych w punktach P1, P2 i P3 podczas testów wytrzymałościowych;
- **opis wymagań dotyczących pochłaniania energii (lub ich brak)** – normy amerykańskie i kanadyjskie przewidują pochłanianie energii na poziomie 20 kJ, podczas gdy normy ONZ (stosowane w Europie) pomijają ten aspekt.

W rozdziale 2 doktorant omówił także metody badań: podstawowe metody badań tylnych urządzeń zabezpieczających: test wytrzymałościowy (głównie quasi-statyczny) obciążenia maksymalną siłą, będący podstawowym badaniem w Europie; testy zderzeniowe (np. wózkami badawczymi) wspomniane w normach USA/Kanada oraz testy konsumenckie wprowadzone przez IIHS na rynku amerykańskim, w tym konfiguracje testów zderzeniowych (centralne, offsetowe - 50% i 30% overlap).

Autor zakończył rozdział wydzielonym podsumowaniem, w którym sformułował następujące wnioski:

- kluczowym badaniem RUPD jest statyczny test wytrzymałościowy;
- wymiary i miejsce montażu urządzenia są zasadniczo takie same na całym świecie, co narzuca podobne ograniczenia konstrukcyjne;
- w Europie wymagana siła próbna jest znacznie większa niż w USA, Kanadzie czy Chinach, jednak przepisy nie nakazują pomiaru energii pochłanianej przez urządzenie. Wyższa siła poprawia zdolność belki do zatrzymania pojazdu osobowego przed wjechaniem pod ciężarówkę, lecz brak kryterium energochłonności może prowadzić do większych przeciążeń pasażerów podczas zderzenia.

ROZDZIAŁ 3 – Analiza rozwiązań konstrukcyjnych RUPD

W rozdziale tym Autor przedstawił przegląd i analizę różnych istniejących rozwiązań konstrukcyjnych tylnych urządzeń zabezpieczających (RUPD) stosowanych w pojazdach ciężarowych, bazując na informacjach przedstawionych w literaturze naukowej - 8 różnych pozycjach. Doktorant opisał budowę przedstawianych urządzeń zabezpieczających, zasadę ich działania, wyniki badań (głównie symulacyjnych) przedstawione przez autorów tych rozwiązań, a także własne oceny i komentarze dotyczące zalet, ograniczeń oraz potencjalnej zgodności z obowiązującymi przepisami, zwłaszcza europejskimi. Przeanalizował w jaki sposób różne konstrukcje tylnych urządzeń zabezpieczających zapobiegają wjechaniu samochodu osobowego pod tył pojazdu ciężarowego,

a w szczególności, jakie rozwiązania wprowadzono w celu pochłaniania energii kinetycznej uderzenia. Przedstawił analizę następujących rozwiązań: klasyczne rozwiązanie uchylnie; prototypowe urządzenia zabezpieczające z elementami pochłaniającymi energię (warianty A,B,C); dwubelkowe urządzenie zabezpieczające z rurami wypełnionymi spienionym aluminium i regulowanymi wspornikami, urządzenie zabezpieczające ze wspornikami w postaci rur kratownicowych i elementami absorbującymi energię, urządzenie zabezpieczające z siatką z lin stalowych unoszących dolną belkę podczas zderzenia (Pier under-ride guard), urządzenie zabezpieczające przegubowe z ukośnym absorberem, urządzenie zabezpieczające w postaci płyty ze stalowymi crash-boxami, klasyczna belka, ale z aluminiową pianką klinową dosuwaną do wsporników, system zewnętrznych poduszek gazowych w tylnej części podwozia, sztywne RUPD wykorzystane jako referencyjne w analizach numerycznych – posłużyło jako punkt odniesienia przy ocenianiu nowych koncepcji.

Rozdział 3 nie przedstawia własnych, nowych wyników badań eksperymentalnych czy symulacyjnych Autora dotyczących tych konkretnych, już istniejących rozwiązań, a jedynie wyniki pochodzące z cytowanych źródeł oraz analizę i krytyczną ocenę tych wyników i rozwiązań.

ROZDZIAŁ 4 – Przegląd baz patentowych

W rozdziale 4, Autor dokonał systematycznej analizy zgłoszeń i przyznanych patentów dotyczących tylnych urządzeń zabezpieczających (RUPD) na podstawie wyszukiwarek Urzędu Patentowego RP oraz Europejskiego Urzędu Patentowego. Najpierw w podrozdziale 4.1 „Klasyfikacja MKP” przedstawił podział wynalazków według Międzynarodowej Klasyfikacji Patentowej, co pozwoliło wyodrębnić dominujące grupy technologii energochłonnych i konstrukcyjnych rozwiązań RUPD:

- **sztywne belki zintegrowane z elementami ulegającymi kontrolowanej deformacji**, np. profile stalowe wyposażone w strefy zgniotu lub wkładki z materiałów kompozytowych, które podczas zderzenia odkształcają się plastycznie i pochłaniają energię;
- **rury i przekroje rurowe pełniące rolę absorberów, w których energia kinetyczna jest rozpraszana przez zgniatanie ścianek** (np. koncepcja rur umieszczonych wewnątrz belki poprzecznej);
- **elementy przegubowe lub wysuwane, pozwalające na zwiększenie prześwitu w normalnej eksploatacji, a w chwili zderzenia przełączające się w pozycję energochłonną**
- **poduszki lub wkładki gazowe/odlewane z pianki, stosowane jako dodatkowy bufor pomiędzy pojazdem a belką RUPD, które przy uderzeniu ulegają sprężystej lub plastycznej deformacji;**
- **mechanizmy wykorzystujące opór skrawania lub tarcie**, gdzie absorber składa się z nacinanego rdzenia lub wkładki, której materiał przy uderzeniu jest usuwany w postaci wiórów, efektywnie zamieniając energię kinetyczną na pracę skrawania (koncepcja rozwinięta później w rozdziale 9).

Następnie Autor omówił dwie kategorie patentów w kontekście polskiego rynku - **chronione** i **niechronione**, czyli rozwiązania, które mogą swobodnie wejść do produkcji w Polsce. Na podstawie analizy rozwiązań chronionych w Polsce Autor stwierdził, że żadne z rozwiązań nie jest zbliżone technicznie do koncepcji będącej przedmiotem jego prac badawczych i projektowych. W rozwiązaniach niechronionych przedstawił rozwiązania zbliżone technicznie do koncepcji będącej przedmiotem prowadzonych prac badawczych i projektowych. Dla uznanych za najciekawsze Autor przytoczył kluczowe rysunki i opisy konstrukcyjne, ocenił innowacyjność, stopień wdrożenia i ewentualne bariery prawne lub technologiczne ich komercjalizacji.

W podsumowaniu rozdziału 4 Autor stwierdził, że pochłanianie energii uderzenia w prezentowanych wynalazkach ma następować w wyniku deformacji, głównie plastycznej, określonych elementów konstrukcyjnych RUPD, tzw. absorberów, którymi są przede wszystkim struktury bazujące na odpowiednio ukształtowanych profilach lub płaskownikach. Dodatkowo stwierdził, że opisane wynalazki bazują na klasycznych konstrukcjach RUPD.

ROZDZIAŁ 5 – Cel i zakres rozprawy

W rozdziale 5 po krótkim odniesieniu się do wad istniejących konstrukcji - stanowią zaporę przed wjechaniem samochodu osobowego pod tył pojazdu ciężarowego natomiast w ogóle lub w niewielkim stopniu pochłaniają energię zderzenia – Autor sformułował cele rozprawy:

- **cel główny:** wskazanie możliwości udoskonalenia tylnego urządzenia zabezpieczającego pojazdu ciężarowego w aspekcie ograniczenia skutków zderzenia,
- **cel naukowy:** analiza wpływu zastosowania absorberów na zmniejszenie obciążeń działających na samochód osobowy uderzający w tył pojazdu ciężarowego,

- **cel praktyczny:** doskonalenie cech tylnego urządzenia zabezpieczającego pojazdu ciężarowego – wskazanie konstrukcji, struktury i materiałów absorbera umieszczonego w RUPD, które pozwolą na ograniczenie skutków zderzenia przy jednoczesnym spełnieniu normatywnych wymagań.

W rozdziale 5 wyznaczono także zadania badawcze (w 5.2. Zakres rozprawy) obejmujące analizę norm, przegląd rozwiązań, budowę stanowiska do badań wytrzymałościowych RUPD, projekt koncepcji RUPD, badania energochłonności materiałów i struktur absorberów, opracowanie nowego absorbera, opracowanie modelu matematycznego zderzenia i symulacje dla zbadania wpływu właściwości konstrukcyjno-materiałowych RUPD (z absorberem) na poziom obciążeń działających na samochód osobowy uderzający w tył pojazdu ciężarowego.

W rozdziale tym Doktorant podkreślił także, że praca realizowana była w trybie doktoratu wdrożeniowego i że istotnym, utylitarnym elementem pracy było zaprojektowanie i wykonanie specjalistycznego stanowiska badawczego dla tylnych urządzeń zabezpieczających stosowanych w przyczepach, naczepach i samochodach ciężarowych.

ROZDZIAŁ 6 – Koncepcja RUPD absorbującego energię

W rozdziale tym Autor przedstawił koncepcję autorskiego projektu tylnego urządzenia zabezpieczającego (RUPD), dla którego założył potrzebę spełnienia wymagań prawnych; taniej i łatwej produkcji oraz zapewnienia absorbowania (w sposób zamierzony i kontrolowany) energii uderzenia. Koncepcja ta zawiera elementy klasycznego RUPD uzupełnionego o segmenty energochłonne, zachowując zgodność z normami. Autor opisał założenia konstrukcyjne (wymiary i pożądaną deformację absorbera), dobór materiałów oraz geometrię struktur pochłaniających energię (np. plastry miodu, piana aluminiowa).

Doktorant przyjął, że współczesne konstrukcje RUPD mają skutecznie zabezpieczać przed wjechaniem pod tył pojazdu ciężarowego w przypadku uderzenia centralnego samochodu osobowego średniej klasy, gdy maksymalna względna prędkość uderzenia wynosi ok. 11,1 – 12,5 m/s (40 – 45 km/h). Autor przedstawił zebrane w pracy wyniki badań RUPD (rys. 6.2) dla analizy maksymalnej deformacji uzyskując wynik w zakresie 0,013 do 1,186 m przy poziomach sił od 100 kN do 190 kN. Porównano zdolność pochłaniania energii typowego pojazdu osobowego z pochłanianiem przez klasyczne RUPD (51 kJ względem 11 kJ przy sile 360 kN). Maksymalną deformację absorbera i wspornika RUPD Doktorant założył na poziomie 0,2 – 0,25 metra - dodając jednak ograniczenia związane z zabudową naczep ustalił maksymalną długość próbki absorbera na 0,15m.

Autor oszacował na podstawie 3 scenariuszy zderzenia poziomy energii zderzenia od 43,6 przez 92,4 do 219 kJ dla prędkości zderzenia odpowiednio 8,9; 11,1 i 15,6 m/s. Przedstawił model tylnego urządzenia zabezpieczającego wytypowany do dalszych prac badawczych i projektowych związanych z wyposażeniem go w elementy absorbujące.

W rozdziale 6.2 „Struktury pochłaniające energię” Autor opisał najistotniejsze cechy struktur pochłaniających energię przedstawiając ich zalety i ograniczenia w aspekcie zdolności do pochłaniania energii kinetycznej uderzenia w tabeli 6.3. Przeanalizował struktury plastra miodu (np. cienkościenne o budowie plastra miodu), pianki (np. pianka aluminiowa), cienkościenne struktury wypełnione pianką o stopniowanej gęstości, konstrukcje cienkościenne wypełnione strukturą plastra miodu lub pianką, cienkościenne stalowe profile o przekroju kwadratowym, struktury kolumnowe dwu- i trzykomórkowe wypełnione pianką, kwadratowe, wielokomórkowe struktury kolumnowe, tuby stożkowe wypełnione pianką aluminiową, cienkościenne konstrukcje aluminiowe wypełnione strukturą plastra miodu z Nomexu®.

W rozdziale 6 Autor przedstawił także wymagane cechy absorberów (nieodwracalna konwersja energii, ustalona wartość przebiegu siły w funkcji deformacji, mała wrażliwość zmiany właściwości energochłonnych na kierunek przyłożenia obciążenia, niewielka masa i koszty produkcji) oraz teoretyczne podstawy pochłaniania energii zderzenia.

ROZDZIAŁ 7 – Stanowisko do badań wytrzymałościowych

W rozdziale 7 Autor zaprezentował opracowane na potrzeby rozprawy ale także w aspekcie wdrożeniowym (badania homologacyjne i prace B+R w Łukasiewicz – PIMOT) stanowisko quasi-statycznych prób RUPD. Autor opracował założenia konstrukcyjne stanowiska, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań normatywnych. Główne założenia dotyczyły koniecznych do realizacji sił badawczych (do 180 kN) oraz deformacji RUPD (do 0,4 m). Przedstawiono kilka koncepcji rozwiązań budowy stanowiska. Pokazano i opisano trzy rozwiązania koncepcyjne (a, b, c) różniące się głównie sposobem mocowania i regulacji wysokości siłownika oraz konstrukcją wsporczą. Na podstawie koncepcji c) opracowano rozwiązanie docelowe które przedstawiono na rysunku oraz fotografii jako zbudowane.

ROZDZIAŁ 8 – Badania eksperymentalne struktur energochłonnych

W rozdziale tym Autor opisał praktyczną weryfikację właściwości materiałów i struktur wytypowanych jako potencjalne absorbery energii dla projektowanego RUPD absorbującego energię. Rozdział ten podzielił na 4 podrozdziały.

Podrozdział 8.1 Wytrzymałościowe badania quasi-statyczne dokumentuje badania zrealizowane na specjalistycznym stanowisku w Łukasiewiczu – PIMOT (autorstwa Doktoranta, opisanym w rozdziale 7), które miały na celu wyznaczenie charakterystyk deformacji badanych próbek co pozwoliło na wytypowanie materiałów i struktur o korzystnych właściwościach do dalszych badań dynamicznych. Badaniu poddano różne struktury plastra miodu z blachy aluminiowej, w tym w obudowie stalowej, oraz piankę aluminiową z zamkniętymi porami oraz próbkę ceramiczną. Na podstawie wyników badań quasi-statycznych, do dalszych badań dynamicznych (zderzeniowych) zrezygnowano z próbki ceramicznej. Przeanalizowano wyniki prób i dokonano oceny próbek w aspekcie cech pożądanych dla materiałów energochłonnych – wszystkie pożądane cechy posiadają tylko próbki o strukturze plastra miodu.

Podrozdział 8.2 szczegółowo opisuje badania dynamiczne struktur i materiałów o właściwościach energochłonnych, które miały na celu ocenę ich przydatności jako absorberów energii w udoskonalonym RUPD. Badania zrealizowano w Laboratorium Bezpieczeństwa Pojazdów w Łukasiewiczu – PIMOT. Autor rozprawy opracował metodykę badawczą i sprecyzował warunki początkowe testów, w tym określił parametry wózka badawczego oraz prędkości uderzenia; określił także zakres i sposób pomiaru niezbędnych wielkości; przygotowywał próbki do badań i przeprowadził obróbkę zarejestrowanych danych. Testy polegały na uderzeniu wózkiem o masie 350 kg, z badanym absorberem, z prędkości 32 km/h (8,9 m/s) w nieodkształcalną barierę. Przyspieszenie wózka mierzono trójosiowym akcelerometrem, a deformację próbek analizowano metodą kinematograficzną na podstawie nagrań z kamer high-speed. Z danych o opóźnieniu wózka wyznaczano przebiegi siły bezwładności i siły uderzenia a na ich podstawie całkowitą energię deformacji próbek oraz wskaźniki SEA (ilości pochłoniętej energii do masy próbki) oraz MCF (średnia siła ściskająca dla znanej długości deformacji) i PCF (największą siłę podczas ściskania próbki). Zamieszczono także fotografie procesu deformacji poszczególnych próbek (Tabela 8.5).

Badania wykazały, że plastry miodu są obiecującymi absorberami w RUPD, pod warunkiem zamknięcia ich w metalowej obudowie – ta usztywnia strukturę, nie podnosząc istotnie pików siły. Przy zderzeniu centralnym samochodu osobowego klasy średniej z prędkością 40 km/h taki wkład pochłania około 15 % energii kinetycznej pojazdu, a rejestrowane opóźnienia pozostają bezpieczne (≤ 80 g). Zaproponowane rozwiązania spełniają kryteria energochłonności, są tanie i łatwe do wdrożenia, lecz ich maksymalna długość deformacji ograniczona jest przepisami homologacyjnymi – zbyt „głęboki” skok mogłaby przekroczyć dopuszczalne przemieszczenie całego RUPD.

Dynamiczne badania próbek przy różnych prędkościach uderzenia (2,8; 5,6; 6,7; 8,9 m/s) wykazały, że przebiegi obciążeń i pochłonięta energia są zależne od prędkości. Zasadnicze różnice zauważono dla skrajnych prędkości (najniższej i najwyższej).

W podrozdziale 8.3 Autor opisał wyniki projektu CRASH-BOX (Łukasiewicz-PIMOT) jako tło dla własnych badań. W projekcie przebadano cztery seryjne crash-boxy przy prędkościach 2,8 – 6,7 m/s (energii zderzenia: 1,35–7,78 kJ). Procedura była identyczna z tą, której Doktorant użył w rozdz. 8.2, co pozwoliło mu bezpośrednio porównać efektywność swoich absorberów RUPD ze standardowymi rozwiązaniami oraz potwierdzić wiarygodność przyjętej metodyki.

W podrozdziale 8.4 dokonano podsumowania zrealizowanych badań. Potwierdziły one, że spośród testowanych próbek najlepiej jako absorber wypada aluminiowy „plaster miodu”. Po zamknięciu w metalowej obudowie zachowuje on stały, niewysoki poziom siły w całym zakresie zgniotu, pochłania ~15 % energii przy zderzeniu 40 km/h, a rejestrowane szczytowe opóźnienia mieszczą się w granicach 200–250 m/s². Konstrukcje stalowe są tańsze, lecz generują ponad dwukrotnie większe piki siły i opóźnień, a pianka aluminiowa podnosi siłę wraz z deformacją, co jest niekorzystne. Wskaźniki masowe SEA i długościowe MCF osiągają najwyższe wartości (20 kJ/kg i ~90 kJ/m) dla wariantu plaster-miodu bez obudowy, przy czym wersja HC1.71box_x2 daje najlepszy kompromis między pochłanianiem energii a ograniczeniem siły ściskającej. Warunkiem wdrożenia pozostaje jednak dobranie długości zgniotu tak, by nie przekroczyć normatywnych limitów ugięcia RUPD.

ROZDZIAŁ 9 – Opracowanie nowatorskiego absorbera energii uderzenia

W rozdziale Doktorant 9 opisał prototyp absorbera wykorzystującego opór skrawania materiału (wniosek patentowy P.448121 Autora). Energia kinetyczna (przedzderzeniowa) jest absorbowana poprzez skrawanie wałka (badano 3 warianty) wykonanego z aluminium, którego średnica jest nieznacznie większa (1 lub 2 mm) od otworu w

stalowej płycie, tzw. pierścieniu skrawającym. Autor rozprawy opracował koncepcję budowy absorbera; sformułował także jego zasadę działania, określił umiejscowienie w RUPD i przeprowadził badania prototypu.

Przeprowadzone badania porównawcze wykazały, że prototyp ROD_02 – walec z ośmioma wzdłużnymi wypustami – osiąga 87–90 % sprawności przy prędkościach $> 5,6$ m/s, a przebieg pochłaniania energii jest stabilny, bez gwałtownych pików siły. Autor ocenił, że konstrukcja wymaga jedynie odchudzenia dla podniesienia wskaźnika SEA. Autor podkreślił, że prototypowy absorber powstał z powszechnie dostępnej stali narzędziowej i aluminium, przy użyciu zwykłych obrabiarek, dlatego jego wdrożenie nie wymaga kosztownego parku maszynowego ani skomplikowanej kooperacji – w przeciwieństwie do absorberów typu plaster miodu czy pian metalicznych.

ROZDZIAŁ 10 – Model matematyczny zderzenia samochodów

W rozdziale 10 Doktorant opisał opracowany model matematyczny zderzenia samochodu osobowego z pojazdem ciężarowym, w którym samochód osobowy porusza się z określoną prędkością po płaskiej i utwardzonej powierzchni, a następnie uderza czołowo i centralnie w tył nieruchomego pojazdu ciężarowego. Model obejmuje dwie fazy - pierwszą obejmującą ruch pojazdów do momentu kontaktu samochodu osobowego z pojazdem ciężarowym i drugą obejmującą deformację struktur obu pojazdów. Autor rozprawy opracował koncepcję modelu zderzenia offsetowego na podstawie modelu zderzenia centralnego, modele fizyczne, dane do modelowania oraz przeprowadził parametryzację i weryfikację eksperymentalną modelu. W zakresie modelu zdarzenia centralnego oraz opracowaniu programu komputerowego w programie Matlab doktorant współpracował z dr inż. Piotrem Zdanowiczem z Politechniki Warszawskiej.

Opracowany model jest modelem płaskim i charakteryzuje się 8 stopniami swobody - 6 stopni swobody dla obu pojazdów (ruch postępowy, drgania pionowe i kątowne nadwozi) oraz po jednym stopniu swobody dla absorbera energii i wspornika tylnego urządzenia zabezpieczającego (RUPD). Pominęto masy nieresorowane.

W modelu zamodelowano tylne urządzenie zabezpieczające (RUPD), które spełnia wymagania normatywne obowiązujące na rynku europejskim w zakresie wytrzymałości, wymiarów i umiejscowienia w pojeździe. Kluczowym elementem modelu jest odwzorowanie deformacji struktur pojazdów i absorberów. Wykorzystano charakterystyki sprężysto-tłumiące wyznaczone podczas badań eksperymentalnych. Charakterystyka deformacji przedniej części samochodu osobowego została aproksymowana wielomianem 5. stopnia, a wspornika RUPD wielomianem 3. stopnia. Wyniki badań eksperymentalnych absorberów, opisane w rozdziale 8, posłużyły do opracowania "map absorberów" - charakterystyk siły w funkcji deformacji i prędkości (wielomianem 5. stopnia dwóch zmiennych). Przedstawiono je w podrozdziale 10.2 w postaci map trójwymiarowych na wykresach siatkowych.

Model umożliwia symulację zarówno zderzeń centralnych, jak i zderzeń offsetowych. W badaniach symulacyjnych zderzenia offsetowego w modelu płaskim symulowano uderzenie, uwzględniając udział tylko jednego absorbera. Zakres początkowej prędkości uderzenia w symulacjach określono na podstawie analizy granicznych prędkości skutecznego działania RUPD.

Model przeszedł częściową weryfikację eksperymentalną dla swoich kluczowych elementów: nadwozia samochodu osobowego, RUPD oraz absorberów. Dane do weryfikacji nadwozia pozyskano z wcześniejszych badań eksperymentalnych przeprowadzonych w Łukasiewicz – PIMOT, natomiast dane dla RUPD i absorberów pochodziły z własnych badań eksperymentalnych Autora.

W podrozdziale 10.2 opisano badania symulacyjne zrealizowane w celu oceny wpływu właściwości konstrukcyjno-materiałowych RUPD (z absorberem) na poziom obciążeń działających na uderzający samochód osobowy. Symulacje przeprowadzono dla zderzeń centralnych (rozd. 10.2.1) i offsetowych (rozd. 10.2.2). Założono, że samochód osobowy (o masie 1100 lub 1500 kg) porusza się z określoną prędkością (8,9 lub 11,1 m/s), natomiast pojazd ciężarowy (o masie 15 lub 40 ton) jest nieruchomy. Zakładano różne warianty co do hamowania obu samochodów, ale wyniki badań wykazały, że w przypadku rozpatrywanego typu zderzenia, stan układu hamulcowego, nie ma to wpływu na otrzymywane wyniki. W dalszych badaniach przyjęto wariant hamowania kół samochodu ciężarowego i niehamowania osobowego.

Wyniki badań symulacyjnych zderzeń centralnych i offsetowych zostały szczegółowo zaprezentowane w licznych tabelach (od 10.5 do 10.25) oraz na wykresach (od rys. 10.10 do 10.24), ilustrujących przebiegi sił, opóźnień, deformacji i energii.

Symulacje zderzeń centralnych potwierdziły, że wszystkie cztery badane absorbery potrafią rozpraszać 30 – 51% energii zderzenia i obniżać siły działające na samochód osobowy o ok. 30–45 %, lecz żaden nie dominuje we wszystkich scenariuszach. Każdy absorber wykazał ograniczanie skutków kolizji, lecz jego efektywność zależy od warunków zderzenia. Wykazano, że prototypowy absorber ROD_02 wykorzystujący opór skrawania materiału rokuje najlepiej po dalszej optymalizacji. W badaniach offsetowych, w których uwzględniano udział tylko jednego absorbera, jego zastosowanie pozwalało na zmniejszenie obciążeń o 26% do 48%.

W wyniku przeprowadzonych badań Autor stwierdził, że niezależnie od rodzaju zderzenia (centralne czy offsetowe) i zastosowanego absorbera, jego wpływ na obciążenia dynamiczne działające na samochód osobowy jest wyraźnie widoczny. Ich zastosowanie prowadzi do zmniejszenia maksymalnych opóźnień środka masy samochodu osobowego, a w konsekwencji zmniejszenia maksymalnych wartości sił bezwładności działających na ten pojazd. Prowadzi to też do zmniejszenia procentowego udziału konstrukcji samochodu osobowego w procesie pochłaniania energii uderzenia co przejawia się zwiększeniem deformacji RUPD (głównie dodatkowych elementów absorbujących energię) przy jednoczesnym ograniczeniu deformacji przodu samochodu osobowego. Stwierdzono także zmniejszenie udziału wsporników RUPD w pochłanianiu energii (o około 30 do 50%), co jest kluczowe dla nadrzędnej funkcji RUPD, czyli powstrzymania samochodu przed wjechaniem pod pojazd ciężarowy.

W przeprowadzonych badaniach wykazano, że charakterystyka absorbera (sztywność) ma zasadnicze znaczenie dla jego skuteczności. Dla niższych poziomów energii uderzenia (mniejsza prędkość lub lżejszy samochód), absorbery o mniejszej sztywności wykazują lepsze właściwości (niższe opóźnienia/siły, mniejszy udział samochodu w pochłanianiu energii). Przy wyższych wartościach obciążeń (większa prędkość lub cięższy samochód), absorbery o większej sztywności skuteczniej pochłaniają energię kinetyczną. Sugeruje to zasadność rozważenia rozwiązań modułowych (segmentowych) o stopniowanej sztywności.

Badania symulacyjne wykazały, że dodanie absorberów do RUPD jest skuteczną metodą poprawy bezpieczeństwa pasażerów samochodu osobowego w obu typach zderzeń, znacząco redukując obciążenia i ograniczając deformację samochodu. Symulacje pozwoliły ilościowo ocenić ten pozytywny wpływ dla scenariuszy centralnych i offsetowych, choć specyfika modelu uniemożliwiała bezpośrednie porównanie absolutnych wartości obciążeń między tymi dwoma typami zderzeń.

ROZDZIAŁ 11 – Podsumowanie

W rozdziale 11 podsumowano zrealizowane prace badawcze (rozdział 11.1) opisując najważniejsze wyniki opisane w poszczególnych rozdziałach.

W rozdziale 11.2 opisano rezultaty prowadzonych prac badawczych. zestawiono główne osiągnięcia pracy:

- opracowanie i wykonanie absorbera energii (zgłoszenie patentowe nr. P.448121),
- uzyskanie w badaniach eksperymentalnych quasi-statycznych i dynamicznych charakterystyk wytrzymałościowych wytypowanych struktur i materiałów pochłaniających energię uderzenia,
- uzyskanie wyników badań symulacyjnych uwzględniające różne masy zderzanych pojazdów oraz różne prędkości uderzenia z zastosowaniem różnych konstrukcji absorberów i wskazanie na zasadność wprowadzenia absorberów w konstrukcji RUPD,
- opracowanie i wykonanie stanowiska do quasi-statycznych badań wytrzymałościowych,
- opracowanie modelu matematycznego zderzenia samochodu osobowego z pojazdem ciężarowym, w którym samochód osobowy uderza czołowo (centralnie lub offsetowo) w tył pojazdu ciężarowego.

W podrozdziale 11.3 Doktorant zawarł najważniejsze wnioski z prowadzonych prac badawczych - możliwość zmniejszenia obciążeń pasażerów o ok. 24 %, dwukrotne obniżenie opóźnień w zderzeniach centralnych i o 33 % w offsetowych, rekomendacje materiałów (plastry miodu, absorber ROD).

W podrozdziale 11.4 Doktorant przedstawił proponowane kierunki dalszych badań (optymalizacja geometrii i nowych struktur energochłonnych).

Podsumowując, można stwierdzić, że Autor rozprawy wykazał, że możliwe jest zastosowanie w pojeździe ciężarowym RUPD, które będzie absorbować energię uderzenia, a zarazem będzie spełniało wymagania normatywne i będzie relatywnie niedrogie i łatwe w produkcji.

2. OCENA SPEŁNIENIA WYMOGÓW STAWIANYCH PRACY DOKTORSKIEJ W USTAWIE PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE

2.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (Art.187 pkt.1)

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła POSUNIAKA jest wieloaspektowa ale zasadniczo osadzona w inżynierii mechanicznej. Demonstruje ona posiadaną przez doktoranta wiedzę teoretyczną w takich obszarach z zakresu tej dyscypliny, jak:

1. **Mechanika pojazdów i dynamika zderzeń:** Praca koncentruje się na analizie skutków zderzenia samochodu osobowego z pojazdem ciężarowym. Obejmuje to rozumienie przez Doktoranta dynamiki ruchu pojazdów podczas kolizji, metod rozpraszania energii kinetycznej, oraz obciążeń działających na konstrukcje i pasażerów.
2. **Mechanika materiałów i konstrukcji:** Kluczowym elementem pracy jest badanie i analiza właściwości materiałów i struktur absorbujących energię zderzenia (absorberów). Wymaga to wiedzy na temat zachowania materiałów pod obciążeniem (w tym deformacji sprężystych i plastycznych), charakterystyk wytrzymałościowych, oraz metod ich badania (quasi-statyczne, dynamiczne). Analizowane są różne typy materiałów i struktur, np. plaster miodu czy pianki aluminiowe.
3. **Modelowanie matematyczne i symulacje numeryczne:** Rozprawa w znacznym stopniu opiera się na opracowaniu i wykorzystaniu przez Doktoranta modelu matematycznego zderzenia samochodu osobowego z ciężarowym. Model ten jest modelem płaskim o 8 stopniach swobody, uwzględniającym ruch postępowy i drgania kątowe oraz pionowe. Modelowanie deformacji struktur pojazdów i absorberów za pomocą charakterystyk sprężysto-tłumiących i aproksymacja tych charakterystyk wielomianami świadczą o teoretycznej wiedzy z zakresu dynamiki układów mechanicznych, numerycznego modelowania i identyfikacji parametrów.
4. **Metodyka badań eksperymentalnych i analiza danych:** Praca obejmuje opracowanie metodyki badań eksperymentalnych (quasi-statycznych, zderzeniowych), zaprojektowanie i budowę stanowiska badawczego, oraz obróbkę i analizę zarejestrowanych danych (m.in. filtrację przyspieszeń, metodę kinematograficzną wyznaczania deformacji). Wykorzystanie wskaźników opisujących zdolność konstrukcji do pochłaniania energii i przebiegu sił podczas zgniotu (EA, MCF, PCF) i analiza wyników symulacji (opóźnienia, siły, deformacje, pochłonięta energia) wymagało solidnej wiedzy z zakresu statystyki, analizy sygnałów i metod eksperymentalnych w mechanice.
5. **Wiedza o przepisach i normach:** Rozprawa analizuje wymagania normatywne i prawne dotyczące tylnych urządzeń zabezpieczających (RUPD) w różnych regionach świata. Doktorant swobodnie porównuje wymagania europejskie, amerykańskie, kanadyjskie i chińskie oraz omawia ich wpływ na projekt RUPD, wskazując luki w zakresie energochłonności.

Wnioski końcowe rozprawy jasno wskazują, że praca umożliwiła sformułowanie wniosków na podstawie badań literaturowych, eksperymentalnych oraz modelowych, co potwierdza interdyscyplinarny charakter badań, łączący aspekty teoretyczne (modelowanie, analiza zjawisk fizycznych, analiza przepisów) i praktyczne (projektowanie, budowa stanowiska, badania eksperymentalne). Kluczowy problem – doskonalenie tylnego urządzenia zabezpieczającego pojazdu ciężarowego (RUPD) – mieści się w inżynierii motoryzacyjnej, a więc w obrębie dyscypliny inżynieria mechaniczna. Kandydat pokazał jednak, że skuteczne rozwiązanie zagadnienia wymaga szerokiego spojrzenia: od mechaniki zderzeń i projektowania konstrukcji, przez wytrzymałość materiałów, po metody eksperymentalne i obliczeniowe w zakresie zderzeń pojazdów.

Podsumowując, zakres i metodyka prac opisane w rozprawie (analiza norm, projektowanie i budowa stanowiska, badania struktur i materiałów, rozwój i weryfikacja modelu matematycznego, symulacje numeryczne) silnie wskazują na to, że Doktorant wykazał się szeroką i pogłębioną wiedzą teoretyczną z zakresu inżynierii mechanicznej, niezbędną do prowadzenia zaawansowanych prac badawczych w obszarze bezpieczeństwa pojazdów i dynamiki zderzeń.

2.2. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (Art.187 pkt.1)

Analiza zasadniczych części rozprawy – głównie rozdziałów 6–10 (ok. 65 % objętości, 120 stron) – pozwala stwierdzić, że Autor wykazał wysoki poziom samodzielności badawczej. Świadczą o tym następujące argumenty:

1. **Samodzielną identyfikacją i uściśleniem problemu:** Autor wyraźnie zdefiniował lukę techniczną: brak energochłonnych kryteriów w europejskich wymaganiach dla RUPD. Z tego wyprowadził jasno sformułowany cel – opracowanie i walidację urządzenia z absorberem ograniczającym przeciążenia samochodu osobowego.
2. **Projekt i wdrożenie autorskiej infrastruktury badawczej:** W rozdziale 7 mgr inż. Paweł Posuniak przedstawił zaprojektowane od podstaw oraz, we współpracy z Łukasiewicz-PIMOT, uruchomione stanowisko

badan quasi-statycznych zgodne z regulaminem ONZ 58. Dobór podzespołów i procedur testu potwierdza zdolność do samodzielnego planowania zaplecza badań eksperymentalnych.

3. **Kompleksowy program eksperymentów:** Rozdział 8 dokumentuje przeprowadzenie samodzielnie zaplanowanych kilkudziesięciu prób quasi-statycznych i dynamicznych sześciu rodzin absorberów, z pełną obróbką sygnałów i wykorzystaniem wskaźników EA, MCF, PCF. Autor sam opracował algorytmy przetwarzania danych, a wyniki poddał krytycznej analizie porównawczej.
4. **Autorski model numeryczny i walidacja:** W rozdziale 10 Doktorant mgr inż. Paweł Posuniak przedstawił własny płaski model zderzenia pojazd – naczepa. Autor zidentyfikował charakterystyki zgniotu na podstawie pomiarów, zaimplementował je w modelu i przeprowadził symulacje zderzeń centralnych i offsetowych oraz zweryfikował je doświadczalnie (odchyłka piku opóźnienia $\leq 6\%$).
5. **Opracowanie prototypu i ocena wdrożeniowa:** Rozdział 9 prezentuje zaprojektowany przez Doktoranta prototyp absorbera wykorzystującego opór skrawania. Autor wykonał jego serię badawczą, oszacował sprawność na 87–90 % przy niskich prędkościach i określił ścieżki odchudzenia konstrukcji.
6. **Świadomość normatywna i przemysłowa:** W rozdziale 2 Doktorant przeprowadził szczegółową analizę wymagań normatywnych w 4 obszarach geograficznych (EU, USA, Kanada, Chiny) i wskazał, jakie zmiany konstrukcyjne są konieczne, by nowy RUPD mógł przejść homologację na różnych rynkach.
7. **Łączenie nauki z praktyką:** Rozprawa powstała w formule doktoratu wdrożeniowego; Autor koordynował badania z partnerem przemysłowym, czego efektem jest gotowe do certyfikacji stanowisko oraz prototyp absorbera zdolnego do produkcji bez kosztownych technologii specjalnych.

Podsumowując – Autor rozprawy – Doktorant mgr inż. Paweł Posuniak wykazał się pełną samodzielnością w planowaniu, realizacji i interpretacji badań teoretycznych i doświadczalnych, integrując wiedzę z mechaniki, materiałoznawstwa i norm motoryzacyjnych. Rezultaty mają bezpośrednią użyteczność przemysłową (wdrożenie w Łukasiewicz-PIMOT), co potwierdza spełnienie wymogu art. 187 pkt 1 dotyczącego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

2.3. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego, zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej (Art.187 pkt.2)

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie można ocenić na podstawie przedstawionej w niej analizy stanu wiedzy oraz wyraźnie zdefiniowanych celów badawczych i wynikających z nich własnych prac, które Autor wskazuje jako oryginalne osiągnięcia.

Autor rozprawy osadził swoje badania w kontekście dotychczasowych osiągnięć i braków w dziedzinie bezpieczeństwa biernego pojazdów ciężarowych, w szczególności w zakresie tylnych urządzeń zabezpieczających (RUPD). Przeprowadzona analiza dokumentów normatywnych z różnych regionów świata (rozdział 2) oraz przegląd istniejących rozwiązań konstrukcyjnych RUPD (rozdział 3) i baz patentowych (rozdział 4) pozwoliły na określenie obszarów niedostatecznie rozpoznanych, a zarazem perspektywicznych, co stanowiło punkt wyjścia do sformułowania celu rozprawy. Z analizy tej wynika, że w myśl obecnych wymagań normatywnych (np. na rynku europejskim), podstawowym badaniem RUPD jest test wytrzymałościowy, a głównym celem jest uniemożliwienie wjechania samochodu osobowego pod tył pojazdu ciężarowego. Aspekt pochłaniania energii kinetycznej uderzającego samochodu osobowego jest często pomijany, mimo że niektóre rozwiązania konstrukcyjne uwzględniały elementy pochłaniające energię. Tylko jedno z opisanych w literaturze rozwiązań pochłaniających energię zostało skutecznie wdrożone do użytku. Autor stwierdził również, że żadne z opatentowanych w Polsce rozwiązań nie było technicznie zbliżone do koncepcji stanowiącej przedmiot jego własnych prac.

Na tej podstawie, cel naukowy rozprawy został jasno określony jako analiza wpływu zastosowania absorberów na zmniejszenie obciążeń działających na samochód osobowy uderzający w tył pojazdu ciężarowego. Cel praktyczny to wskazanie konstrukcji, struktury i materiałów absorbera, które pozwolą na ograniczenie skutków zderzenia przy jednoczesnym spełnieniu wymagań normatywnych. Realizacja tych celów wymagała przeprowadzenia własnych, oryginalnych badań.

Autor w rozdziale 11 (Podsumowanie) wymienił swoje najważniejsze oryginalne osiągnięcia i są to:

1. **Opracowanie i wykonanie absorbera energii** (zgłoszenie patentowe nr P.448121) zawierającego korpus z elementem tnącym i wałek absorbera podlegający skrawaniu. Jest to prototypowe rozwiązanie wymagające optymalizacji. Potencjał komercjalizacyjny tego rozwiązania jest znaczący ze względu na korzystne właściwości funkcjonalne i łatwość produkcji takiego absorbera – rozwiązanie to może znaleźć zastosowanie u producentów przyczep i pojazdów ciężarowych dążących do zwiększenia bezpieczeństwa biernego swoich produktów.

2. **Wyniki badań eksperymentalnych zarówno quasi-statycznych jak i dynamicznych** (zderzeniowych) wytypowanych struktur i materiałów pochłaniających energię uderzenia. Badania te, opisane w rozdziale 8, zostały przeprowadzone na wybranych próbkach, a Autor opracował ich metodykę, przygotował próbki, określił warunki testów i przeprowadził obróbkę danych. Badania te miały na celu określenie dynamicznych właściwości energochłonnych badanych struktur i były niezbędne do wyznaczenia modeli teoretycznych i przeprowadzenia symulacji.
3. **Wyniki badań symulacyjnych** uwzględniające różne masy pojazdów, prędkości uderzenia i różne konstrukcje absorberów, które wskazały na zasadność wprowadzenia absorberów w konstrukcji RUPD. Badania te, opisane w rozdziale 10, były prowadzone z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego i danych z badań eksperymentalnych. Wykazały one, że możliwe jest zmniejszenie obciążeń dynamicznych na pasażerów oraz ograniczenie deformacji przodu samochodu osobowego dzięki absorberom.
4. **Opracowanie i wykonanie stanowiska do quasi-statycznych badań wytrzymałościowych.** Stanowisko to, opisane w rozdziale 7, zostało opracowane przez Autora na potrzeby realizacji prac badawczych, z uwzględnieniem wymagań normatywnych. Zostało wdrożone w Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Motoryzacji i służy do oceny zgodności RUPD z przepisami oraz weryfikacji eksperymentalnej modelu.
5. **Opracowanie modelu matematycznego zderzenia samochodu osobowego z pojazdem ciężarowym, uwzględniającego uderzenie czołowe (centralne lub offsetowe).** Model ten, opisany w rozdziale 10, został opracowany i zweryfikowany na potrzeby badań symulacyjnych. Autor miał kluczowy udział w jego koncepcji, opracowaniu modelu zderzenia offsetowego, modeli fizycznych, przygotowaniu danych, parametryzacji i weryfikacji eksperymentalnej.

Podsumowując, oryginalność rozwiązania problemu naukowego w tej rozprawie polega na kompleksowym podejściu do zagadnienia zwiększenia energochłonności RUPD, co jest obszarem, gdzie pomimo wielu opracowań, brakuje skutecznych wdrożeń. **Autor nie tylko przeanalizował istniejący stan wiedzy i przepisy, ale także opracował własną koncepcję RUPD z absorberem, zaprojektował i zbudował dedykowane stanowisko badawcze, przeprowadził oryginalne badania eksperymentalne na wybranych i nowatorskich strukturach, opracował własny model matematyczny zderzenia oraz wykorzystał go do przeprowadzenia badań symulacyjnych, których wyniki udowodniły skuteczność proponowanego rozwiązania w zakresie zmniejszania obciążeń na pasażerów samochodu osobowego. Kluczowym, wyraźnie wskazanym oryginalnym wkładem jest również opracowanie prototypowej konstrukcji absorbera wykorzystującego skrawanie materiału. Tym samym praca w pełni spełnia wymogi oryginalności w zakresie problematyki naukowej oraz potencjalnych zastosowań gospodarczych.**

2.4 Ocena aspektów formalnych (Art.187 pkt.3 i4)

Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane tego typu pracom w kontekście ustawy, ponieważ ma charakter obszernej pracy pisemnej spełniającej wymagania monografii naukowej (183 s., 11 rozdziałów, bibliografia – 108 pozycji – głównie naukowych) - przedstawia omówione zagadnienie naukowe w sposób oryginalny i twórczy, opatrzona jest aparatem naukowym (bibliografia, opis prac badawczych i interpretacja ich wyników).

Przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia w opinii recenzenta także wymóg dołączenia streszczenia w j.angielskim do pracy napisanej w języku polskim, choć nie jest ono zamieszczone bezpośrednio w tekście rozprawy przekazanej do recenzji. Zostało przekazane ono w dwóch osobnych plikach – w języku polskim i angielskim. W efekcie streszczenie w obecnej formie rozprawy nie jest integralnym elementem tekstu rozprawy przekazanej do recenzji (nie ma go m.in. w spisie treści).

Uwzględniając powyższe podsumować można, że zarówno wymogi odnośnie do formy pracy jak i zawartości streszczenia rozprawy w języku angielskim są spełnione.

3. UWAGI MERYTORYCZNE DOTYCZĄCE TREŚCI ROZPRAWY

Uwagi do rozdziału 2

1. Rozprawa przedstawia szczegółowy zakres technicznych wymagań, ale nie umożliwia samodzielnego ustalenia, od kiedy obowiązują one producentów; czytelnik musi sięgnąć do dokumentów źródłowych. Jeśli praca ma służyć również jako drogowskaz dla praktyków homologacji, warto byłoby dodać tabelę chronologiczną z datami implementacji oraz zaznaczyć różnice pomiędzy terminami dla „nowych typów” i „wszystkich nowych pojazdów”. Taka poprawka uczyniłaby część normatywną pełniejszą i łatwiejszą w użyciu dla inżynierów wdrożeniowych.

Uwagi do rozdziału 3

1. Przedstawiona analiza rozwiązań konstrukcyjnych RUPD ma wadę w postaci niemożności stwierdzenia stanu ich obecności rynkowej. Wiele z rozwiązań jest przedstawianych jako koncepcje co do których nie wiadomo, czy zostały wdrożone (Autor dopiero w Podsumowaniu na str. 153 napisał, że tylko jedno z opisanych rozwiązań zostało skutecznie wdrożone do użytku – które konkretnie?). To utrudnia czytelnikowi ocenę wagi i aktualności podejmowanego problemu badawczego.
2. Brakuje krótkiego, odrębnego podrozdziału zamykającego rozdział 3 i porządkującego w jednym miejscu najważniejsze liczby (różnice w energii, opóźnieniach, deformacjach) oraz jasnego odniesienia do dalszych kroków badawczych. W efekcie wnioski są „rozsiane” i trzeba ich szukać między opisami poszczególnych konstrukcji a późniejszymi rozdziałami.

Uwagi do rozdziału 4

1. W rozdziale 4 przegląd rozwiązań opisanych w patentach i zgłoszeniach patentowych mógłby być zakończony lub umotywowany syntezą wynikającej z nich wiedzy na temat rozwiązań pochłaniania energii zderzenia przez tylne urządzenia zabezpieczające, np. wg:
 - a. Zasady działania/mechanizmu pochłaniania energii: deformacja plastyczna, wykorzystanie poduszek gazowych,
 - b. Rodzaju zastosowanych materiałów/struktur: aluminiowe struktury – rury, pianki, „plaster miodu”, stalowe struktury, pianki metaliczne (aluminiowe), struktury cienkościenne, kompozytowe;
 - c. Lokalizacji absorbera w RUPD: elementy dodatkowe pochłaniające energię, elementy pochłaniające we wspornikach lub belce, w skośnym wsporniku, itd.W chwili obecnej motywacją do przedstawienia tych rozwiązań jest stwierdzenie „Najciekawsze z wylistowanych powyżej rozwiązań zostały dokładnie scharakteryzowane”.

Uwagi do rozdziału 5

1. W rozdziale 5 opisano nie tylko cele i zakres rozprawy ale też dalsze etapy pracy - wydaje się to być raczej bardziej wskazane do umieszczenia w streszczeniu pracy.

Uwagi do rozdziału 6

1. Nie jest jasno wyjaśnione skąd jest scenariusz 3 prowadzonej analizy: Uderzenie pojazdem o masie 1 500 kg z prędkością 11,1 m/s. Scenariusze 1 i 2 odniesiono do norm a 3 nie wyjaśniono.

Uwagi do rozdziału 7

1. Opis stanowiska do badań wytrzymałościowych nie jest do końca przejrzysty i mógłby być bardziej czytelny, gdyby Autor jednoznacznie wyodrębnił i opisał istotne kwestie takie jak: przeznaczenie – badania quasi-statyczne, sposób montażu badanego obiektu, sposób przyłożenia siły, zakres i sposób aplikacji obciążenia, sposób pomiaru obciążenia i odkształcenia, sposób rejestracji i analizy danych.

Uwagi do rozdziału 8

1. Ciekawym byłoby porównanie przebiegów sił na rysunku 8.5 z przebiegami dla badań quasi-statycznych na tym samym wykresie. Pozwoliłoby to jakościowo i ilościowo zilustrować dosyć nieprecyzyjne stwierdzenie z opisu wyników „...wartości sił są zbieżne w pewnym zakresie z wartościami badań quasi-statycznych”.

Uwagi do rozdziału 9

1. Na jakiej podstawie dobrano średnice wałka i pierścienia skrawającego? Czy były to tylko badania eksperymentalne arbitralnie dobranych parametrów czy jakieś podstawy teoretyczne - obliczenia siły skrawania na podstawie oporu właściwego skrawania i wymiarów wióra?

Uwagi do rozdziału 11.

1. W rozdziale 11 Autor co prawda odniósł się do celów rozprawy z rozdziału 5 i przedstawił rezultaty i wnioski, które świadczą o ich realizacji to mógł to zrobić w bardziej formalnej strukturze przytaczając cel i wskazując konkretne rezultaty które potwierdziły jego osiągnięcie. Taka forma byłaby bardziej czytelna z formalnego punktu widzenia.

4. UWAGI DOTYCZĄCE FORMY ROZPRAWY

1. Str. 64. Na Rys. 7.1. *Wizualizacje przedstawiające koncepcje stanowiska wytrzymałościowego* zabrakło podpisania rysunków a), b) i c).
2. Str. 67. Brak wyjaśnienia rysunków a), b) i c) lub chociaż informacji o wyjaśnieniu w tekście na „Rys. 8.1. Wyidealizowane krzywe naprężenia (σ) w funkcji odkształcenia materiałów (ϵ)”.
3. Błąd literowy – Str. 104: „...by móc przeprowadzić zaplanowany program badań z wykorzystaniem **tych samach** elementów obudowy...”
4. Str 136 - „...przy prędkości 8,9 m/s odnotowano niemal najwyższą wartość **pochłania** energii...” – powinno być „**pochłaniania** energii...”
5. Brak integralnie zamieszczonego streszczenia po polsku i angielsku w tekście rozprawy, tym samym także w spisie treści. Brak ten jest uzupełniony dołączonym oddzielnie streszczeniem w j. polskim i angielskim.

5. PODSUMOWANIE KOŃCOWE I WNIOSK RECENZENTA

Dokładna analiza rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła POSUNIAKA „ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA SKUTKÓW UDERZENIA SAMOCHODU OSOBOWEGO W TYLNE URZĄDZENIE ZABEZPIECZAJĄCE POJAZDU CIĘŻAROWEGO” pozwala stwierdzić, iż **stanowi ona wartościowy naukowo, oryginalny wkład w rozwój konstrukcji oraz metod badań eksperymentalnych i symulacyjnych tylnych urządzeń zabezpieczających z elementami pochłaniającymi energię (ang. Energy Absorbing Rear Underride Protection Device - EARUPD)**. Potwierdzają to także recenzowane publikacje w czasopiśmie Sensors ([29] w spisie literatury), Energies ([77] w spisie literatury) czy też w IOP Conference Series: Materials Science and Engineering czy Wiedza i innowacje wiWAT 2021.

Zawarte w pkt. 3 recenzji uwagi merytoryczne do treści rozprawy nie mają charakteru podważającego uzyskane wyniki – są prośbą o dodatkowe wyjaśnienia, lepsze zredagowanie przedstawianych informacji lub skorygowanie drobnych niejasności. Uwagi co do formy zawarte w pkt 4 recenzji, są drobne i nie obniżają wysokiej jakości redakcyjnej rozprawy.

Podsumowując, to co zostało szczegółowo wykazane w pkt. 2 niniejszej recenzji, rozprawa mgr inż. Pawła POSUNIAKA pt. „ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA SKUTKÓW UDERZENIA SAMOCHODU OSOBOWEGO W TYLNE URZĄDZENIE ZABEZPIECZAJĄCE POJAZDU CIĘŻAROWEGO” spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm. – art. 187), tj.:

- **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** - wykazał się on szeroką i pogłębioną wiedzą teoretyczną z zakresu inżynierii mechanicznej, niezbędną do prowadzenia zaawansowanych prac badawczych w obszarze bezpieczeństwa biernego pojazdów i kształtowania charakterystyk urządzeń zabezpieczających; wykazał się też pełną samodzielnością w planowaniu, realizacji i interpretacji badań teoretycznych i doświadczalnych, integrując wiedzę z mechaniki, materiałoznawstwa i norm motoryzacyjnych a wyniki prac badawczych mają bezpośrednią użyteczność przemysłową (wdrożenie w Łukasiewicz-PIMOT),
- **przedmiot rozprawy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** w postaci opracowania własnej koncepcji RUPD z absorberem wykorzystującym skrawanie materiału, spełniającego wymagania normatywne oraz funkcjonalne wraz z ich weryfikacją eksperymentalną, zaprojektowaniem i zbudowaniem dedykowanego stanowiska badawczego oraz przeprowadzenia oryginalnych badań eksperymentalnych a także opracowania własnego modelu matematycznego zderzenia i przeprowadzeniu badań symulacyjnych, których wyniki udowodniły skuteczność proponowanego rozwiązania w zakresie zmniejszania obciążeń na pasażerów samochodu osobowego.
- **rozprawa ma charakter obszernej pracy pisemnej spełniającej wymagania monografii naukowej** (183 s., 11 rozdziałów) - przedstawia omówione zagadnienie naukowe w sposób oryginalny i twórczy, opatrzona jest aparatem naukowym (bibliografia, opis prac badawczych i interpretacja ich wyników),
- **przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymóg dołączenia streszczenia w j. angielskim do pracy napisanej w języku polskim**, choć nie jest ono w postaci rozprawy przekazanej do recenzji integralnym elementem tekstu rozprawy (nie ma go w spisie treści ani w pliku rozprawy – dołączono je w dwóch osobnych plikach).

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Pawła POSUNIAKA do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, rekomendując nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła POSUNIAKA „ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA SKUTKÓW UDERZENIA SAMOCHODU OSOBOWEGO W TYLNE URZĄDZENIE ZABEZPIECZAJĄCE POJAZDU CIĘŻAROWEGO” uzasadniając to następującymi argumentami:

- dużą wartością naukową wynikającą głównie z kompleksowości podejścia do zagadnienia projektowania tylnego urządzenia zabezpieczającego od rozpoznania zagadnienia, jego uwarunkowań prawnych, istniejących rozwiązań poprzez badania quasi-statyczne i dynamiczne różnych wariantów absorberów i wyznaczenie ich charakterystyk deformacji po ocenę symulacyjną ich wpływu na poziom obciążeń pojazdu osobowego,
- oryginalność zaproponowanego własnego absorbera dla którego Doktorant dokonał zgłoszenia patentowego (P.448121) dla którego Doktorant wykonał badania potwierdzające jego skuteczność a jednocześnie możliwość dalszej optymalizacji.
- duże praktyczne znaczenie zrealizowanych prac związane z wykazaniem, że możliwe jest zastosowanie w pojeździe ciężarowym tylnego urządzenia zabezpieczającego (RUPD), które będzie absorbować energię uderzenia, a zarazem będzie spełniało wymagania normatywne i będzie relatywnie niedrogie i łatwe w produkcji jak i z opracowaniem praktycznie wykorzystanych metodyk badawczych oraz stanowisk do prowadzenia badań quasi-statycznych i dynamicznych takich urządzeń.

Poznań, 20.05.2025

dr hab. inż. Grzegorz Ślaski, prof. PP