

Warszawa, 11.11.2024 r.

dr hab. inż. Danuta Miedzińska, prof. uczelni
Wojskowa Akademia Techniczna im. J. Dąbrowskiego
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Przemysława Rumianka**
pt. **„Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych” autorstwa mgr. inż. Przemysława Rumianka. Praca została zrealizowana pod kierunkiem dr. hab. inż. Piotra Żacha, profesora uczelni (promotora) oraz dr. inż. Jarosława Mańkowskiego (promotora pomocniczego) na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.

Recenzja została opracowana na podstawie pisma od Dziekana Wydziału SiMR PW prof. dr. hab. inż. Piotra Przybyłowicza z dnia 23 października 2024 r. z dołączonym egzemplarzem rozprawy zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna PW z dnia 28 czerwca 2023 r.

2. Ocena podjętego tematu pracy

Podjęta w rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Przemysława Rumianka tematyka jest bardzo istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego, w szczególności pieszych narażonych na uszkodzenia kończyn dolnych podczas zderzenia z samochodem. Badania i wyniki zawarte w rozprawie są również ważne pod względem wartości naukowej i poznawczej z zakresu inżynierii mechanicznej, obliczeniowej, ale też inżynierii materiałowej, co świadczy o interdyscyplinarności podjętego zagadnienia.

Recenzowana praca dotyczy badań eksperymentalno-numerycznych energochłonności spienionych polimerów poddanych obciążeniom typu *impact*. Doktorant opracował model numeryczny procesu uderzenia zderzaka samochodowego wypełnionego spienionym polipropylenem (EPP) z impaktorem symulującym kończynę dolną pieszego. Zagadnienie to zostało rozwiązane z uwzględnieniem zmiennej temperatury zewnętrznej podczas zderzenia, co jest rozwiązaniem oryginalnym.

Zwiększenie bezpieczeństwa niechronionych użytkowników ruchu drogowego (w pracy określanych jako NUD - niechroniony użytkownik ruchu drogowego), w tym przede wszystkim pieszych, jest zagadnieniem stale rozpatrywanym przez wiele grup społecznych – producentów pojazdów, logistyków planujących infrastrukturę drogową czy prawodawców. Jest także przedmiotem wielu prac naukowych z wielu dziedzin, jak inżynieria mechaniczna, materiałowa czy biomechanika, a także bezpieczeństwo.

Wg danych Wydziału Ruchu drogowego Komendy Stołecznej Policji (ksp.policja.gov.pl, dostęp 3.10.2024 r.) według wstępnych danych szacunkowych, w okresie styczeń - czerwiec 2024 roku na terenie Polski zaistniało:

- 10092 wypadki drogowe (o 770 więcej niż w 2023 r.), w wyniku których:
- 887 osób poniosło śmierć (więcej o 72),
- 11712 osób doznało obrażeń ciała (więcej o 869).

Tylko na terenie miasta stołecznego Warszawy w pierwszym półroczu 2024 roku na terenie zaistniało 380 wypadków drogowych (o 92 więcej niż w pierwszym półroczu 2023 r.), w wyniku których 11 osób poniosło śmierć (więcej o 2), a 424 osoby doznały obrażeń ciała (więcej o 111). Odnotowano też 12479 kolizji drogowych (o 863 więcej).

Wzrost ten jest niepokojący i wymaga głębokich analiz. Badania podjęte przez Doktoranta opisanego powyżej zagadnienia modelowania zderzaka samochodowego wypełnionego spienionym polipropylenem (EPP) z impaktorem symulującym kończynę dolną pieszego z uwzględnieniem wpływu temperatury i zmiany parametrów wytrzymałościowych na bezpieczeństwo niechronionych użytkowników dróg jest jedną z prób odpowiedzi na rosnące statystyki wypadków drogowych..

3. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska pt. „Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych” mgr. inż. Przemysław Rumianka została ujęta na 189 stronach. Zawiera osiem rozdziałów o treści merytorycznej oraz streszczenie i słowa kluczowe zarówno w języku polskim, jak i angielskim. W końcowej części rozprawy umieszczono wykaz rysunków i tabel.

Pierwszy rozdział pracy jest wstępem do rozważań zawartych w rozprawie. Zostały w nim zawarte informacje dotyczące bezpieczeństwa i przepisów dla niechronionych użytkowników dróg, a także sposobów oceny bezpieczeństwa pieszych oraz urządzeń służących do oceny obrażeń pieszych. Przedstawione zostały statystyki wypadków z udziałem pieszych oraz elementy pojazdów osobowych, które zmniejszają skutki wypadków z ich udziałem, wraz z wstępną charakterystyką materiałów konstrukcyjnych w nich stosowanych.

W rozdziale drugim ujęto przedmiot i cel rozprawy, który powiązano z wnioskami wynikającymi z analiz literaturowych zawartych we wstępie. Doktorant wskazał, że celem dysertacji jest określenie zdolności materiału do rozpraszania energii przez elementy ochrony pieszych. Zaproponował osiągnięcie niniejszego celu na przykładzie absorbera energii wykonanego z EPP, elementu ochronnego zderzaka samochodu osobowego.

Rozdział trzeci zawiera opis materiału konstrukcyjnego użytego w rozważaniach spienionego polipropylenu (EPP), w tym jego charakterystykę użytkową i specyficzne właściwości. Omówiony został jego proces produkcji. Na podstawie przeglądu literatury przeprowadzono i przeanalizowano wyniki własnych badań eksperymentalnych materiałów EPP przy zastosowaniu mikroskopii skaningowej, spektrometrii FTIR i kalorymetrii różnicowej DSC określono specyficzną budowę mikrostrukturalną tych pian. Opisano również autorskie wyniki mechanicznych badań statycznych, w szczególności próby ściskania pianek EPP o gęstości w zakresie 20- 200 [g/dm³] oraz dla różnych wartości temperatury otoczenia w zakresie $-30^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$, a także badań dynamicznych przeprowadzonych w celu oceny wpływu prędkości odkształcenia na możliwości absorbowania energii przez EPP.

W rozdziale czwartym przedstawiono wybrane analityczne modele materiałowe, stosowane w metodzie elementów skończonych, które uwzględniają specyficzne nieliniowe właściwości mechaniczne materiału EPP. Doktorant przedstawił również sposób kalibracji modeli numerycznych z użyciem wyników badań eksperymentalnych.

Kolejnym etapem pracy ujętym w rozdziale piątym było przeprowadzenie walidacji procesu modelowania materiałów spienionych EPP. Doktorant opisał sposób odwzorowania wyników badań doświadczalnych w środowisku obliczeniowym wykorzystującym metodę elementów skończonych (MES). Porównane zostały wyniki badań doświadczalnych i symulacyjnych, co pozwoliło na walidację poprawności wybranego modelu konstytutywnego dla EPP.

Rozdział szósty stanowi opis niezwykle istotnych z punktu widzenia aplikacyjności i poznania właściwości energochłonnych badań numerycznych elementu ochrony pieszego (absorbera energii) w czasie zderzenia z impaktorem odzwierciedlającym kończynę dolną pieszego – uczestnika wypadku drogowego. Badania nad bezpieczeństwem NUD i ocenę skuteczności działania absorbera przeprowadzono w oparciu o wytyczne stosowane w odpowiednich regulacjach i normach.

W rozdziale siódmym zostały zawarte logiczne wnioski i podsumowanie przeprowadzonych badań.

Rozprawę zakończono rozdziałem ósmym, w którym wskazano kierunki rozwoju dalszych badań i możliwościami praktycznego wykorzystania przeprowadzonych w rozprawie badań.

W końcowej części rozprawy zamieszczono wykaz przytoczonej w tekście literatury. Zawiera on 169 pozycje bibliograficzne, aktualne i bezpośrednio związane z tematyką pracy, w tym artykuły naukowe, dokumenty prawne, zarówno w języku polskim, jak i angielskim.

Podsumowując, należy stwierdzić, iż przyjęty układ pracy jest prawidłowy, przejrzysty i czytelny, co sprawia, iż dysertacja tworzy spójną i logiczną całość. Praca jest napisana przystępnym językiem, a przyjęta terminologia jest właściwa.

4. Ocena merytoryczna pracy

Przyjęte w recenzowanej rozprawie doktorskiej metody badawcze są prawidłowe w odniesieniu do rozpatrywanej problematyki, jaką stanowią badania i analizy bezpieczeństwa niechronionych uczestników ruchu drogowego, w szczególności pieszych. Do rozwiązania zadania badawczego Doktorant zaproponował prawidłowo sprzężoną metodę numeryczno - eksperymentalną. W symulacjach komputerowych do badania materiału EPP i jego energochłonności w trakcie zderzenia z kończyną dolną NUD wykorzystano metodę elementów skończonych. Dla określenia właściwości materiałowych EPP i walidacji modelu użyto zaawansowanych metod eksperymentalnych.

W przedstawionych badaniach wykorzystany został komercyjny solver obliczeniowy MES – Abaqus, moduł obliczeń Standard i Explicit. Do badań wytrzymałościowych natomiast został wykorzystany zaawansowany sprzęt laboratoryjny, w tym mikroskop elektronowy Phenom G2, spektrometr FTIR, Kalorymetr różnicowy DSC (badania przeprowadzono na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej), maszyna wytrzymałościowa Q-test 10 Material Testing System, dzielony pręt Hopkinsona (badania przeprowadzono na Wydziale Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej) oraz młot spadowy Zwick/Roell Amsler HIT200F.

Cel i teza rozprawy zostały określone prawidłowo. Teza, jaką postawił Doktorant brzmi **„Zastosowanie w pojazdach samochodowych absorberów i dyssypatorów energii wytworzonych z polimerowych struktur spienionych umożliwi ograniczenie następstw wypadków, zmniejszenie obrażeń oraz poprawę bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg”**. Słuszność tezy została poparta szerokim przeglądem literatury, zarówno w zakresie konstrukcji pojazdów (w szczególności elementów pojazdów osobowych zmniejszających skutki wypadków z udziałem pieszych), metod badań uderzenia NUD w pojazd (ze szczególnym uwzględnieniem metod symulacyjnych i modelowych, wykorzystujących impaktory wybranych fragmentów ciała pieszego), jak również statystyk dotyczących śmiertelności pieszych w wypadkach drogowych oraz obowiązującego prawodawstwa dotyczącego ochrony NUD i jego zmian na przestrzeni lat.

Rozważania dotyczące przeprowadzonych w ramach rozwiązania zadania badawczego badań są przedstawione w sposób przejrzysty i czytelny, przystępnym językiem z prawidłowo użytą terminologią badawczą oraz słownictwem z zakresu inżynierii mechanicznej. Przeprowadzony wywód jest logiczny.

Po dokonaniu przeglądu literatury, Doktorant rozpoczyna opis badań identyfikacyjnych struktury wewnętrznej EPP. Budowę struktury EPP określono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom G2 SEM (z ang. Scanning Electron Microscope). Badania przeprowadzono na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej. Identyfikację materiału oraz wpływ temperatury na strukturę materiału przeprowadzono na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej. Dokonano również identyfikacji rozmiaru poszczególnych komórek. Stwierdzono również, że badany materiał w badanym zakresie wartości temperatury od -30°C do 120°C nie ulega przemianom termicznym, jak krystalizacja, topnienie czy krystalizacja.

Kolejne opisane badania dotyczą interesujących i istotnych z punktu widzenia celu rozprawy właściwości mechanicznych EPP w procesie ściskania przy różnych wartościach prędkości odkształcenia. Na wstępie przeprowadzono i przedstawiono wielowariantowe próby statyczne ściskania próbek EPP o różnych wymiarach i gęstościach, a także pobranych z rzeczywistej konstrukcji absorbera zderzaka samochodu Skoda Fabia. Badania wytrzymałości na ściskanie próbek pianki wykonano na maszynie wytrzymałościowej znajdującej się w laboratorium Instytutu Podstaw Budowy Maszyn Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej oraz Wydziale Inżynierii Materiałowej PW. Badanie te pozwoliły na analizę wpływu gęstości i rozmiaru próbki na energochłonność EPP. Analizowano również wpływ temperatury początkowej na właściwości mechaniczne badanego materiału.

Następnym etapem były badania mechaniczne z wykorzystaniem młota opadowego Zwick/Roell Amsler HIT200F i dzielonego pręta Hopkinsona, uzyskując wartość prędkości odkształcenia na poziomie 3,7 m/s, 10,42 m/s, 12.25 m/s. Jednak badania te wdają się wymagać głębszych analiz i weryfikacji na innych stanowiskach badawczych.

Następnie doktorant opisał wybrane modele konstytutywne dla EPP, zbudował i zwalidował model próbki poddanej ściskaniu. Do dalszych prac przedstawionych w niniejszej rozprawie wykorzystywano model Ogdena trzeciego rzędu. Ciekawy jest bardzo model mikrostrukturalny EPP, uwzględniający specyficzną budowę wewnętrzną tego materiału. Dopasowanie modelu materiałowego przeprowadzono również dla badań dynamicznych. Stwierdzono, że wybrane modele materiałowe pozwalają na dokładne odwzorowanie nieliniowego zachowania materiału, uwzględniając jego zachowanie w zależności od gęstości i prędkości odkształcenia.

W dalszej części rozprawy opisano przygotowanie modelu uderzenia dolnej części nogi. Model impaktora dolnej części nogi (Rys. 6.1), złożony z elementów reprezentujących kości piszczelową, udową oraz miękkie tkanki otaczające tj. skóra, mięśnie, został opracowany na podstawie danych literaturowych i przepisów normatywnych. Zamodelowana została również część przednia pojazdu Skoda Fabia dostosowana do wymagań analizy. Następnie przeprowadzono symulacje uderzenia impaktora w przód pojazdu.

Należy zaznaczyć, iż model jest bardzo przydatnym narzędziem do analiz zagadnień bezpieczeństwa NUD, w tym obliczeń HIC. Jest uniwersalny, więc może być stosowany także do innych analiz. Na podstawie otrzymanych wyników symulacyjnych stwierdzono, że struktura EPP zastosowana w absorberze energii rozprasza energię uderzenia, co potwierdza skuteczność konstrukcji w ochronie pieszych. Ponadto rozkład sił impaktora wykazał, że siły

w stawie kolanowym oraz na goleni mieściły się w granicach norm bezpieczeństwa, minimalizując ryzyko złamań.

W końcowej części pracy Doktorant podsumował otrzymane wyniki i wnioski z nich wypływające. Tym samym potwierdzono słuszność sformułowanej tezy, że zastosowanie w pojazdach samochodowych absorberów i dyssypatorów energii wytworzonych z polimerowych struktur spienionych umożliwia ograniczenie następstw wypadków, zmniejszenie obrażeń oraz poprawę bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg.

Podsumowując, recenzowana rozprawa mgr. inż. Przemysława Rumianka pt. „Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych” jest merytorycznie poprawna. Przedstawione wyniki są wiarygodne i stanowią dużą wartość poznawczą. Są też oryginalne.

5. Uwagi szczegółowe

W odniesieniu do przedstawionej w poprzednim punkcie oceny merytorycznej pracy należy wyróżnić główne oryginalne osiągnięcia Doktoranta:

- opracowanie metodyki modelowania struktur ochronnych z wykorzystaniem materiałów typu EPP, wraz z identyfikacją i kalibracją modelu konstytutywnego materiału,
- opracowanie modelu MES uniwersalnego impaktora kończyny dolnej oraz metodyki modelowanie zderzeń z jego użyciem,
- uzyskanie wyników identyfikacyjnych badań wytrzymałościowych EPP, w szczególności w warunkach obciążeń statycznych.

Uwagi ogólne dotyczące rozprawy, które w opinii recenzenta powinny zostać poddane głębszej dyskusji, są następujące:

1. Badania dynamiczne przeprowadzone na pręcie Hopkinsona wydają się być obarczone bardzo wysoką niepewnością i należałoby przeprowadzić porównanie tych wyników z danymi literaturowymi. Wątpliwości budzą uzyskane wyniki – dla badań statycznych obszar plateau na poziomie 1,5 MPa, dla dynamicznych - 0,000005 MPa. W dalszej części Doktorant stwierdza, że materiał umocnił się. Wniosek ten jest niezrozumiały. Przy tak dużej niepewności co do poprawności uzyskanych wyników należałoby przeanalizować metodykę badań, np. rodzaj użytych prętów czy wielkość badanych próbek. Ponadto pojawia się pytanie, czy w kontekście

zakresu pracy – badań zjawisk podczas zderzenia z samochodem osobowym – badania na pręcie Hopkinsona były potrzebne w aspekcie prędkości odkształcenia dla badanego zjawiska.

2. Doktorant nie przedstawił procesu walidacji modelu impaktora oraz nie wskazał, czy modele konstytutywne materiałów impaktora również uwzględniały wpływ prędkości odkształcenia. W opinii recenzenta ten aspekt pracy wymaga komentarza.

3. W pracy przedstawiono wyniki wpływu wymiarów płyt wykonanych z EPP na właściwości wytrzymałościowe materiału. Jednakże nie zamieszczono wyjaśnienia lub choćby wstępnej hipotezy, skąd ta różnica się bierze. Mimo, iż podobne wyniki obserwowane są w literaturze, nie oszacowano, w jaki sposób uzyskane wyniki mają wpływ na badane zjawisko zderzenia, jego lokalny charakter czy na konstrukcję ochronną zderzaka.

4. W pracy opisano badania wpływu temperatury początkowej próbki na właściwości wytrzymałościowe EPP. W opinii recenzenta wskazana byłaby głębsza analiza otrzymanych wyników w aspekcie szybkości chłodzenia próbki w czasie testu oraz wskazania przyczyny zmiany parametrów wytrzymałościowych w kontekście wyników badań wpływu temperatury na strukturę materiału.

Uwagi szczegółowe są następujące:

1. Brak jest w pracy wykazu oznaczeń użytych w pracy (w szczególności zastosowanych w równiach).

2. Dla badań eksperymentalnych nie przedstawiono analiz statystycznych otrzymanych wyników i czy do analiz numerycznych przyjmowano wartości średnie czy maksymalne, czy inne.

3. W pracy pojawiają się nieliczne błędy interpunkcyjne, stylistyczne i ortograficzne.

4. Jak w pracy rozumiane są pojęcia prędkość i szybkość odkształcenia?

5. Na str. 59 pojawia się stwierdzenie, że „Modele Kelvina [109], Shulmeistera [110] czy Robertsa-Garboczi [65], [111] znoszą ograniczenia modelu Gibsona i Ashby-ego”. Na jakiej podstawie Doktorant wysnuł ten wniosek, skoro struktura Kelwina jest wyidealizowana strukturą ortotropową?

6. Rozkłady powierzchni komórki przedstawione na rys. 3.9-3.13 mają różny charakter dla różnych gęstości próbek. Czy w opinii Doktoranta nie powinny one dążyć do rozkładu normalnego i czy próba nie była zbyt mała?

7. Opis budowy strukturalnej EPP jest dość chaotyczny. Pojawiają się takie określenia, jak „kulki” czy „granulki”. W tekście też są rozbieżności przy stwierdzeniach czy EPP charakteryzuje się porowatością otwartą czy zamkniętą (np. na str. 74). Wskazane byłoby usystematyzowanie nomenklatury oraz na przykład umieszczenie schematu wskazującego charakterystyczne elementy budowy wewnętrznej analizowanego materiału.
8. Czy określano eksperymentalnie grubość ścianki komórki EPP i czy na tej podstawie opracowano model strukturalny?
9. Na str. 83-84 przedstawiono definicje takich wielkości, jak naprężenie rzeczywiste czy odkształcenie rzeczywiste i nominalne. Brakuje jednak informacji, które z tych wielkości zostały przedstawione na wykresach przedstawiających wyniki badań wytrzymałościowych.
10. W przedstawionym modelu numerycznym zderzenia impaktora kończyny dolnej z elementem energochłonnym nie przedstawiono warunków brzegowych (np. sposobu przyspieszenia impaktora) oraz parametrów użytych kontaktów. Nie podano również, w jaki sposób uzyskano wykresy dla analiz numerycznych (np. czy wartości siły szczytano z węzłów i z których). Na przedstawionych mapach naprężeń brak jest jednostek.
11. Podano niepełną nazwę Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej (w pracy jest Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej).

6. Końcowa ocena pracy

Rozprawę doktorską mgr. inż. Przemysława Rumianka pt. „Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych” oceniam **wysoko**. Przede wszystkim należy stwierdzić, że zawiera ona istotne **elementy oryginalne**, przy czym uzyskane wyniki stanowią bardzo dużą wartość poznawczą, ale także potencjał **praktyczny i aplikacyjny** w aspekcie poprawy bezpieczeństwa pieszych użytkowników dróg, poznania mechanizmów oddziaływania ciała ludzkiego ze strukturami ochronnymi

i ulepszenia w tym zakresie konstrukcji pojazdów. Doktorant wykazał się wiedzą w zakresie planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych oraz modelowania komputerowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych, w tym stosowania różnych modeli konstytutywnych materiałów. Wykazał również, że posiada umiejętności prowadzenia logicznego wywodu naukowego.

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom promocyjnym na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych (dyscyplina Inżynieria Mechaniczna) w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dn. 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2017, poz. 1789).

Niniejszym stwierdzam, iż Doktorant może zostać dopuszczony do obrony publicznej rozprawy pt. „Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych”.