

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Przemysława Rumianka

pt.:

„Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych”

Podstawę recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 28 czerwca 2023r.

Podwyższenie poziomu bezpieczeństwa niechronionych uczestników dróg jest jednym z priorytetowych problemów w rozwoju motoryzacji. Jednym ze sposobów osiągania tego celu jest stosowanie absorberów pochłaniających energię. Ze względu na zdolność pochłaniania energii, niską masę i łatwość kształtowania na absorbery wykorzystywane są najczęściej tworzywa sztuczne. Jednym z takich tworzyw jest ekstrudowany polipropylen. Zdolność tego materiału do rozpraszania energii oraz identyfikacja jego modelu konstytutywnego niezbędnego do przeprowadzania symulacji numerycznych są istotą recenzowanej dysertacji. Tematyka dysertacji i postawione w niej cele posiadają duże znaczenie aplikacyjne jak również są aktualne.

Przedstawiona do recenzji praca składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, 8 rozdziałów, wykazu bibliografii oraz spisu ilustracji i tabel. Zasadnicza część pracy liczy 189 stron.

Zakres rozprawy



W bardzo rozbudowanym wstępie Autor przedstawił problematykę bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg (NUD) w aspekcie prawnym, statystycznym oraz technicznym. Szczegółowo omówiono metodykę oceny bezpieczeństwa pieszych oraz przedstawiono zastosowanie impaktorów w obligatoryjnych testach elementów bezpieczeństwa biernego oraz wymagania stawiane elementom chroniącym NUD. Przedstawiono elementy pojazdów zwiększające jego poziom. Podstawowym elementem ochrony pieszego przy zderzeniu z samochodem są elementy rozpraszające energię zderzenia. We wstępie uzasadniono potrzebę podjęcia badań, jak i wybór obiektu badań, na który przyjęto element dyssypatora zespołu zderzaka pojazdu wykonany z materiału

polimerowego polipropylenu ekspandowanego EPP. Badania tego materiału stanowią główną część dysertacji.

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania literaturowego sformułowano w rozdziale 2 cel rozprawy, która koncentruje się na badaniu właściwości pochłaniania energii i jej rozpraszania w strukturach z polipropylenu ekspandowanego wykorzystywanych w ochronie pieszych. Stwierdzono brak badań materiału EPP, które uwzględniałyby wpływ prędkości odkształcenia i temperatury w aspekcie zastosowania tego materiału w elementach ochrony NUD oraz brak zweryfikowanych modeli konstytutywnych materiału do aplikacji w symulacjach numerycznych. Przedstawiono hipotezę pracy oraz szczegółowe zadania badawcze niezbędne do jej potwierdzenia.

Charakterystykę badanego polimeru i przeprowadzone jego badania opisano w rozdziale 3 dysertacji. Omówiono technologię wytwarzania polipropylenu ekspandowanego oraz uzyskiwane struktury. Przeprowadzono dyskusję wpływu struktury na własności mechaniczne. Opisano badania struktury wykonane przez Autora za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego oraz badania składu cząsteczkowego za pomocą spektroskopu fourierowskiego w podczerwieni. Przedstawiono także potwierdzenie przedziału eksploatacji cieplnej na podstawie skaningowej kalorymetrii różnicowej. Powyższe badania miały charakter badań wstępnych w stosunku do przedstawionych w dalszych podrozdziałach badań eksperymentalnych własności mechanicznych EPP niezbędnych do wyznaczenia modelu konstytutywnego. Szczegółowo opisano sposób wykonywania próbek i ich geometrię oraz quasistatyczne próby ściskania. Próby zostały przeprowadzone w szerokim zakresie gęstości materiału, w różnych temperaturach i dla dwóch wymiarach próbek. Uwzględniono różne prędkości ściskania. Zamieszczono charakterystyki naprężenie-odkształcenie: inżynierskie i rzeczywiste. Wyznaczono także zależność jednostkowej absorpcji energii w funkcji gęstości materiału. Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników.

Kontynuacją badań quasistatycznych były badania własności mechanicznych przy większych prędkościach odkształcenia. W tym celu wykorzystano metodę dzielonego pręta Hopkinsona oraz zastosowano młot spadowy. Autor opisał metodę badań i zrealizowany eksperyment. Wyznaczona została energia absorpcji oraz dynamiczne charakterystyki materiału. Analiza wpływu prędkości na poziom absorpcji energii udowodniła liniowy wzrost absorpcji energii wraz ze wzrostem prędkości deformacji.

Tak szeroko prowadzone badania eksperymentalne posłużyły do identyfikacji modelu konstytutywnego (rozdział 4). Autor dokonał przeglądu modeli stosowanych do modelowania elastomerów i ich struktur spienionych. Na podstawie danych z eksperymentu, po przeprowadzeniu filtrowania, przeprowadzono weryfikację

poszczególnych modeli i wybrano najbardziej adekwatne: model Ogdena i model *hyperfoam*. Kolejnym etapem była kalibracja tych modeli. Przeprowadzono walidację i dostrojenie modeli. Wyniki zaprezentowano w postaci graficznej. Przeprowadzona ewaluacja modeli MES przy wykorzystaniu wyznaczonych wcześniej modeli konstytutywnych potwierdziła ich dobre dopasowanie. W rozdziale 4 nie zamieszczono jednak opisu tych modeli ani szczegółowych wyników.

Rozdział 5 dysertacji opisuje symulacje próby quasistatycznego ściskania metodą elementów skończonych. Przedstawiono modele i ich dyskretyzację oraz warunki brzegowe. W pierwszym modelu materiał próbki potraktowano jako jednorodny i izotropowy. W modelu drugim wykonano modelowanie jednej warstwy komórek jednej wielkości. W tym modelu wprowadzono ciśnienie wewnątrz każdej komórki. Po aplikacji modeli konstytutywnych przeprowadzone zostały symulacje dla różnych temperatur. Wyniki symulacji porównano na wykresach z wynikami badań eksperymentalnych. Przeprowadzono także symulacje dynamicznego uderzenia próbki w metodzie dzielonego pręta Hopkinsona, przy różnych prędkościach uderzenia. Do wartości odkształcenia uzyskano dobrą zgodność charakterystyk.

Przeprowadzone eksperymenty i symulacje posłużyły do sformułowania metodyki oceny zjawisk zachodzących w spienionych strukturach polimerowych planowanych do zastosowania na elementy pojazdów zabezpieczające lub/i zmniejszające skutki kolizji z niechronionymi użytkownikami dróg, w szczególności pieszymi. Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników.

Doświadczenie badawcze i zweryfikowane modele konstytutywne posłużyły do budowy modeli układu *impaktor dolnej części nogi – przód pojazdu z absorberem*, co zostało opisane w rozdziale 6. Opisano model obydwu zespołów układu. Zdefiniowano warunki brzegowe. Przeprowadzono symulacje i zaprezentowano wybrane wyniki. Sprawdzono zgodność uzyskanych wyników w zakresie ugięcia kolana oraz jego przyspieszenia i przyspieszenia górnego końca kości piszczelowej w czasie z zakresem wartości dopuszczalnych. Uzyskano spełnienie wymagań normowych.

Całość rozprawy została podsumowana w rozdziale 7. Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników z badań eksperymentalnych oraz badań numerycznych. Sformułowano wnioski. Rozprawę zakończono wskazaniem kierunków rozwoju dalszych badań i możliwościami praktycznego wykorzystania prowadzonych badań (rozdział 8).

Bibliografia rozprawy liczy 169 pozycji dotyczących opisywanych zagadnień. Większość pozycji stanowią publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym z ostatnich kilkunastu lat.

Charakterystyka rozprawy

Praca dotyczy rozpraszania energii w elementach samochodu zwiększających poziom bezpieczeństwa pieszego podczas zderzenia. Jest to temat bardzo istotny ze względu na duży procentowo udział pieszych wśród ofiar wypadków drogowych. Stosowane elementy ochrony biernej pieszego powinny spełniać wymagania odnośnych norm i regulaminów. Istnieje duża potrzeba właściwego doboru materiałów na absorbery oraz ich kształtowania. Dysertacja mgr inż. Przemysław Rumianka wychodzi naprzeciw tym potrzebom. Wybór tematu dysertacji jest jak najbardziej właściwy.

Autor dokonał szczegółowego opisu tych wymagań, ze szczególnym uwzględnieniem przeprowadzanych testów z impaktorami niezbędnych do homologacji pojazdu. Ze względu na zdolność pochłaniania energii, niską masę i łatwość kształtowania na absorbery wykorzystywane są najczęściej spienione tworzywa sztuczne. Mgr inż. Przemysław Rumianek do badań wybrał spieniony polipropylen, który jest powszechnie stosowany nie tylko w pojazdach ale także w innych wyrobach związanych z bezpieczeństwem biernym. Wybór ten oceniam jako właściwy o ile przeprowadzony zakres badań eksperymentalnych oraz późniejsza analiza ich wyników doprowadzi do utworzenia metodyki postępowania, którą będzie można zastosować do kolejnych materiałów.

Spienione tworzywa sztuczne są materiałem złożonym strukturalnie, których własności mechaniczne silnie zależą od wielu czynników wynikających z procesu produkcji, geometrii wyrobu oraz warunków eksploatacji. Autor starał się uwzględnić te różne czynniki przez szeroki zakres przedsięwziętych badań. Do oceny struktury wewnętrznej materiału zastosowano mikroskopię skaningową SEM. Wyznaczono równomierność struktury przy różnych gęstościach materiału. Zweryfikowano także skład cząsteczkowy za pomocą metody FTIR. Potwierdzono także stabilność materiału w zakresie temperatur eksploatacyjnych. Te badania wstępne świadczą o świadomym podejściu Autora do przedsięwziętych badań.

Na zasadniczą część badań eksperymentalnych składają się próby ściskania quasistatycznego. Mgr inż. Przemysław Rumianek przeprowadził badania próbek o różnej gęstości. Stosowano różne prędkości odkształcania, a badania prowadzono w różnych temperaturach. Zastosowano także próbki o dwóch różnych rozmiarach. Jest to bardzo szeroki zakres badań. Z tych badań wyznaczone zostały charakterystyki *naprężenie-odkształcenie* materiału. Wykazano silną zależność własności materiałowych od gęstości oraz temperatury, ale także od rozmiaru próbek. Przeprowadzono dyskusję wyników. Wykazano, że temperatura struktury energochłonnej pojazdu w trakcie zderzenia przekłada się na skuteczność ochrony pieszego. Stwierdzono także istotny wpływ wielkości próbki na

szerokość strefy stabilnego odkształcania – plateau. Wyznaczono optymalną gęstość materiału, przy której zdolność pochłaniania energii jest największa.

Drugą grupą badań eksperymentalnych były próby ściskania dynamicznego przeprowadzone przy pomocy dzielonego pręta Hopkinsona oraz przy pomocy młota spadowego. Autor zauważył liniową wzrost sztywności próbki wraz ze wzrostem prędkości odkształcania i na tej podstawie wyciągnął wniosek o dużym udziale czynnika gazowego w wykonywaniu pracy deformacji materiału.

Na podstawie przeprowadzonych badań mgr inż. Przemysław Rumianek przeprowadził dobór modelu konstytutywnego materiału. Jako najlepszy z kilku analizowanych przyjął model Ogdena. Model ten został dostrojony do charakterystyk uzyskanych z badań eksperymentalnych. Kalibrację wykonano dla próby quasistatycznej w temperaturze 23°C. Przeprowadzona walidacja MES potwierdziła przydatność modelu materiału. Zbudowano dwa modele próbek: jednorodny izotropowy i drugi odzwierciedlający strukturę komórkową. Obydwa modele obliczeniowe są poprawne, ale uważam, że w modelu izotropowym powinno się wykorzystać symetrię geometrii, a w modelu o strukturze komórkowej spróbować zamodelować mniejszy fragment w większym uszczegółowieniu, lepiej odzwierciedlający strukturę 3D. Zaproponowany model o strukturze komórkowej można jednak traktować jako poprawny jakościowo.

Przeprowadzony kompleksowy cykl badań eksperymentalnych oraz przyjęta procedura doboru modelu konstytutywnego materiału z walidacją przy pomocy modelu MES może być uznana za autorską metodologię oceny zjawisk zachodzących w spienionych polimerach stosowanych na elementy pojazdów zwiększających poziom bezpieczeństwa niechronionych uczestników dróg podczas zderzenia.

Zweryfikowane modele materiału zostały zaaplikowane do przeprowadzenia symulacji zderzenia MES impaktora nogi i przodu pojazdu z absorberem. Zbudowano modele poszczególnych elementów układu zgodnie z wymaganiami regulaminowymi. Modele zostały wykonane w wystarczającym stopniu uszczegółowienia. Warunki brzegowe odzwierciedlały rzeczywisty test zderzeniowy i były zgodne z normą Euro NCAP. Przedstawiono zależność ugięcia kolana od siły oraz przebiegi czasowe przyspieszeń. Rozkład sił impaktora wykazał, że siły w stawie kolanowym oraz na goleni mieściły się w granicach norm bezpieczeństwa, minimalizując ryzyko złamań. Określono deformację absorbera. Przeprowadzona próba jest dodatkową weryfikacją poprawności opracowanego modelu konstytutywnego i świadczy o jego przydatności przy symulacjach tego typu zderzeń.

Opisany wcześniej zakres pracy jest obszerny i spójny. Widoczne jest kompleksowe podejście do zagadnienia i metodyczne rozwiązywanie poszczególnych zagadnień cząstkowych.

Przyjęta hipoteza pracy o umożliwieniu ograniczenia następstw wypadków, zmniejszenia obrażeń oraz poprawy bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg przez zastosowanie w pojazdach samochodowych absorberów i dyssypatorów energii wytworzonych z polimerowych struktur spienionych, jest sformułowana bardzo ogólnie, natomiast zdefiniowane w rozdziale drugim zadania badawcze zostały zrealizowane.

Przeprowadzone przez mgra inż. Przemysława Rumianka badania i symulacje wymagały dużej wiedzy zarówno w zakresie przeprowadzania eksperymentów (w tym wypadku Autor stosował różne techniki pomiarowe) jak i w zakresie budowania złożonych modeli numerycznych.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej zakres pracy, kompleksowy charakter badań oraz opracowana na metodyka postępowania przy doborze adekwatnego modelu konstytutywnego materiału o strukturze komórkowej, w tym wypadku spienionego polipropylenu oraz zbudowane modele numeryczne stanowią oryginalne osiągnięcie naukowe i mają istotne znaczenie aplikacyjne.

Podstawowe osiągnięcia Doktoranta w rozprawie

Do podstawowych osiągnięć Autora i oryginalnych aspektów pracy można zaliczyć:

- ❑ dokonanie szerokiego przeglądu istniejącego stanu wiedzy w zakresie bezpieczeństwa niechronionych uczestników ruchu drogowego,
- ❑ przeprowadzenie badań eksperymentalnych spienionego polipropylenu (EPP) w zakresie ściskania quasistatycznego w szerokim zakresie gęstości materiału, w różnych temperaturach, przy różnych prędkościach ściskania dla dwóch wymiarach próbek
- ❑ badanie i analiza statystyczna struktury komórkowej materiału w zależności od jego gęstości oraz wyznaczenie zakresu temperatur eksploatacji,
- ❑ wyznaczenie charakterystyk *naprężenie-odkształcenie* spienionego polipropylenu,
- ❑ przeprowadzenie badań eksperymentalnych spienionego polipropylenu przy dużych prędkościach odkształcenia dwiema metodami: za pomocą pręta Hopkinsona oraz młota spadowego,
- ❑ wyznaczenie optymalnego zakresu gęstości umożliwiającego najlepszą absorpcję energii,
- ❑ dobór najbardziej adekwatnego modelu konstytutywnego EPP, jego kalibracja i dostrojenie przy pomocy symulacji numerycznej MES,

- sformułowanie metodyki oceny przydatności materiału na absorbery energii podczas zderzenia z niechronionym uczestnikiem dróg,
- budowa oryginalnego modelu przodu pojazdu z absorberem oraz impaktora nogi oraz przeprowadzenie symulacji numerycznych.

Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

- Autor podaje, że „zagrożeni użytkownicy dróg – piesi, rowerzyści i motocykliści – stanowią ponad połowę wszystkich zgonów na świecie” (str. 16)
- Na rysunku 3.24 (str. 79) przedstawiono przebiegi dla trzech takich samych testów. Przy sterowaniu przemieszczeniem powinna być jednakowa wartość maksymalnego odkształcenia, a przy sterowaniu siłą jednakowa wartość maksymalnego naprężenia.
- Wzór na naprężenie rzeczywiste (3.9) wyprowadzono przy założeniu niezmienniej objętości próbki (3.8), a jak zaobserwował Autor brak jest odkształceń poprzecznych (str. 117).
- Nie skomentowano dużej różnicy w wyznaczonych charakterystykach dla małych i dużych próbek (rys. 3.28 – 3.36) i jej przyczyny.
- Czy mierzona była temperatura wewnętrzna próbek badanych w temperaturze -30°C ?
- Na początku rozdziału 3.4 Autor podaje, że „Absorbery energii stosowane w pojazdach ... są deformowane z nie dużymi prędkościami odkształcenia”. Czy tak jest?
- Na wykresach (rys. 3.60 – 3.62, rys. 5.15 – 5.17) błędnie podano jednostki naprężenia, co wynika prawdopodobnie z przyjęcia niespójnego układu jednostek.
- Czy do modelowania MES prób quasistatycznych stosowano solver explicit?
- Przy budowie modeli MES nie wykorzystano symetrii geometrii i warunków brzegowych. Zastosowanie symetrii umożliwiłoby skrócenie czasu analizy bądź zwiększenie gęstości dyskretyzacji.
- Bardzo enigmatycznie opisano model próbki z uwzględnieniem komórek (str. 126), a szczególnie modelowanie styku pomiędzy poszczególnymi komórkami.
- Stosowanie naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa nie wydaje się właściwe do oceny wyczerpania modeli o strukturze komórkowej (rys. 5.10 – 5.11, rys. 6.8 i 6.9). Znacznie lepszą miarą byłyby odkształcenia.
- Na rysunku 6.9 nie przedstawiono odkształcenia lecz przemieszczenie wypadkowe.

Stwierdzono także niedociągnięcia głównie dotyczące terminologii oraz precyzji sformułowań:

- Błędne nazwy modeli materiałów: *hiperelastyczny*, *elastoplastyczny*, *elastyczny* zamiast *hipersprężysty* i *sprężysto-plastyczny*, *sprężysty* itp.

- ❑ Błędne określenie *energia termiczna* zamiast *ciepło*, *przedział eksploatacji termicznej* zamiast *zakres temperatury eksploatacji* itp.
- ❑ Błędne używanie określenia *ilość* zamiast *liczba*.
- ❑ Co to jest *plant*? (str. 96) Czy Autorowi chodzi o *plateau*?

Powyższe uwagi krytyczne nie są niedociągnięciami bardzo dużej wagi. Nie zmieniają one mojej pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Ocena redakcyjna rozprawy

Dysertacja zredagowana jest poprawnie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień, ale duże zastrzeżenia budzi niestaranna korekta tekstu. Niepełne zdania, literówki, mieszanie terminologii polskiej i angielskiej przeszkadzają w percepcji pracy.

Praca charakteryzuje się poprawną strukturą, chociaż zbyt obszerny jest moim zdaniem wstęp pracy, który właściwie jest przeglądem istniejącego stanu wiedzy zarówno w zakresie normatywnym współczesnym i w rysie historycznym, statystyki wypadków, jaki i polimerowych materiałów spienionych i ich zastosowaniu do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa niechronionych uczestników ruchu drogowego. Dla uproszczenia struktury dysertacji korzystne byłoby rozdzielenie wstępu na kilka rozdziałów. Podobnie rozdział 3 dotyczący i technologii wytwarzania EPP i przeprowadzonych przez Autora badań doświadczalnych. Modele MES opisane w rozdziale 5 zostały wykorzystane do weryfikacji modeli konstytutywnych analizowanych w punkcie 4.

Pozostałe uwagi zaznaczyłem w przekazanym mi egzemplarzu pracy, który przekazałem Autorowi, i dlatego ich tutaj nie przytaczam.

Wnioski końcowe

Praca dotyczyła zagadnienia symulacji rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych wykonanych z materiału o strukturze komórkowej. Jako reprezentatywny przykład materiału na absorbery przyjęto spieniony polipropylen. W celu określenia jego przydatności i doboru jego optymalnych parametrów Kandydat przeprowadził kompleksowy zakres prac badawczych w zakresie analizy struktury oraz wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych w różnych warunkach. Liczne przeprowadzone eksperymenty umożliwiły identyfikację właściwego modelu materiału przydatnego do aplikacji w symulacjach MES.

Treść zawarta w pracy odpowiada tytułowi pracy, choć jej zakres jest znacznie bardziej obszerny, bo obejmuje także identyfikację modelu konstytutywnego materiału

absorbera. Układ tematyczny pracy jest logiczny. Nie ustrzeżono się jednak pewnych błędów językowych i redakcyjnych, z których kilka przytoczyłem powyżej.

W podsumowaniu niniejszej opinii o recenzowanej rozprawie doktorskiej stwierdzam, że postawiony problem badawczy został rozwiązany, a zadania badawcze zrealizowane. Podstawowe cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte. Autor samodzielnie rozwiązał zagadnienie określenia przydatności materiału o strukturze polimeru spienionego do zastosowania na absorbery zabezpieczające niechronionych użytkowników dróg, a w szczególności doboru optymalnej struktury. Wymagało to wysokich umiejętności merytorycznych oraz dużego nakładu pracy. Uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i dużą użyteczność. Wymienione powyżej liczne uwagi krytyczne nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

Praca jest poprawna pod względem merytorycznym, a w przedstawionych analizach Doktorant wykazał duży zasób wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej ale także z inżynierii materiałowej, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autor wykazał się dobrą znajomością metod badań eksperymentalnych oraz metod numerycznych w obszarze modelowania wytrzymałościowego. Przedstawiona praca wykazuje dobre przygotowanie pana mgr inż. Przemysława Rumianka do samodzielnej pracy naukowej.

Recenzowana praca jest oryginalna, wartościowa i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze o znacznych walorach poznawczych, stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego i wnosi istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

Podsumowując podane wyżej oceny uważam, że opiniowana rozprawa doktorska pt. „Symulacja rozpraszania energii w elementach ochrony pieszych” spełnia w wystarczającym stopniu wymagania ustawowe stawiane rozprawom na stopień doktora nauk technicznych i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony, a po pozytywnym jej zakończeniu do nadania mgr. inż. Przemysławowi Rumiankowi stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Wrocław, dnia 9 listopada 2024r.



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki