

płk dr hab. inż. Robert Panowicz, prof. WAT
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Warszawa 16.07.2025r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Piotra Bieńka
pod tytułem:
**„Analiza naprężeń i odkształceń
w procesie modelowania
płyty oporowej mózdzierza”**

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo (sygn. RM-530-02-02/2025) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, prof. dr hab. inż. ANDRZEJA BURGHARDTA z Politechniki Rzeszowskiej, z dnia 23.04.2025r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. PIOTRA BIEŃKA pt. *Analiza naprężeń i odkształceń w procesie modelowania płyty oporowej mózdzierza*. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. MIROSŁAW TUPAJ, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. KRZYSZTOF SZWAJKA.

2. Wprowadzenie

Zaostrzenie sytuacji geopolitycznej wraz z działaniami wojennymi prowadzonymi za naszą wschodnią granicą spowodowały na całym świecie wzrost zainteresowania rozwojem techniki wojskowej. Należy również zaznaczyć, że ze względu na zastosowanie brak jest w literaturze szczegółowych wyników badań rozwiązań technicznych stosowanych w sprzęcie wojskowym. Do grupy tej zaliczyć należy również mózdzierze lekkie jak i ciężkie. Moździerze

mimo szybkiego rozwoju alternatywnych rozwiązań, w tym dronów, są jednym z podstawowych środków ogniowych używanych na polu walki zarówno przez Rosję jak i Ukrainę. Problematyka związana z badaniami elementów mózdzierza jest więc zagadnieniem ważnym jak również złożonym z punktu widzenia planowania, realizacji i analizy badań zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych. Wybór tematu dysertacji jest zarówno ważny i aktualny zarówno z technicznego jak i badawczego punktu widzenia. Jest również powiązany z aktualnymi potrzebami Wojska Polskiego.

3. Przegląd treści pracy

Recenzowana praca doktorska mgr. inż. Piotra Bieńka została napisana na 186 stronach maszynopisu formatu A4; składa się z wykazu symboli i oznaczeń, wstępu i schematu pracy, 8 rozdziałów zasadniczych, podsumowania, wniosków końcowych, streszczenia w języku polskim oraz angielskim jak również bibliografii, w skład której wchodzi 167 pozycji literaturowych.

We wstępie Autor uzasadnia podjętą tematykę badań własnych wraz z krótkim uzasadnieniem sposobu rozwiązania problemu badawczego. Następnie przedstawia schemat badawczy pracy wraz z krótkim opisem zawartości poszczególnych rozdziałów. Rozdziały zasadnicze zaczynają się od wprowadzenia, w którym przedstawiono stosowane rozwiązania techniczne płyt oporowych jak również przegląd literatury związany z ich badaniami. Wprowadzenie zawiera również krótki opis metody elementów skończonych jak i pomiarów tensometrycznych. Na końcu przedstawione są wymagania jakie powinny spełniać nowoopracowywane płyty oporowe mózdzierzy.

Osobny rozdział poświęcony jest celowi rozprawy doktorskiej jak i postawionej tezie.

Rozdziały od 3 do 5 dotyczą w większości badań eksperymentalnych. Pierwszy z wymienionych rozdziałów dotyczy badań materiału, z którego wykonuje się płyty oporowe jak również zagadnień z zakresu inżynierii odwrotnej. W rozdziale tym opisano metodę otrzymania modelu CAD badanego obiektu na podstawie wykonanego skanowania 3D, które obejmowało uzyskanie chmury punktów oraz modelu CAD rzeczywistego obiektu. Kolejny rozdział zawiera metodykę pomiarów parametrów balistycznych oraz odkształceń płyty oporowej wraz ze wstępnymi wynikami badań eksperymentalnych.

Najistotniejszym jest rozdział 5, w którym przedstawiono przygotowanie i realizację badań impulsowego obciążenia płyty oporowej poprzez strzelanie z mózdzierza. Badania

realizowano dla największych obciążeń płyty oporowej posadowionej na trzech różnych typach gruntu oraz dla obciążeń działających na płytę pod różnymi kątami.

Kolejny rozdział dotyczy modelu elementów skończonych płyty oporowej wraz z zadanymi warunkami początkowymi i brzegowymi.

Natomiast w rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w wybranych punktach pomiarowych dla różnych warunków eksperymentu uwzględniających zarówno kierunek działania obciążenia jak i rodzaj podłoża. Rozdział ten zawiera również wyniki analiz numerycznych otrzymanych na podstawie modelu opisanego w rozdziale 6. Istotne jest porównanie wyników analiz numerycznych i badań eksperymentalnych, które zostało przedstawione w tym rozdziale. Na końcu tego rozdziału przedstawione są wyniki statystyczne otrzymane na podstawie wykorzystania podejścia ANOVA jak również model sieci neuronowej wykorzystanej do predykcji odpowiedzi płyty oporowej mózdzierza na przyłożone obciążenie w zależności od parametrów wymuszenia.

Uzyskane doświadczenia pozwoliły na wykonanie modyfikacji płyty oporowej przedstawione w rozdziale 8, które umożliwiły na znaczące obniżenie wyężenia płyty oporowej poddanej impulsowemu oddziaływaniu podczas strzału z mózdzierza przy równoczesnym zmniejszeniu masy płyty.

Na końcu przedstawiono krótkie podsumowanie i wnioski z realizacji badań eksperymentalnych i analiz numerycznych.

4. Uwagi krytyczne, pytania merytoryczne oraz dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi i wyjaśnienia na następujące kwestie oraz wyraża swoje następujące wątpliwości:

- 1) Dlaczego do wyznaczenia naprężeń występujących na badanej płycie oporowej, przyjęto płaski stan naprężeń (str. 87)?
- 2) Opis modelu elementów skończonych jest zbyt lakoniczny. Brakuje w nim informacji przynajmniej o liczbie punktów całkowania wykorzystanych w modelach elementów skończonych jak i sposobie rozwiązania układu równań MES.
- 3) Grunt oprócz właściwości sprężystych ma również właściwości tłumienne. Na ile w takim przypadku wykorzystanie elementów Bush nie uwzględniających tłumienia wpłynęło na różnice w otrzymanych wynikach analiz numerycznych w porównaniu do wyników badań eksperymentalnych?

- 4) Zjawisko strzału, również z mózdzierza, zalicza się do zjawisk impulsowych lub dynamicznych. Brak mi w tym zakresie przedstawienia wyężenia płyty oporowej w kolejnych momentach czasu tak, żeby można dokonać analizy zachowania się płyty obciążonej impulsowo.
- 5) W zakresie rejestracji przebiegów czasowych (pomiaru tensometryczne, pomiaru ciśnienia) brak jest informacji o częstotliwości próbkowania. Jedynie na stronie 86 Doktorant zamieścił informację o paśmie przenoszenia i częstotliwości granicznej. W tym samym akapicie jest również informacja o wykorzystanym filtrze dolnoprzepustowym. Użyte sformułowania powodują, że nie do końca wiadomo czego dotyczy wartość przedstawionej częstotliwości granicznej – częstotliwości próbkowania, czy częstotliwości odcięcia zastosowanego filtra. Brak jest również przebiegu charakterystyki zastosowanego filtra dolnoprzepustowego.
- 6) Doktorat opisując technikę badań tensometrycznych zwraca uwagę, że zabezpiecza się tensometry przed wpływem czynników zewnętrznych. Czy takie zabezpieczenie zostało wykonane w przypadku tensometrów umieszczonych na spodzie płyty oporowej?
- 7) Zdaniem recenzenta umieszczenie punktu 3.3 pt.: „Opracowanie modelu 3D płyty oporowej” w rozdziale pt. „Materiał badawczy” zaburza układ pracy.
- 8) Autor w rozdziale 8 (str. 149) dotyczącym modyfikacji konstrukcji płyty oporowej pisze: „Okrągły obrys płyty umożliwia symetryczny we wszystkich kierunkach rozkład naprężeń, ...”, co jest niezgodne z przedstawionymi wynikami badań.
- 9) Analiza statystyczna wyników badań została oparta o jednoczynnikową analizę wariancji (punkt 7.5). Czy przeprowadzono wieloczynnikową analizę wariancji? Z zaprezentowanych wyników badań wynika, że istnieje przynajmniej związek pomiędzy naprężeniami występującymi w płycie oporowej i kątem ostrzału.
- 10) Na rys. 7.5.1 został przedstawiony „Wykres naprężeń w zależności od obszarów badanej płyty oporowej”, czy przez przedstawione na rysunku wartości naprężeń należy rozumieć wartości naprężeń w punktach i obszarach zgodnie z rys. 7.4.1?
- 11) W opisie przygotowania danych do modelu sieci neuronowych (str. 140) Doktorant dokonał normalizacji danych wejściowych. Brak jest uzasadnienia, czemu miał służyć ten proces.
- 12) W modelu sieci neuronowej brak jest jawnie zdefiniowanego wektora wyjściowego.
- 13) Na stronie 140 Autor dzieli dane wejściowe modelu sieci neuronowych na ilościowe i jakościowe. Jak model sieci neuronowych uwzględnia dane ilościowe, a jak jakościowe? W tym samym obszarze tematycznym (str. 141) zawarta jest informacja

o rodzaju sieci wybranej do zastosowania. Wybrano sieć wielowarstwową, natomiast brak jest informacji ile warstw i jak liczących w neurony rozpatrywano. Doktorant nie zdefiniował również algorytmu uczenia BFGS (tabela 7.6.1) jak i sposobu oznaczenia danej sieci neuronowej np. MLP 3-10-1.

14) Czemu nie wykorzystano w sieci neuronowej funkcji aktywacji typu ReLU?

15) W podsumowaniu dotyczącym sieci neuronowych Doktorant stwierdza (str. 143): „Najistotniejszym, parametrem wpływającym na budowany model neuronowy, jest punkt.”. Stwierdzenie to jest zbyt enigmatyczne i wymaga szerszego rozwinięcia.

Wśród niedociągnięć natury edycyjnej i stylistycznej Autora opracowania należy wymienić nadużywanie w stosowaniu żargonu poligonowego, czego przykładem jest sformułowanie „na sznur”. Pozostałe drobne uwagi i błędy redakcyjne zostały przekazane Autorowi.

5. Ocena merytoryczna przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się dużym aspektem poznawczo-badawczym szczególnie w zakresie eksperymentalnych badań poligonowych, które stanowią zasadniczą wartość rozprawy. Bardzo istotnym z punktu badań naukowych jak i aplikacyjności tych badań są równoczesne rejestracje wymuszenia (ciśnienia w lufie) oraz jego wpływu na płytę oporową z uwzględnieniem różnych kątów podniesienia lufy oraz wpływu sztywności podłoża. Wykonane badania eksperymentalne pozwoliły na odpowiednie dostrojenie modelu numerycznego.

Należy stwierdzić, że Doktorant pan mgr inż. Piotr Bieniek:

- 1) Wybrał ważny i aktualny temat dysertacji zarówno z technicznego jak i badawczego punktu widzenia.
- 2) Opracował metodykę badań eksperymentalnych jak i procedurę strojenia modelu numerycznego.
- 3) Wykazał się umiejętnością posługiwania nowoczesną aparaturą badawczą jak i znajomością zagadnień z zakresu analiz numerycznych, badań statystycznych i sztucznych sieci neuronowych.
- 4) Uzyskał nowe wyniki, które mogą być wykorzystane do doskonalenia konstrukcji płyt oporowych moździerzki oraz innych rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w technice wojskowej.

- 5) Wykazał się umiejętnościami z zakresu planowania i realizacji złożonych badań jak również samodzielnej pracy naukowo-badawczej.
 - 6) Zaprojektował i dokonał analizy nowego rozwiązania płyty oporowej o znacząco lepszych parametrach masowych, która podczas oddziaływania impulsowego charakteryzuje się mniejszym wyężeniem w porównaniu do obecnie stosowanych.
- a tym samym osiągnął założony cel pracy.

6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe pod uwagę, Recenzent stwierdza, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Bieńka pt.: „*Analiza naprężeń i odkształceń w procesie modelowania płyty oporowej mózdzierza*” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2024r. poz. 1571 z późn. zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony



.....