

dr hab. inż. Mirosław Bocian, prof. uczelni  
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej  
i Biomedycznej  
Politechnika Wroclawska,  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

Wrocław 05.09.2025 r.

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Bieńka**

pod tytułem

**Analiza naprężeń i odkształceń w procesie modelowania  
płyty oporowej mózdzierza**

**Opis identyfikacyjny:** praca papierowa w twardej oprawie, stron 186, pozycji literatury 167.

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Mirosław Tupaj, prof. PRz.

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Szwajka.

**Zlecniodawca:** Prorektor ds. nauki Politechniki Rzeszowskiej dr. hab. inż. Lesław Gniewka, prof. PRz.

## INFORMACJE WSTĘPNE

Rozprawa zawiera wykaz symboli i oznaczeń, wstęp, schemat pracy, spis treści, 8 numerowanych rozdziałów z podrozdziałami, podsumowanie, wnioski końcowe, bibliografię, streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim i angielskim.

W ocenie recenzenta, ubiegający się o nadanie stopnia doktora przedstawił zgodnie z art. 186.1. pkt. 3 lit. a Ustawy opublikowany jeden artykuł naukowy oraz pracę pisemną, w której zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego analizy naprężeń i odkształceń w procesie modelowania płyty oporowej mózdzierza.

## OCENA WYBORU TEMATYKI I ZAKRESU PRACY

Doktorant, jako cel pracy postawił sobie „opracowanie metodyki i przeprowadzenie badań eksperymentalnych płyty oporowej mózdzierza M98 w warunkach poligonowych oraz przygotowanie modelu obliczeniowego płyty oporowej do szacowania naprężeń przy zastosowaniu symulacji numerycznych metodą elementów skończonych. W pracy doktorant skupił się na opracowaniu metodyki badań eksperymentalnych, wykonaniu stanowisk badawczych, przeprowadzeniu badań poligonowych płyty oporowej. To pozwoliło na zebranie danych, uzupełnionych o dane materiałowe, do przeprowadzenia symulacji numerycznych. Dodatkowo doktorant zbudował model CAD płyty oporowej celem przeprowadzenia obliczeń MES określając naprężenia i odkształcenia konstrukcji, co dało możliwość, by mógł zaproponować zmodyfikowaną konstrukcję płyty oporowej.

W pracy zastosował różnego rodzaju techniki badawcze, takie jak testy poligonowe, obliczenia metodą elementów skończonych jak i obliczenia analityczne.

Autor poprzez swoje badania „wzbogacił” wiedzę z zakresu metodologii prowadzenia pomiarów odkształceń płyty oporowej, korelacji wykonanych pomiarów z obliczeniami MES przy uwzględnieniu zmiennej sprężystości gruntów i wpływu różnych warunków ostrzału.

Doktorant formułuje postulat, że dokładniejsze zbadanie zachodzących zjawisk podczas procesu ostrzału wymaga uwzględnienia danych uzyskany nie tylko podczas laboratoryjnych badań testowych, ale przede wszystkim badań poligonowych. Dlatego autor przyjął następującą tezę w pracy:

**Możliwe jest szacowanie wartości naprężeń płyty oporowej mózdzierza na podstawie modelu numerycznego uwzględniającego dane eksperymentalne uzyskane w warunkach poligonowych.**

Słuszność tezy została udowodniona na podstawie zrealizowania zakresu badań przeprowadzonych w pracy:

- Wykonanie analizy metod badawczych stosowanych do płyt oporowych.
- Opracowanie metodyki badań wstępnych i badań właściwych uwzględniających zastosowanie rozet tensometrycznych i odpowiedniej amunicji.
- Przeprowadzenie badań poligonowych z uwzględnieniem różnego podłoża, aby uzyskać bazę danych z badań eksperymentalnych.
- Wykonanie badań materiałowych, budowa modelu MES i przeprowadzenie obliczeń.
- Analiza wyników naprężeń, analiza istotności poszczególnych czynników i zastosowanie optymalnego modelu.

- Zaproponowanie ulepszonej konstrukcji na podstawie analiz.

W pracy chronologicznie doktorant dąży do wyznaczonego celu przyjmując następujący jej układ:

- Rozdział 1.* wprowadzenie dotyczące badanego obiektu: rys historyczny, odnośniki literaturowe, metody badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych na podstawie przeglądu literaturowego.
- Rozdział 2.* zawiera w jasny sposób przedstawioną tezę, cel i zakres pracy.
- Rozdział 3.* obejmuje opis materiału badawczego w postaci płyty oporowej moździerza M98, badań materiału pod względem składu chemicznego i wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych, badań mikroskopowych połączeń spawanych oraz proces przenoszenia geometrii z obiektu rzeczywistego do środowiska CAD.
- Rozdział 4.* zawiera opis wstępnym badań poligonowych płyty oporowej, w których autor zaprezentował możliwości testowania pomiaru odkształceń metodą tensometryczną w czasie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Badania te pozwoliły na określenie miejsc montowania tensometrów oraz dobru odpowiednich granatów moździerzowych w celu osiągnięcia ekstremalnych warunków eksploatacji.
- Rozdział 5.* odnosi się do badań zasadniczych, gdzie przygotowano odpowiednie pociski, odpowiednio różne rodzaje gruntów do posadowienia moździerzy oraz przygotowanie instalacji tensometrycznej na płycie oporowej. W badaniach uwzględniano szeroką gamę granatów (pocisków), różne grunty, oraz rozmaity kąt podniesienia lufy moździerza.
- Rozdział 6.* koncentruje się na analizie numerycznej MES. Doktorant zaprezentował budowę modelu MES, wprowadzanie warunków brzegowych i metody obciążania. Zwraca szczególną uwagę na modelowanie podłoża. Już w początkowej fazie skupia się na korelacji obliczeń z pomiarami poligonowymi poprzez dobór miejsc. W ten sposób na bieżąco dokonuje porównania odkształceń. Zastosowane podejście iteracyjne, polegające na zmianie obszaru podparcia płyty, zmianie sprężystości podłoża lub zmianie sprężystości płyty jest pragmatycznym podejściem dostrojenia modelu numerycznego do wyników z badań eksperymentalnych.
- Rozdział 7.* odnosi się do analizy przeprowadzonych badań. Autor przedstawił wyniki uzyskane badań poligonowych a następnie obliczeń MES. Dokonał porównanie tych wyników dla poszczególnych warunków

testowych. Doktorant przeprowadził analizę statystyczną wpływu warunków ostrzału na wielkość naprężeń zredukowanych na płycie oporowej dla wybranych podobszarów. Zbudowany model sieci neuronowej pozwala na predykcję wyników naprężeń zredukowanych w zależności od parametrów wejściowych testów i porównanie otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi w testach.

*Rozdział 8.* obejmuje propozycję zmian w budowie płyty oporowej mającej na celu zmniejszenie koncentracji naprężeń przy zachowaniu średnicy zewnętrznej. W wyselekcjonowanych na poprzedniej konstrukcji obszarach pomiarowych oraz im odpowiadających obszarach na nowej konstrukcji dokonano porównania występujących naprężeń zredukowanych. Autor zaproponował rozwiązanie, które znacząco wpływa na zmniejszenie naprężenia występującego w tych obszarach a także odkształcenia płyty. Dodatkowo w wyniku modyfikacji uległa zmianie masa płyty oporowej (redukcja o 16kg) co jest bardzo istotne z punktu widzenia eksploatacji.

*Podsumowanie* dotyczy opisu w zwięzły sposób przeprowadzonych testów i badań oraz otrzymanych wyników pokazując chronologię, logiczną całość i kompletność pracy.

W ostatniej części – *Wnioski końcowe* doktorant w punktach w jasny i klarowny sposób określił: jaką wiedzę uzyskał przeprowadzając swoje testy, badania i analizy, oraz w jaki sposób je wykorzystał do optymalizacji nowej konstrukcji.

Wybór tej tematyki oceniam jako trafny i ważny naukowo. Dysertacja wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna” o dużych walorach naukowych i aplikacyjnych z ukierunkowaniem na aspekty projektowe w odniesieniu do określania charakterystyk dynamicznych nowoprojektowanego sprzętu uzbrojenia.

#### **UWAGI O ROZPRAWIE, PYTANIA MERYTORYCZNE I ZAGADNIENIA DYSKUSYJNE**

Rozprawa napisana jest zrozumiałym językiem nie wykraczającą poza normy edytorskie. Nie dostrzeżono większych błędów, zaś niektóre z nich przedstawiono w dalszej części recenzji. Na szczególne podkreślenie zasługuje obszerny pakiet badań poligonowych a zarazem testów obliczeniowych. Rysunki oraz tabele są wykonane starannie i odzwierciedlają szeroki program badań i obliczeń. Położono duży nacisk na wyniki, wymagające odpowiedniej obróbki statystycznej.

Zdaniem recenzenta, bardzo dużą wartością tej rozprawy są prezentowane badania poligonowe, co jest wyjątkowe ze względu na dostęp, koszty, wiedzę i umiejętności doktoranta. Tego typu badania w znacznym stopniu wzbogacą wiedzę o tym jak wyglądają obciążenia dynamiczne podczas wystrzału, co ma wpływ na to obciążenie, jak wyglądają naprężenia w zależności od podłoża i kąta nachylenia moździerza.

#### Uwagi, Spostrzeżenia, Pytania:

##### Strona 11

X1, X2, X3 – „zmienna równania regresji **odnosząca stanowiąca** obszar płyty oporowej, zmienna równania regresji **odnosząca stanowiąca** podłoże, zmienna równania regresji **odnosząca stanowiąca** kąt ostrzału”,

„odnosząca stanowiąca” – wydaje się, że można ten termin zastąpić innym określeniem. Proszę wyjaśnić znaczenie.

##### Strona 29

„Umożliwia wyznaczenie modułu odkształcenia gruntu jako zależności przyrostu obciążenia jednostkowego **do przyrostu badanej warstwy** w zadanym przedziale obciążeń”. Ta sentencja jest niejasna. Proszę o stanowisko doktoranta celem wyjaśnienia jego znaczenia.

##### Strona 30

„Tensometria jest jedną z najczęściej stosowanych metod służących do pomiaru odkształceń na wybranej powierzchni. Umożliwia wyznaczenie naprężeń w celu późniejszego określenia wytrzymałości całej konstrukcji lub jej poszczególnych elementów.”

Pytanie: Kiedy wyznaczenie naprężeń na podstawie odkształceń może być bardzo trudne lub niemożliwe?

##### Strona 62

Doktorant opisuje badania pomiaru ciśnienia. Proszę o wyjaśnienie i odpowiedź na następujące pytania:

Pytanie: Jaka była częstotliwość próbkowania pomiaru ciśnienia i ilu bitowa była karta pomiarowa? Jaki to mogło mieć wpływ na wyniki pomiaru?

Strona 67

Prezentowane są różnice pomiarowe wynikają z charakteru pomiaru przy metodzie zgmiotowej – mechaniczny a przy metodzie piezoelektrycznej – mechaniczno-elektryczny.

Pytanie: Czy doktorant może to rozwinąć? Z jakich powodów mogą być te różnice?

Tab. 5.2 strona 85

Pytanie: Jak wyznaczono odchyłki do pomiarów średnich? (były 3 pomiary).

Strona 86

Rozety wchodzące w skład instalacji tensometrycznej wykonanej na płycie oporowej pracowały w ćwierć-mostku Wheatstone'a z pasmem przenoszenia równym 1200 Hz.

Pytanie: Czy częstotliwość przenoszenia nie była za mała? Jaka była częstotliwość próbkowania? Jakie były wzmacniacze? Jaki to mogło mieć wpływ na błędy pomiarowe?

Strona 123

Pytanie: Co oznaczają błędy pomiarowe przy metodzie MES? W jaki sposób zostały one wyznaczone?

Strona 141

Pytanie Dlaczego wybrano tego typu sieć neuronową Multilayer Perceptron?

Drobne uwagi o charakterze redakcyjnym:

W rękopisie zauważono drobne omyłki pisarskie i literówki. Uwagi te zostały zaznaczone w tekście i przekazane autorowi.

Recenzent podkreśla, że wyżej wymienione uwagi mają jedynie charakter dyskusyjny i w żaden sposób nie umniejszają pozytywnego odbioru wyników pracy oraz osiągniętego celu przez doktoranta.

## PODSUMOWANIE

Twórczy wkład mgr. inż. Piotra Bieńka w zakresie wzbogacenia dyscypliny naukowej dotyczy części numerycznej i eksperymentalnej. Podkreślić należy ogrom prac eksperymentalnych, które nie są proste do zrealizowania, bo podlegają

specjalnym regulacjom ze względu na konieczność zachowania szczególnych środków bezpieczeństwa. Eksperymenty zasadnicze, były poprzedzone szeregiem testów wstępnych, co pokazuje duże doświadczenie jak i dużą dbałość, aby otrzymywać wiarygodne wyniki. Odnosząc się do części numerycznej należy podkreślić staranność i precyzję przy budowie modeli numerycznych, dobór wielkości elementów skończonych, duża dbałość przy generowaniu siatki MES. Po dokładnej analizie rękopisu opracowania pt.: „Analiza naprężeń i odkształceń w procesie modelowania płyty oporowej mózdzierza” można sformułować następujące osiągnięcia i wnioski:

1. Temat jest bardzo istotny i „na czasie” ze względu na sytuację geopolityczną.
2. Opracowanie autorskiej oryginalnej metodyki badań poligonowych na podstawie, której zaprezentowano metodę analiz numerycznych.
3. Opracowanie bardzo „bogatego” i obszernego planu badań eksperymentalnych uwzględniających szereg zmiennych mogących mieć wpływ na obciążenie płyty oporowej mózdzierza.
4. Po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, zebranie bazy danych pomiarowych, weryfikacja z obliczeniami numerycznymi w celu dostrojenia modeli wirtualnych.
5. Wykorzystanie nowych metod analizy i predykcji, poprzez zastosowanie sieci neuronowych.
6. Odpowiednie wykorzystanie modeli statystycznych w celu wykazania „wrażliwości” wyników (naprężeń na płycie oporowej) na parametry wejściowe (kąt ostrzału, podłoże).
7. Zaproponowano nową konstrukcję płyty cechującą się wydajniejszą wytrzymałością na obciążenia i trwalszym rozwiązaniem koncepcyjnym.
8. Aplikacyjność nowego rozwiązania płyty oporowej mózdzierza, które wymaga dalszych testów na poziomie certyfikacji wyrobu przeznaczonego do wdrożenia.

W oparciu o ocenę rozprawy doktorskiej recenzent stwierdza, że doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac naukowych, doboru metod badawczych, opracowania wyników badań, formułowania wniosków oraz trafnego doboru piśmiennictwa w przedmiotowej tematyce.

Ponadto, ze względu na bardzo dużą wartość i mnogość przeprowadzonych eksperymentów, dużą dbałość co do rzetelności otrzymywanych wyników, a także dokładność i precyzja przy budowie modeli MES jak i obliczeniach numerycznych, skłania mnie do wnioskowania o wyróżnienie tej pracy doktorskiej. Zasadniczym argumentem są zawarte wyniki badań w rozdziałach 5-8. Doktorant dokonując analiz parametrów modelu numerycznego wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem analitycznym, a zaprezentowana forma opracowania naukowego jest na bardzo

wysokim poziomie merytorycznym. Stwierdzam, że osiągnięcia uzyskane w dysertacji wzbogacają zakres inżynierii mechanicznej w obszarze konstrukcji wojskowych.

**WNIOSEK**  
**o dopuszczenie do publicznej obrony**

Biorąc powyższe pod uwagę, recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Piotra Bieńka spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2021 poz. 478 ze zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej w Rzeszowie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Miroslaw Bodzio*