

**Prof. dr hab. inż. JAROSŁAW MIKIELEWICZ**  
**członek rzeczywisty PAN**  
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH PAN  
ul. Gen. J. Fiszera 14  
z tel. 41 12 71, fax 41 61 44, tlx 0512042 imp pl

Gdańsk, kwiecień 23

## RECENZJA

pracy doktorskiej **mgr inż. Mateusza ZIELIŃSKIEGO** pt „Badania własności termofizycznych stali lufowych oraz symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty wykonanej z tych stali”

### 1. Przedmiot rozprawy.

Opiniowana praca dotyczy badań własności termofizycznych, tzn. dyfuzyjności cieplnej, przewodności cieplnej, rozszerzalności cieplnej oraz ciepła właściwego wybranych stali lufowych oraz analizie wymiany ciepła w lufie o długości 3150 mm armaty kalibru 35 mm. Przesłanką do podjęcia badań był opracowany w Polsce Okrętowy System Uzbrojenia OSU-35K, wyposażony w automatyczną armatę kalibru 35 mm oraz prace prowadzone w WAT dotyczące badań trwałościowych broni strzeleckiej z lufami 5.56 mm wykonanymi w Fabryce Broni „ŁUCZNIK-RADOM”.

W ramach rozprawy Doktorant przeprowadził studia literaturowe nad powyższymi zagadnieniami. Wykonał badania eksperymentalne wymienionych powyżej własności termofizycznych. Badania własności termofizycznych są komplementarne. Ważną częścią niniejszej dysertacji są również symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm podczas serii strzałów, które ujawniły rozkład temperatury wzdłuż długości lufy oraz wzdłuż promienia ścianki lufy w różnych jej przekrojach. Charakterystyki temperaturowe własności termofizycznych posłużyły jako dane wejściowe do wykonania symulacji numerycznych wymiany ciepła w ścianie lufy armaty kalibru 35 mm o długości 3150 mm po oddaniu kilkudziesięciu strzałów. Obliczenia wymiany ciepła wykonano dla lufy bez powłoki ochronnej z chromu na wewnętrznej powierzchni lufy oraz z powłoką ochronną z chromu o różnej grubości. Do badań Doktorant wybrał stale ze względu na zachodzące w nich pod wpływem temperatury przemiany ferryt-austenit. Zmęczenie cieplne luf jest związane z przemianami strukturalnymi stali. Powierzchnie wewnętrzne luf są chromowane i ulegają zniszczeniu głównie przez cykliczne zmiany objętości podłoża stalowego powodując pęknięcie leżącej na niej warstwy chromu. Mechanizm zużycia materiału lufy dotychczas nie jest w pełni poznany. Doktorant przeprowadził obróbkę cieplną oraz badania metalograficzne wybranych stali DUPLEX 2205 pod kątem możliwości regulowania proporcji ferrytu do austenitu w stopie stali. Wykonał symulację numeryczną wymiany ciepła dla lufy armaty kalibru 35 mm o długości 3150 mm, której wewnętrzną powierzchnię pokryto warstwą chromu oraz dla porównania wyników dla przypadku, gdy lufa nie jest pokryta warstwą chromu. Aby zapewnić większą trwałość luf Doktorant poszukuje lepszej od dotychczasowych stali, w której nie zachodzą zmiany strukturalne lub temperatura przemiany strukturalnej jest wyższa niż dotychczas występująca w praktyce. Badania symulacyjne na modelu numerycznym wymiany ciepła w stali pozwalają Mu na ustalenie dla wybranych stali lufowych optymalne warunki ich eksploatacji. Nowe gatunki stali lufowej powinny mieć strukturę, w której podczas nagrzewania się lufy w czasie strzału nie zachodzą przemiany typu skurczowego ferryt-austenit.

Doktorant opracował oryginalną procedurę regulowania proporcji ferrytu do austenitu podczas obróbki cieplnej stali DUPLEX 2205 oraz zbadał wpływ tych proporcji na zmianę charakterystyk termicznych własności termofizycznych tej stali. Istotnym elementem pracy są również badania metalograficzne, które w prawdzie tylko częściowo sam wykonał Doktorant. Posłużyły mu one do wyjaśnienia charakteru zmian własności termofizycznych wybranych stali lufowych w zależności od temperatury. Doktorant w pracy podał szczegółowe opisy procedur badawczych pomiarów własności termofizycznych stali lufowych wykazując dużą znajomość problematyki i czyniąc własne badania wiarygodnymi.

Doktorant wykazał dużą umiejętność w prowadzeniu badań, posługiwaniu się aparaturą pomiarową, zbieraniu danych i ich opracowaniu przy pomocy komputera. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych oraz ich analizę wyników oceniam jako wysoce zadawalające.

### **Podsumowanie i wnioski z badań**

W literaturze przedmiotu niewiele jest opracowań dotyczących metod badania stali lufowych i ich doboru do charakteru broni. Lukę tę stara się wypełnić praca Doktoranta. Nakreślone przez Doktoranta cele w przedstawionej do oceny dysertacji było:

- a) wyznaczenie parametrów termofizycznych dyfuzyjności cieplnej, przewodności cieplnej, rozszerzalności cieplnej oraz ciepła właściwego wybranych stali, tzn. 30HN2MFA, 38HMJ, DUPLEX 2205, WCL, MARAGING 350 w szerokim zakresie temperatury aż do około 1100°C;
- b) analiza wybranych stali ze względu na możliwość wystąpienia przemiany ferryt-austenit zachodzącej pod wpływem temperatury
- c) obróbka cieplna oraz badania metalograficzne stali DUPLEX 2205 ze względu na możliwość regulowania proporcji ferrytu do austenitu;
- d) wykonanie symulacji numerycznych wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm o długości 3150 mm, której wewnętrzną powierzchnię lufy pokryto warstwą chromu oraz porównanie wyników dla przypadku, gdy lufa nie była pokryta warstwą chromu.

W dysertacji Doktoranta przedstawiony został aktualny stan wiedzy związanej z doбором dla broni właściwej stali lufowej. Doktorant opracował własną metodę badawczą. Opracowana metoda jest nowa i ciekawa, daje dobre rezultaty. Przeprowadził w oparciu o nią badania eksperymentalne. Analizował uzyskane rezultaty. Sformułował interesujące wnioski z badań. Doktorant wykazał się znajomością rozległej wiedzy z zakresu metalografii, wytrzymałości materiałów i wymiany ciepła.

Zagadnienie jest trudne i złożone. Konkludując można stwierdzić, że:

- opracowane zagadnienie jest ważne z punktu widzenia poznawczego jak i praktyki uzbrojeniowej. Konkludując:
- Doktorant wykonał wiarygodne pomiary własności termofizycznych dla stali lufowych. Wyznaczył metodą porównawczą z wykorzystaniem dyfuzometru LFA 467 charakterystyki termiczne przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego wybranych stali lufowych.
- Wykonał obróbkę cieplną próbek ze stali DUPLEX 2205 w celu uzyskania różnych proporcji ferrytu do austenitu oraz określił ich proporcje za pomocą programu Image.
- Wykonał pomiary dyfuzyjności cieplnej, przewodności cieplnej, rozszerzalności cieplnej oraz ciepła właściwego próbek ze stali DUPLEX o różnej proporcji ferrytu do austenitu.
- Wykonał symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm z podziałem lufy na 6 stref, dla lufy wykonanej ze stali 30HN2MFA, 38HMJ oraz DUPLEX 2205.

- Wykonał symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm z podziałem lufy na 30 stref dla modelu lufy, której wewnętrzną powierzchnię pokryto warstwą chromu. Obliczenia wykonano dla lufy ze stali 30HN2MFA.
- Opracował dla wybranych aspektów metodykę wyboru danych wejściowych na potrzeby symulacji numerycznych, tzn. uwzględnienie efektów cieplnych przemian fazowych jedynie w charakterystyce termicznej przewodności cieplnej oraz porównanie wyników obliczeń wymiany ciepła w lufie dla stałych oraz zmiennych w funkcji temperatury parametrów termofizycznych stali lufowych.

Opracowana rozprawa liczy 145 stron i zawiera 93 pozycji literatury, w tym cztery pozycje współautorskie Doktoranta. W moim przekonaniu przedstawiona praca może stanowić rozprawę doktorską. Autor wniósł własny poważny wkład naukowy w rozwiązanie postawionego zagadnienia. Uzyskał wyniki na drodze analiz i badań eksperymentalnych i teoretycznych.

Rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej mgr. inż. Mateusza Zielińskiego w dyscyplinie „Inżynieria Mechaniczna” oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wynikiem rozprawy doktorskiej jest opracowanie oryginalnego rozwiązania problemu technicznego doboru stali na lufy broni.

## 2. Uwagi krytyczne.

Przy lekturze pracy nasuwają się następujące uwagi krytyczne:

1. Praca napisana jest zbyt rozwlekle, jest w niej wiele powtórzeń,
2. W oznaczeniach, zmienne nie potrzebnie są zaopatrzone w indeksy, skoro jest w pracy spis indeksów. Poza tym jednemu symbolowi można przypisać kilka znaczeń, które rozróżniają indeksy co skraca spis symboli
3. Uwiarygodnienie wyników badań oparte jest na porównaniu z literaturą tam gdzie to było możliwe. Brak jest danych opartych o eksperymentalny pomiar temperatury lufy podczas wystrzałów z broni. Zdaję sobie sprawę że jest to trudny i niebezpieczny eksperyment i nie zawsze możliwy

Wymienione uwagi krytyczne nie wpływają istotnie na wartość merytoryczną pracy, którą oceniam wysoko. Uważam że, praca wnosi poważny wkład do metod badań techniki zbrojeniowej, a jej wyniki są ważne dla praktyki inżynierskiej.

## 3. Wniosek końcowy

Doktorant wykazał się szeroką wiedzą w zakresie techniki zbrojeniowej, metalografii i wymiany ciepła oraz dobrą znajomością zagadnienia i stosowanych do jego rozwiązania adekwatnych metod badawczych. Wykazał dużo inwencji twórczej, jak też dużą samodzielność w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Cenne są jego wnioski i interpretacje wyników badań.

Stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Art. 187 (Dz. U. 2022, poz. 574 ze zm.) i może być podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora nauk inżynieryjno-technicznych w tej dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie do obrony i nadanie stopnia doktora nauk technicznych **mgr inż. Mateuszowi Zielińskiemu**