

Koszalin, dnia 24.11.2020 r.

Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
ul. Raławicka 15/17
75-620 Koszalin

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej kpt. mar. **mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO**

pt.: *Analiza i modelowanie odporności na przebicie okrętowych konstrukcji osłonowych*

Promotor rozprawy doktorskiej: **dr hab. inż. Wojciech JURCZAK, prof. AMW**

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: **dr inż. Bogdan SZTUROMSKI**

Podstawa opracowania recenzji: pismo **Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni** z dnia 01.10.2020 r. Pana dr hab. inż. **Ryszarda ZADRĄG, prof. AMW**.

1. Przedmiot recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO, o łącznej objętości 153 stron, składa się z dwóch głównych części. Pierwsza dotyczy *Opisu problemu naukowego, przegląd literatury, tezy i hipotezy*, która zawiera 6 punktów. Druga część dotyczy *Badań własnych* i zawiera 7 punktów. Praca zawiera 88 rysunków i 18 tabel. Ponadto, na początku rozprawy zamieszczono *Spis ważniejszych symboli, Spis rysunków i Spis tabel*, a w końcowej części pracy *Podsumowanie i wnioski końcowe* oraz *Spis literatury*, obejmującą 91 publikacji źródłowych, wśród których są książki, monografie, rozprawy, artykuły opublikowane w czasopiśmie naukowych i naukowo-technicznych, referaty zamieszczone w materiałach konferencyjnych, 2 raporty z prac badawczych, 8 stron internetowych oraz dokumenty instytucji normalizacyjnych. W spisie literatury są dwie współautorskie publikacje z udziałem Doktoranta.

2. Tematyka rozprawy

Jednym z ważnych problemów światowych są tzw. konflikty asymetryczne, których przykładem są ataki terrorystyczne. Istotą starć asymetrycznych jest, że pomimo znacznej przewagi militarnej strony poszkodowanej, nie decyduje się ona na jej wykorzystanie. Przykładem jest atak na amerykański okręt USS Cole w dniu 12.X.2000 r. w wyniku uderzenia w burtę motorówką wypełnioną materiałem wybuchowym, zginęło 17 a rannych zostało 39 marynarzy. Kolejnym przykładem zagrożeń terrorystycznych jest piractwo, które nasila się w ostatnim okresie. Wzrost piractwa oraz różnorodnych zagrożeń asymetrycznych zmusza do opracowania nowych środków zaradczych. Stosowanie przez piratów broni małokalibrowej powoduje, że konieczne jest opracowanie okrętowych konstrukcji osłonowych odpornych

na przebicie pociskiem. Pomimo, że próby zastosowania takich konstrukcji podejmowane są od dawna, np. wykorzystanie płyt pancernych, to dotychczas nie dawały one zadowalających wyników.

Rozprawa doktorska mgr inż. Radosława KICIŃSKIEGO dotyczy zagadnień budowy innowacyjnych konstrukcji osłon okrętowych, również z wykorzystaniem pośredniego medium wodnego, umieszczonego pomiędzy stalową osłoną dwupowłokową (dzieloną), a także stosowanie wkładek rykoszetujących oraz opracowanie metodyki projektowania i weryfikacji, z wykorzystaniem metody elementu skończonego, skutecznych osłon okrętowych odpornych na przebicie pociskiem małokalibrowym, z zastosowaniem dwuetapowej weryfikacji eksperymentalnej uzyskiwanych rozwiązań.

Złożoność problemu, jak i ich stochastyczny charakter zjawiska powodują, że uzyskanie skutecznej osłony zgodnie z wymaganiami jest bardzo trudne. Dlatego też niezbędne jest podejmowanie prac badawczych nad stworzeniem przydatnych w praktyce inżynierskiej podstaw metodycznych i narzędzi obliczeniowych wspomagających proces projektowania okrętowych konstrukcji osłonowych.

Rozwój podstaw teoretycznych nieliniowej mechaniki ośrodków ciągłych, mechaniki pękania (w tym opracowanie nowych modeli zniszczenia) i metod obliczeniowych a także wzrost mocy obliczeniowej komputerów powoduje, że opracowane modele są bardziej dokładne i pozwalają z większą dokładnością prognozować przebieg zjawisk fizycznych, a następnie obliczać stany naprężeń, przemieszczeń i odkształceń oraz inicjację i propagację pęknięć. Możliwe jest rozwiązywanie metodami numerycznymi przy zastosowaniu MES i SPH bardzo skomplikowanych zagadnień brzegowo-początkowych do których należy problematyka przebijania pancerzy stalowych jednolitych (jednowarstwowych) oraz dzielonych (wielowarstwowych), a także z wypełnieniem wodą.

W tym aspekcie rozprawa doktorska ma charakter nowatorski. Sposób prezentacji pracy jest bardzo oryginalny i ciekawy co wynika już ze spisu treści. O ważności tematyki podjętej w rozprawie świadczą liczne publikacje i prace badawcze nad odpornością balistyczną osłon pancernych prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na świecie.

Uważam, że wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO, ma duże znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne i jest w pełni uzasadniony.

3. Cele, hipoteza i zakres rozprawy

Podstawowym celem rozprawy mgr inż. Radosława KICIŃSKIEGO była:

Analiza możliwości projektowania konstrukcji osłonowych odpornych na przebicie pociskiem małokalibrowym z wykorzystaniem metody elementu skończonego.

Hipoteza: Symulacja numeryczna procesu szybkozmiennego - przebicie pancerza pociskiem w połączeniu z eksperymentem poligonowym, umożliwi projektowanie dowolnych konstrukcji osłonowych do stosowania w okrętownictwie. Analiza tych możliwości pozwoli na optymalizację grubości poszycia oraz wyznaczenia kątów, dla których następuje rykoszet.

Celem pobocznym było: Wyznaczenie wpływu wypełnienia wodnego na kuloodporność badanych konstrukcji osłonowych.

Opracowano również obszerny zakres rozprawy:

1. Przedstawiono złożoność zjawiska przebicia pancerza stalowego pociskiem małokalibrowym oraz stosowanie uproszczeń inżynierskich podczas modelowania i obliczeń.
2. Opisano wybrane modele materiałów sprężysto-plastycznych oraz kryteria zniszczenia.
3. Przeprowadzono eksperyment na strzelnicy przebijania wybranych próbek ze stali austenitycznej 1.3964 oraz stali kadmowej zwykłej wytrzymałości.
4. Przeprowadzono symulację przebijania próbek metodami numerycznych przy zastosowaniu metod: metody elementu skończonego (MES) i metody bezsiatkowej Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) (dla próbek wypełnionych wodą).
5. Zaproponowano innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne osłon balistycznych oraz przeprowadzono analizę ich odporności na przebicie pociskiem małokalibrowym.
6. Opisano zjawisko rykoszetu pocisku oraz zbadano dla jakich kątów ostrzału powstaje rykoszet podczas ostrzału próbek ze stali 1.3964, a także zaproponowano zastosowanie wstawek rykoszetujących, w celu zwiększenia odporności na przebicie.
7. Badania wpływu wypełnienia wodnego osłon na kuloodporność i optymalizacja ich grubości.

Jednym z ważniejszych etapów na drodze do osiągnięcia postawionego celu było przyjęcie odpowiedniej postaci równania ruchu obiektu, równań konstytutywnych, kryterium pęknięcia oraz wyznaczenie stałych w tych modelach dla stali 1,3964. Ponadto, sprawdzenie poprawności zastosowania odpowiedniego rodzaju i rozmiaru elementu skończonego oraz dobór kroku czasowego w opisie przyrostowym. Przedstawiono również wpływ wybranych parametrów wejściowych do procesów szybkozmiennych w programach CAE na otrzymywane wyniki. W rozprawie zwrócono uwagę na te parametry, które należy uwzględnić podczas rozwiązywania zadań inżynierskich z wykorzystaniem MES.

Moim zdaniem cele i hipoteza zostały sformułowane prawidłowo, natomiast zakres rozprawy został określony i przedstawiony właściwie. Na szczególne podkreślenie zasługuje jasna pod względem metodologicznym koncepcja rozprawy, która obejmuje zagadnienia modelowania, analiz numerycznych MES i SPH oraz weryfikację eksperymentalną otrzymanych rozwiązań.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO obejmuje dwie części. Część pierwsza (*Opis problemu naukowego, przegląd literatury, tezy i hipotezy*) zawiera rozdziały 1-6, a część druga (*Badania własne*) - rozdziały 7-12. Są one powiązane ze sobą merytorycznie tworząc spójną, zwartą całość. We *Wstępie* Autor rozprawy przedstawia w sposób ogólny problematykę rozprawy.

W rozdziale drugim rozprawy zatytułowanym *Cel i zakres pracy* najpierw określono cel główny i cel poboczny oraz hipotezę, która wymaga sprawdzenia. Istotą hipotezy jest sprawdzenie czy możliwe jest zastosowanie symulacji numerycznej procesu szybkozmiennego do projektowania dowolnych konstrukcji osłonowych stosowanych w okrętownictwie. Dalej opisano zakres rozprawy, który obejmuje zagadnienia przebicia pociskiem małokalibrowym, zjawisko rykoszetu oraz wpływ wypełnienia wodnego osłon na kuloodporność.

W rozdziale trzecim *Procesy szybkozmiennie w programach CAE* najpierw przedstawiono problematykę zastosowania MES do rozwiązywania zadań inżynierskich a następnie opracowano autorski algorytm rozwiązywania zadań MES, w którym zastosowano dwuetapową weryfikację rozwiązań. Pierwsza dotyczy poprawności przyjętej geometrii, poprzez porównanie częstości drgań własnych modelu i obiektu, a druga dokładności obliczeń numerycznych poprzez ich porównanie z wynikami badań eksperymentalnych. Do analizy procesu prawidłowo zastosowano metodę krok po kroku. Wynika to z silnie nieliniowego charakteru zjawisk. Występuje tutaj zarówno nieliniowość geometryczna jak i fizyczna, a proces przebicia pociskiem jest procesem szybkozmiennym. W takich przypadkach istotnego znaczenia nabierają dobór rozmiarów elementu skończonego podczas dyskretyzacji oraz dobór odpowiedniego kroku czasowego, które zostały prawidłowo analizowane. Również prawidłowo dobrano postać równania ruchu obiektu, które zawiera również składnik dynamiczny i tłumienia. Przy czym do opisu macierzy tłumienia [C] przyjęto tzw. tłumienie proporcjonalne Rayleigha, które zależy od liniowej kombinacji macierzy mas i macierzy sztywności. Złożoność zagadnienia wynika nie tylko z nieliniowości i szybkozmienności zjawisk, ale również z występowaniem dużej liczby czynników, związanych z badanym obiektem (osłoną i pociskiem).

Rozdział czwarty *Tworzenie zadań inżynierskich* opisano bardzo ważne zagadnienia dotyczące uproszczenia zadania na etapie tworzenia geometrii, doboru własności materiałowych, warunków brzegowych i obciążenia. Rozdział podzielono na 5 punktów. W pkt. 4.1. *Rodzaje uproszczeń geometrii* analizowano wybrane uproszczenia stosowane w modelowaniu konstrukcji np. pomijanie zaokrągleń, otworów oraz wiązań, które nie mają wpływu na wytrzymałość konstrukcji. Wykazano, na przykładzie obliczeń teownika zakrzywionego, że przez odpowiedni dobór modelu możliwe jest znaczne skrócenie czasu obliczeń, przy zachowaniu nieistotnej różnicy pomiędzy obliczonymi wartościami naprężeń. Jest to bardzo ważny problem pozwalający znacznie zmniejszyć liczbę stopni swobody analizowanego obiektu.

Dopuszczalne uproszczenia są również możliwe na etapie modelowania własności mechanicznych materiałów stosowanych do obliczeń MES. W pkt. 4.2 (*Pozyskiwanie charakterystyk materiałowych*) wyczerpująco opisano sposób określania charakterystyki materiałowej, w postaci zależności naprężenie nominalne - odkształcenie nominalne. Obecnie, do tego celu konieczne jest wykonanie badań eksperymentalnych, na dedykowanych maszynach wytrzymałościowych, zgodnie z opracowanymi metodykami i normami. W próbie jednoosiowego rozciągania otrzymuje się zależność siły od wydłużenia próbki, które następnie wykorzystuje się do obliczenia naprężeń nominalnych σ i odkształceń nominalnych ε . Po sporządzeniu charakterystyk σ - ε możliwe jest wyznaczenie parametrów charakteryzujących badany materiał, np. granica proporcjonalności, granica sprężystości, granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i naprężenia zrywające.

Kolejny punkt 4.3 *Plastyczna charakterystyka stali* dotyczy wyznaczania początkowej granicy plastyczności oraz charakterystyki naprężenie rzeczywiste odkształcenie rzeczywiste, która jest wykorzystywana w obliczeniach numerycznych i istotnie różni się od charakterystyki inżynierskiej. Bardzo dużym problemem podczas opracowywania takiej charakterystyki jest powstawanie szyjki. Autor zaproponował uproszczenie polegające na ekstrapolacji wyników do momentu pojawienia się szyjki.

W pkt. 4.4 *Proporcjonalna charakterystyka stali* omówiono problematykę wyznaczania modułu Younga oraz przedstawiono kilka metod jego wyznaczania.

Kolejnym etapem modelowania materiału, opisanym w pkt. 4.5 *Model materiału*, jest przyjęcie odpowiedniego modelu opisującego chwilowe naprężenia uplastyczniające materiał w zależności od warunków wymuszenia oraz wyznaczenie stałych w tym modelu. Model ten jest wykorzystywany w obliczeniach numerycznych metodą elementu skończonego. Główną uwagę

skupiono na modelach nieliniowych zależnych od odkształceń, prędkości odkształceń i temperatury. Szczegółowo opisano modele uproszczone, tzw. modele dwuliniowe i wieloliniowe. Wyczerpująco opisano sposoby określania wymaganych właściwości materiałowych. Obecnie, do tego celu konieczne jest wykonanie badań eksperymentalnych, na dedykowanych maszynach wytrzymałościowych, zgodnie z opracowanymi metodykami. Określenie wpływu prędkości odkształceń (dynamiki) i temperatury na naprężenia uplastyczniające wymaga wykonania dodatkowych badań eksperymentalnych.

Bardzo ważnym problemem omawianym w pkt. 4.6 jest opracowanie kryteriów zniszczenia wykorzystywanych w programach CAE. Ze względu na dużą czasochłonność obliczania lokalnego stanu naprężenia w postaci tensora naprężeń słusznie zaproponowano skalarny opis kryterium w postaci odkształcenia plastycznego na początku pęknięcia jako funkcji stanu naprężeń (funkcją trójosiowości naprężeń) i prędkości odkształceń. W kolejnych podpunktach omówiono problematykę wyznaczania wartości współczynnika trójosiowości naprężeń, kryterium zniszczenia plastycznego, kryterium ścinania, kryterium zniszczenia Johnson'a-Cook'a oraz ewolucję zniszczenia.

Rozdział piąty dotyczy wybranych metod analitycznych stosowanych do obliczeń panczerzy stalowych. Przedstawiono modele klasyczne (pkt. 5.1) oparte na równaniu energii, z którego dla znanej prędkości pocisku można obliczyć wymaganą grubość osłony. W kolejnym punkcie 5.2 opisano model obliczeniowy do oszacowania odporności balistycznej panczerzy stalowych. Model wyprowadzono z twierdzenia o pędzie środka masy układu materialnego. Ostatecznie otrzymuje się wzór na wartość początkowej prędkości pocisku w chwili zderzenia, przy której nie nastąpi przebicie osłony o założonej grubości. Po przekształceniu równania można obliczyć minimalną grubość osłony dla zadanej prędkości pocisku. Przeprowadzone przez Autora obliczenia, dla pocisków o różnych kalibrach, wykazują dużą zbieżność z wynikami obliczeń numerycznych.

W rozdziale szóstym przedstawiono modelowanie cieczy w obliczeniach numerycznych. Wynika to z zamiaru analizy osłon z wypełnieniem ich wnętrza wodą, w celu zwiększenia kuloodporności. Złożoność modelowania i analiz numerycznych takich osłon wynika z połączenia dwóch różnych ośrodków. Dlatego też Autor prawidłowo zastosował do modelowania płynów metodę Smooth Particle Hydrodynamics (SPH), która jest metodą bezsiatkową. Kolejnym problemem związanym z zastosowaniem dwóch metod SPH i MES jest zastosowanie odpowiednich algorytmów kontaktowych. W rozprawie opisano trzy algorytmy kontaktowe: Master-Slave, płynne przejście i podejście hybrydowe.

W podsumowaniu części pierwszej stwierdzam, że jest ona opracowana bardzo starannie, kompleksowo i wyczerpująco, co świadczy o bardzo dobrym opanowaniu przez Doktoranta podstaw mechaniki nieliniowej, mechaniki pęknięcia oraz metody elementu skończonego, metody Smooth Particle Hydrodynamics i metod numerycznych.

W części drugiej *Badania własne* zrealizowano obszerny zakres badań. W rozdziale 7 określono skład chemiczny i własności mechaniczne stali 1.3964 (X2CrNiMnMoNb 21-16-5-3). Wykorzystując wyniki rozciągania na maszynie wytrzymałościowej próbek okrągłych pobranych wzdłuż i prostopadle do kierunku walcowania opracowano charakterystyki nominalne, charakterystyki plastyczne, rzeczywiste oraz dla przyjętego modelu materiałowego Johnson'a-Cook'a (J-C). Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autor opracował program komputerowy w środowisku MATLAB, który na podstawie statycznej próby rozciągania, znacznie ułatwia i przyspiesza wykonanie wymaganych obliczeń stałych materiałowych A, B i n w modelu naprężeń uplastyczniających Johnson'a - Cook'a.

Kolejnym etapem było wyznaczenie kryterium zniszczenia stali austenitycznej 1.3964 (pkt. 7.2). Autor, ze względu na przyjęcie modelu J-C do opisu naprężeń uplastyczniających, słusznie

zapropował do opisu zniszczenia materiału model J-C, uproszczony o człon temperaturowy. W celu wyznaczenia wartości kryterium zniszczenia przeprowadzono badania poligonowe, które polegały na przestrzeliwaniu próbek płaskich o grubości 4-10 mm, za pomocą pocisku o kalibrze 7,62 mm z rdzeniem stalowym. W tym celu zbudowano specjalistyczne stanowisko badawcze, na którym mierzono prędkość pocisku przed i za przestrzeliwaną próbką. Łącznie przestrzeliwano 37 próbek o różnej liczbie dystansów i wypełnienia oraz dla różnych kątów ostrzału. Dodatkowo przeprowadzono strzelanie referencyjne do 17 próbek wykonanych ze stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości.

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów oraz wykonanych zdjęć możliwe było dokonanie modelowania pocisku z uwzględnieniem jego odkształcenia (pkt. 7.3). Po przeprowadzeniu symulacji numerycznych dla różnych modeli materiałowych jako ciało: sprężyste, sprężysto-plastyczne oraz sprężysto-plastyczne z kryterium zniszczenia, wyniki symulacji porównano z wynikami pomiarów eksperymentalnych. Najlepszą zgodność wyników uzyskano dla przypadku trzeciego i dlatego słusznie taki model przyjęto do dalszych obliczeń. Dla takiego modelu materiałowego, w pkt. 7.4, dobrano stałe materiałowe w modelu plastycznym J-C i modelu zniszczenia J-C dla stali austenitycznej 1.3964 tak, aby wyniki symulacji korelowały z wynikami eksperymentu. W tym celu opracowano model próbki oraz model pocisku, z rdzeniem stalowym. Różnice między wynikami wynosiły od 0,15% do 22%. Kolejnym problemem, który rozwiązano, było wyznaczenia współczynnika tarcia. Jest to obok modelu materiałowego kolejny model, który wyznacza się eksperymentalnie. W analizowanym przypadku, eksperymentalne wyznaczenie współczynnika tarcia dla tak silnie nieliniowego i szybkozmiennego zjawiska, jest bardzo skomplikowane. Dlatego też Autor słusznie zaproponował metodę pośrednią, kolejnego doboru wartości współczynnika tarcia tak, aby wyniki symulacji numerycznych były zbieżne z wynikami eksperymentu. W przypadku blach jednolitych (4, 6 i 8 mm) do symulacji nie było wymagane wyznaczenie współczynnika tarcia. Natomiast, dla próbek łączonych o grubości 10 mm (6+4), obliczony współczynnik tarcia wynosi $\mu=0,5$.

Podobne trudności występują podczas modelowania kontaktu ciał odkształcalnych, z wykorzystaniem kryterium zniszczenia. Otrzymano dokładność wyników na poziomie 22%.

Badania numeryczne uzupełniono tzw. analizą wrażliwości, czyli określenie wpływu poszczególnych parametrów symulacji na wynik obliczeń, w tym przypadku prędkość pocisku za próbką o grubości 4 mm. Badane parametry zmieniano w zakresie $\pm 50\%$. Uzyskane wyniki obliczeń pozwoliły określić wartości parametrów, dla których uzyskano zgodność wyników prędkości pocisku za próbką z symulacji i z eksperymentu. Stwierdzono również, że największy wpływ na zmianę prędkości mają parametry: A, B i n, a najmniejszy wpływ ma parametr C. Uzyskanie takiej informacji jest ważne dla potrzeb dokładności wyznaczania wartości poszczególnych parametrów materiałowych. Również duży wpływ ma zmienność przemieszczenia przy zniszczeniu u_{failure} i współczynnik tarcia. Natomiast, mniejszy wpływ na wyniki obliczeń mają parametry w modelu zniszczenia.

Rozdział 7 dotyczy *Wpływu kąta padania pocisku oraz rykoszetowania*. Najpierw opisano zjawisko rykoszetowania oraz podano niezbędne definicje. Następnie, w ZMT Tarnów wykonano badania poligonowe (pkt. 9.2), w celu wyjaśnienia wpływu kąta ostrzału na przebijalność oraz na tor ruchu pocisku. Opracowano specjalne stanowisko badawcze z ruchomym uchwytem służącym do ustawiania próbki pod wymaganym kątem. Stanowisko badawcze wyposażono również w kamery do rejestracji procesów szybkozmiennych. Strzelania do próbek o grubości 4 mm, wykonano pod kątem $0^\circ - 35^\circ$. Przeprowadzono również symulacje, które pozwoliły ustalić, że w zakresie kątów $60^\circ - 75^\circ$ pociski powinny rykoszetować bądź zmieniać trajektorię ruchu pocisku, ale nie powodować penetracji próbki. Na tej podstawie

zmodyfikowano metodykę badań oraz wyposażono stanowisko w kamerę Phantom v1612 z możliwością rejestracji 50000 klatek/s. Badania i rejestrację wyników strzelania do próbek ze stali austenitycznej 1.3964 o grubości 6 mm wykonano dla trzech kątów 45° , 60° i 65° . Dla porównania wykonano strzelania do próbek ze stali kadłubowej typu A. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że pocisk rykoszetuje przy kątach 60° i 65° .

W pkt. 9.3. *Wyniki symulacji przebicia pociskiem pod kątem* wykonano obliczenia numeryczne ostrzału w zakresie kątów 0° - 80° , próbek o grubości 4 i 6 mm. Wyniki symulacji pozwalają na analizę rozkładu naprężeń oraz stanu deformacji próbki i pocisku, a także określenie ruchu pocisku po kontakcie z próbką. Określono wartości kątów przy których występują różne przypadki ruchu pocisku. Przykładowo w zakresie kątów 70° - 85° pocisk rykoszetuje od badanej powierzchni, przy czym występuje nieznaczna deformacja próbki, a pocisk traci przy tym niedużą ilość energii. Wyniki symulacji potwierdziły również poprawność określonych parametrów materiałowych. Opracowana metodyka obliczeń numerycznych (aplikacja) zjawiska przebijania bądź rykoszetu może być z powodzeniem zastosowana do prognozowania toru ruchu pocisku nie tylko podczas ostrzału osłon pod dowolnym kątem, ale również może być użyta w innych dziedzinach np. kryminalistyce.

Rozdział 10 dotyczy *Modelowania okrętowych konstrukcji osłonowych*. Zaproponowano różne rozwiązania konstrukcyjne osłon, zapewniających uzyskanie największej kuloodporności przy możliwie minimalnej masie. Na podstawie symulacji i badań eksperymentalnych przeprowadzonych w poprzednich rozdziałach stwierdzono, że odległość pomiędzy płaszczyznami osłon powinna być w zakresie 0-30 mm, natomiast kąty pochylenia elementów wewnętrznych powinny być w zakresie 45° - 70° , gdyż wówczas następuje największy spadek prędkości pocisku (największa strata energii). Analiza odporności na przebicie nowo zaprojektowanych konstrukcji została przeprowadzona metodą elementu skończonego. Opracowana metodyka pozwala określić kuloodporność projektowanych osłon. Stwierdzono, że duże znaczenie ma struktura wewnętrzna osłony. Spośród proponowanych struktur tylko dwie spełniały założone wymagania, tj. struktura plastra miodu oraz struktura zawierająca wstawki pod kątem 45° - 65° , jednak struktura w postaci plastra miodu jest bardziej złożona technologicznie niż wstawki wykonane pod kątem. Dodatkową zaletą osłon zawierających wstawki wykonane pod kątem jest możliwość umieszczenia w pustych przestrzeniach wody, która zwiększa kuloodporność. Również wykazano, że próbki dzielone mają większą odporność na przebicie pociskiem małokalibrowym, niż próbki jednolite.

W rozdziale 11 *Badanie wpływu wypełnienia konstrukcji osłon wodą na ich kuloodporność* przeprowadzono badania eksperymentalne dla próbek o grubości 4 mm wykonanych ze stali 1.3964 pomiędzy którymi znajdowała się warstwa wody o grubości: 140, 40 i 20 mm oraz porównano z wynikami przebicia osłon bez wypełnienia wodą. Stwierdzono, że wypełnienie wodą wpływa na spadek prędkości pocisku po przebicciu. Wyniki eksperymentalne porównywano z wynikami obliczeń numerycznych przebicia pociskiem małokalibrowym próbek warstwowych wypełnionych wodą. Wypełnienie wodą pozwoliło zmniejszyć grubość blachy, przy czym opracowana aplikacja numeryczna może być pomocnym narzędziem do weryfikacji wpływu wypełnienia wodą na kuloodporność projektowanej osłony, bez konieczności prowadzenia długotrwałych i kosztownych badań eksperymentalnych.

Pkt. 12 zatytułowany *Podsumowanie i wnioski końcowe*, został opracowany prawidłowo. Wnioski końcowe zostały przez Autora przedstawione w sposób metodyczny i wskazują, że cele pracy zostały osiągnięte, hipoteza została sprawdzona, zaś zakres pracy w pełni zrealizowany.

Dokonując merytorycznej oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO stwierdzam, że w rozprawie tej podjęto próbę rozwiązania ważnego i trudnego problemu naukowego mającego duże znaczenie praktyczne. Rozwiązanie dotyczące modelowania i analizy

odporności na przebicie okrętowych konstrukcji osłonowych prezentowane w rozprawie jest starannie przemyślane, wszechstronnie umotywowane i w pełni dojrzałe. Zasluguje ono na bardzo wysoką ocenę i powinno być wyróżnione. Jestem pełen uznania dla podejścia Autora do analizowanych w rozprawie zagadnień. Jest to podejście systematyczne, kompetentne i wnikliwe. Uważam, że Autor jest doskonale przygotowany do podjęcia dalszej samodzielnej pracy naukowej i badawczej. Wyrażam przekonanie, że rozprawa doktorska mgr inż. Radosława KICIŃSKIEGO wnosi istotny wkład naukowy w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

5. Uwagi szczegółowe do pracy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Radosława KICIŃSKIEGO jest napisana w sposób jasny, zwarty i uporządkowany. Struktura i układ pracy, a także jej strona edytorska są właściwe i sprzyjają zrozumieniu przez czytelnika treści poszczególnych rozdziałów. Oceniam, że rozprawa jest napisana bardzo dobrze zarówno pod względem merytorycznym, jak i językowym. Na szczególne podkreślenie zasługuje logika wywodu oraz oszczędny, a jednocześnie bardzo precyzyjny język stosowany w rozprawie. Wszystkie wykonane badania zarówno eksperymentalne jak i symulacje numeryczne są bardzo dobrze opisane a otrzymane wyniki wyczerpująco udokumentowane. Mimo to w tekście rozprawy zdarzają się – na szczęście bardzo nieliczne – drobne pomyłki edytorskie tzw. literówki oraz sformułowania wywołujące wątpliwości. Dla przykładu:

- 1) W pracy występuje szereg drobnych błędów edytorskich tzw. literówek (brak lub nadmiar przecinków, spacji, kropek, zamiast litery a powinno być ą, zamiast e powinno być ę, np. str 135 - jest predkość, zamiast s powinno być ś i odwrotnie, lub zamiast c powinno być ć i odwrotnie itp.), które przekazałem Autorowi.
- 2) W spisie literatury stosowano niejednolite zapisy, np. poz. 5 Nazwisko przecinek pierwsza litera imienia kropka i tytuł książki lub artykułu, w innym miejscu np. poz. 9 po imieniu brak kropki lub poz. 35 po nazwisku brak przecinka.
- 3) Zaproponowany sposób wyznaczania stałych materiałowych w modelu plastycznym J-C na podstawie wyników badań rozpoznawczych jest prawidłowe, natomiast korekta wartości tych stałych na podstawie wyników symulacji numerycznych tak aby uzyskać lepszą zbieżność wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych jest dyskusyjne, gdyż w pewnym sensie podważa się dokładność badań eksperymentalnych. Przy czym z obliczeń wynika, że najlepszą zgodność uzyskano dla wartości uzyskanych z eksperymentu.
- 4) W pracy przyjęto liniowy model tłumienia, w którym macierz tłumienia jest proporcjonalną kombinacją macierzy mas i macierzy sztywności: $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$. Nie podano w jaki sposób wyznaczono współczynniki tłumienia α i β oraz ile one wynoszą. W przyszłości powinno się również rozważyć wpływ na tłumienie wartości odkształceń i prędkości odkształceń występujących w obiekcie (osłona-pocisk) podczas przebijania. W przypadku procesów szybkozmiennych człony tłumienia związane z prędkością odkształceń mają istotny wpływ na wyniki obliczeń.
- 5) Nie podano ile wynosi i jak się zmienia prędkość odkształceń materiału osłony podczas przebijania osłony. Na str. 40 przyjęto stałą zredukowaną prędkość odkształceń, która wynosi $\dot{\epsilon}_z^{(VP)} = 10 \text{ s}^{-1}$. Natomiast nie podano ile wynosi stała $\dot{\epsilon}_0^{(VP)}$ (próg prędkości odkształcenia). Według moich obliczeń wartość maksymalnych zredukowanych odkształceń plastycznych podczas przebicia pociskiem z prędkością około 840 m/s jest rzędu $\dot{\epsilon}_z^{(VP)} = 10^6 \text{ s}^{-1}$. W takim przypadku wpływ prędkości na stan chwilowych naprężeń uplastyczniających materiał

osłony jest duży i powinien być zastosowany człon potęgowy $(1 + \dot{\epsilon}_{eq}^{(VP)})^{n2}$, gdzie wykładnik $n2$ jest współczynnikiem wrażliwości materiału na prędkość odkształceń. Natomiast w przyjętym modelu J-C, drugi człon $\sigma(\dot{\epsilon}_z^{(VP)}) = [1 + C \ln(\dot{\epsilon}_z^{(VP)} / \dot{\epsilon}_0)]^{n2=1}$ ma współczynnik $n2=1$, zatem jego wpływ na naprężenia uplastyczniające przy założonej prędkości odkształceń jest niewielki i wynosi około $\sigma(\dot{\epsilon}_z^{(VP)}) = [1 + C \ln(\dot{\epsilon}_z^{(VP)} / \dot{\epsilon}_0)] = [1 + 0,006 \ln(10 / \dot{\epsilon}_0)] = 1,048$, zatem przyrost naprężeń uplastyczniających wynosi $\Delta\sigma_p = 40$ MPa. Natomiast, przyjmując $\dot{\epsilon}_z^{(VP)} = 10^5 \div 10^6 \text{ s}^{-1}$, wówczas $\sigma(\dot{\epsilon}_z^{(VP)}) = [1 + 0,006 \ln(100000 \div 1000000 / \dot{\epsilon}_0)] = 1,062 \div 1,075$, zatem przyrost naprężeń uplastyczniających wynosi $\Delta\sigma_p = 51,4 \div 62,2$ MPa. Czyli w modelu J-C wpływ drugiego członu jest niewielki, nawet przy wzroście zredukowanej prędkości odkształceń 10000 razy.

- 6) Analizę wrażliwości objęto jedynie wpływ stałych materiałowych, natomiast nie udokumentowano wpływu liczby elementów skończonych i ich współczynnika kształtu oraz funkcji interpolacyjnych. Czy w tym ujęciu otrzymany model można traktować jako efektywny, a otrzymane wyniki, głównie naprężeń jako w pełni reprezentatywne?

Warto zaznaczyć, że powyższe wątpliwości mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie umniejszają wysokiej wartości rozprawy. Mogą być wykorzystane przez Autora w dalszych badaniach.

6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO dotyczy zagadnień modelowania i analizy odporności na przebicie osłon okrętowych. Problematyka podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej, koncentruje się na wyjaśnieniu zjawisk zachodzących podczas przebijania pociskiem małowalibrowym konstrukcji osłonowych, a także na opracowaniu metodyki umożliwiającej projektowanie i weryfikację kuloodporności osłon okrętowych oraz opracowaniu innowacyjnych konstrukcji takich osłon, wraz z ich optymalizacją, zdolnych do skutecznej osłony nawet podczas wielokrotnego ostrzału.

Autor rozprawy podjął się rozwiązania skomplikowanego problemu o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym. Sposób rozwiązania tego problemu zaproponowany w rozprawie świadczy o szerokiej interdyscyplinarnej wiedzy Autora rozprawy i umiejętności samodzielnego podejmowania złożonych zadań naukowych i badawczych.

Do wybranych najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam między innymi:

- 1) Opracowanie aplikacji w środowisku MATLAB do wyznaczenia stałych materiałowych dla stali austenitycznej 1.3964 w modelu konstytutywnym naprężeń uplastyczniających Johnson'a-Cook'a oraz wyznaczenie stałych w przyjętym modelu pęknięcia Johnson'a-Cook'a.
- 2) Budowa stanowiska oraz wykonanie wymaganych badań przestrzeliwania pociskiem małowalibrowym, pod różnym kątem, osłon jednolitych i warstwowych o różnej grubości blachy i wykonanych z różnych materiałów.
- 3) Budowa stanowiska oraz wykonanie wymaganych badań rykoszetu pocisku małowalibrowego osłon ze stali austenitycznej 1.3964 oraz stali kadłubowej typu A.
- 4) Opracowanie metodyki umożliwiającej projektowanie oraz weryfikację kuloodporności osłon okrętowych na przebicie pociskiem małowalibrowym przy zastosowaniu metody elementu skończonego (MES) oraz Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)

w przypadku modelowania osłon wypełnionych wodą. Opracowanie aplikacji numerycznej według proponowanej metodyki i przeprowadzenie niezbędnych symulacji numerycznych.

- 5) Wyjaśnienie zjawisk zachodzących podczas przebijania pociskiem małokalibrowym konstrukcji osłonowych, również wypełnionych wodą oraz zjawiska rykoszetu, wraz z wyznaczenia kątów, dla których rykoszet następuje.
- 6) Opracowanie innowacyjnych konstrukcji osłonowych, wraz z optymalizacją grubości, w postaci plastra miodu oraz osłon zawierających wstawki i łączniki oraz wyjaśnienie ich wpływu na kuloodporność.
- 7) Praktyczna weryfikacja otrzymanych wyników.

Po analizie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO nt. *Analiza i modelowanie odporności na przebicie okrętowych konstrukcji osłonowych z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie złożonego problemu naukowego. Rozprawa ta spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami). Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława KICIŃSKIEGO do publicznej obrony. Jednocześnie biorąc pod uwagę zakres rozprawy i bardzo wysoki poziom rozwiązania analizowanych zagadnień nieliniowych wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.*

Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka