

dr hab. inż. Stanisław Józwiak – prof. WAT
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Nowych Technologii i Chemii
Wojskowa Akademia Techniczna
e-mail: stanislaw.jozwiak@wat.edu.pl

Warszawa, dn.20.11.2020r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego

pt.

Analiza i modelowanie odporności na przebicie okrętowych konstrukcji osłonowych

wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Akademii Marynarki Wojennej z dnia 01.10.2020r.

Zakres tematyczny pracy.

Przedłożona do recenzji, w postępowaniu o nadanie stopnia doktora, dysertacja Pana kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego dotyczy niezwykle aktualnego problemu związanego z coraz większym rozprzestrzenianiem się najróżniejszego rodzaju zagrożeń, związanych z użyciem szybkostrzelnej broni automatycznej, w tym z działaniami wszelkiego rodzaju grup terrorystycznych wyposażonych w broń małokalibrową, atakujących coraz częściej obiekty niemilitarne pozbawione skutecznej ochrony balistycznej. Doskonałym przykładem tego typu zagrożeń są pirackie ataki z użyciem broni na statki, których liczba w samej Azji, wg według ostatniego półrocznego raportu Centrum Wymiany Informacji (ISC) ReCAAP, wzrosła z 28 przypadków w pierwszej połowie 2019 roku do 51 odnotowanych zdarzeń, w tym samym okresie roku 2020. Dlatego też wszelkie próby działań, mających na celu zwiększenie poziomu ochrony ludzi jak i infrastruktury, zarówno czynnej jak i biernej są obecnie jednym z priorytetowych działań związanych z organizacją odpowiednich działań systemowych, jak i w obszarach inżynierskich związanych z konstruowaniem i opracowywaniem skuteczniejszych systemów ochrony, w tym osłon balistycznych.

W ten ostatni obszar doskonale wpisuje się rozprawa mgr inż. Radosława Kicińskiego, podejmująca próbę poprawy odporności balistycznej konstrukcji morskiej zbudowanej z austenitycznej stali 1.3964 (AISI 350), nie będącej z założenia materiałem balistycznym, ale szeroko wykorzystywanym do budowy konstrukcji nośnych i poszycia jednostek pływających.

Analiza formalna i merytoryczna rozprawy.

Rozprawa doktorska Pana kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego ma układ klasyczny, zaczynający się od spisu symboli użytych w pracy, spisu rysunków, krótkiego wprowadzenia w stan zagadnienia, podsumowanego określeniem głównego celu badawczego oraz zakresu przedstawionej pracy, który został rozwinięty w kolejnych rozdziałach.

W części literaturowej Doktorant trafnie zwrócił uwagę na progresywnie rozwijającą się technikę analiz numerycznych, wykorzystywanych współcześnie na wszystkich etapach procesu projektowania, obliczania oraz wytwarzania konstrukcji inżynierskich, proponując algorytm postępowania na drodze do osiągnięcia założonego celu badawczego, wskazując jednocześnie na konieczność uwzględniania szeregu różnorodnych, często przeciwstawnych wymagań, uwzględniających charakterystyki materiałowe zależne od stanu naprężenia i stanu odkształcenia, charakteru zmiany obciążeń i ich wpływie na proces modelowania za pomocą metody elementów skończonych MES. Kolejne rozważania literaturowe zostały poświęcone wyznaczeniu parametrów wytrzymałościowych i plastycznych materiału, w ujęciu naprężenia inżynierskiego oraz rzeczywistego, pozwalającego na rozwiązanie równania konstytutywnego, przedstawiającego charakterystykę naprężenie – odkształcenie badanego tworzywa konstrukcyjnego w szerokim zakresie prędkości odkształcenia. Recenzowany przedstawił trzy spośród wielu modeli pozwalających na określenie właściwości mechanicznych w zakresie dużych prędkości odkształcania, skupiając się na najbardziej popularnym, szeroko wykorzystywanym równaniu Johnsona-Cooka, a także scharakteryzował kryteria zniszczenia materiału w ujęciu modelowym, koncentrując się, ze względu na trójosiowy stan naprężenia i odkształcenia oraz fakt występowania lokalnych, gwałtownych przyrostów temperatury w materiale poddanym penetracji pocisku, na kryterium zniszczenia Johnsona-Cooka, uwzględniającym wszystkie wyżej wymienione czynniki. Część literaturową pracy Doktorant zakończył opisem modelu szacowania odporności balistycznej jednorodnej płyty stalowej, wykorzystującego zasadę zachowania energii, zwracając jednocześnie uwagę na jej niedoskonałości w przypadku braku całkowitej penetracji pocisku. Przewidując także wykorzystanie cieczy w konstrukcji proponowanego zabezpieczenia balistycznego zwrócił również uwagę na całkowicie odmienny sposób modelowania zachowania się pocisku podczas przemieszczania się w ośrodku ciągłym.

W części doświadczalnej pracy, kpt. mar. mgr inż. Radosław Kiciński w sposób systematyczny, dążąc do osiągnięcia postawionego celu wyznaczył na podstawie inżynierskiej krzywej rozciągania parametry wytrzymałościowe badanej stali 1.3964, pozwalające na wyznaczenie rzeczywistej charakterystyki naprężenie-odkształcenie w zakresie odkształcenia

liniowego, czyli do momentu tworzenia się szyjki w odkształcanym w jednoosiowym stanie naprężenia materiale, w celu aplikacji uzyskanych wyników do rozwiązania równania Johnsona-Cooka. W tym etapie pracy, Doktorant wykorzystał także własną, stworzoną w środowisku MATLAB procedurę, pozwalającą na opisanie danych eksperymentalnych krzywą ułatwiająca wyznaczenie stałych materiałowych modelu Johnsona-Cooka, służących do obliczeń parametrów balistycznych oraz opisu efektów penetracji pocisku w badanym materiale. Poprawność przedstawionego opisu modelowania procesu niszczenia płyty stalowej podczas ostrzału pociskiem została zweryfikowana wielowariantowymi, poligonowymi testami balistycznymi z wykorzystaniem amunicji 7,62x54 mm R (ŁPS) z rdzeniem stalowym. Przeprowadzone badania balistyczne pozwoliły na ocenę poprawności wykorzystanych modeli oraz przyjętych danych wejściowych poprzez porównanie spadków prędkości pocisku za przestrzeliwaną próbką z symulacjami numerycznymi. Recenzowany pokusił się także o próbę oceny wpływu zmiany poszczególnych parametrów wykorzystanego równania J-C oraz modelu zniszczenia na podstawowy parametr oceny zdolności pochłaniania energii kinetycznej pocisku jakim jest jego prędkość za przestrzeliwaną próbką.

Zdając sobie sprawę, iż badana stal nie jest typowym materiałem, przeznaczonym do budowy osłon balistycznych Recenzowany poprzez próby zwiększenia efektywnej grubości przestrzeliwanego materiału, polegające na pochyleniu ostrzeliwanych płyt ocenił na drodze symulacji numerycznych zdolność rykoszetowania pocisku 7,62x54 mm R (ŁPS) w funkcji kąta ostrzału. Uzyskane wyniki posłużyły do zaproponowania koncepcji konstrukcyjnych osłon okrętowych, których zdolności pochłaniania energii kinetycznej pocisku, wyznaczoną metodą elementów skończonych MES odniesiono do niezwykle ważnego parametru wpływającego na mobilność ochranianego środka transportowego, jakim jest masa powierzchniowa konstrukcji. Część badawczą pracy Doktorant zakończył obliczeniami prędkości pocisku po przejściu przez zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne, „puste” oraz wypełnione wodą, dokonując jednocześnie weryfikacji eksperymentu numerycznego badaniami poligonowymi na drodze analizy morfologii przestrzelin rzeczywistych z ich obrazem uzyskanym metodą symulacji numerycznej.

Przedstawione w recenzowanej dysertacji analizy literaturowe oraz wyniki badań własnych zakończone zostały silnie rozbudowanym, sześciostronicowym podsumowaniem, w którym Doktorant dowodzi osiągnięcia założono celu, wskazując jednocześnie kierunki swojej przyszłej działalności naukowej w obszarze okrętowych osłon balistycznych. Zdaniem recenzującego pewnym niedosytem tej części pracy jest brak wyraźnego wypunktowania

najważniejszych osiągnięć analizowanej pracy, pozwalające czytelnikowi na zapamiętanie najważniejszych wniosków.

Ostatnim rozdziałem recenzowanej pracy jest spis literatury wykorzystanej podczas realizacji rozprawy doktorskiej. Należy podkreślić jego aktualność, polegającą na wykorzystaniu publikacji których zdecydowana większość, siedemdziesiąt na dziewięćdziesiąt jeden, została opublikowana po 2000 roku. Dlatego też pewne zdziwienie recenzującego budzi powoływanie się przez Doktoranta, pod pozycją 62, na Wikipedię. Czyżby Recenzowany nie mógł znaleźć innego źródła, o większym autorytecie naukowym, nawet jeśli chodzi o przywołanie rysunku? Pewnym niedociągnięciem autora jest także podawanie w niektórych przypadkach niepełnych danych bibliometrycznych (poz. [26], [35], [39], [72], [76], [82], [84]), utrudniając tym samym czytelnikowi dotarcie do przywołanych źródeł literaturowych.

Podsumowując tą część recenzji uważam, iż przedstawione analizy przedstawione są w sposób poprawny, przechodząc do kolejnych zagadnień zgodnie z zasadami sztuki inżynierskiej, a przedstawione rozważania teoretyczne i symulacje numeryczne poparte są wynikami eksperymentalnymi, bądź oparte na danych literaturowych. Na podkreślenie, zdaniem recenzującego, zasługuje fakt, iż Doktorant umiejętnie, w poprawny sposób poradził sobie z niebagatelnym problemem interdyscyplinarności zagadnień prezentowanych w niniejszej pracy, stanowiącej połączenie badań i analiz z obszaru nauki o materiałach, wytrzymałości materiałów w ujęciu statycznym i dynamicznym, mechaniki płynów, metod numerycznych do opisu stanu naprężenia i odkształcenia analizowanej konstrukcji, a także wykazał się umiejętnością programowania w środowisku MATLAB.

Uwagi dyskusyjne

Recenzowana dysertacja Pana kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego stanowiąca logiczną i spójną całość napisana jest poprawnym językiem technicznym, jednakże jak w każdym tego typu opracowaniu, także i tu pojawią się usterki językowe, edytorskie i pewne niefortunne sformułowania do których zaliczam :

- str.65 – „utwardzanie na zimno” – takie pojęcie nie istnieje, w tym konkretnym przypadku, autorowi chodziło najprawdopodobniej o wzrost właściwości wytrzymałościowych stali poddanej obróbce plastycznej na zimno. Zabieg taki nosi nazwę umocnienia odkształceniowego lub w formie nieco bardziej żargonowej umocnienia zgniotem. Ażeby uzyskać efekt wzrostu wytrzymałości i granicy plastyczności powiązany z jednoczesnym spadkiem plastyczności, w warunkach obróbki plastycznej musi on być przeprowadzony

poniżej temperatury rekrytalizacji materiału, czyli zgodnie z podziałem procesów aktywowanych cieplnie na zimno;

- str.73, 79, 105 – Doktorant używa pojęcia „stal kadłubowa zwykłej wytrzymałości”. Zgodnie z „Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich” z lipca 2020 stali tego typu dzielą się na cztery kategorie (A, B, C, D) oraz mogą występować w czterech stanach dostawy: surowym, normalizowanym, po kontrolowanym walcowaniu lub obróbce termomechanicznej. Porównując w pracy odporność balistyczną stali 1.3964 w stanie umocnionym plastycznie do stali kadłubowej zwykłej jakości należało doprecyzować jej kategorię i stan dostawy wpływający na zmiany struktury ziarnistej, a tym samym właściwości mechaniczne;
- str.109 – Co Autor miał na myśli używając sformułowania „rozkład naprężeń stanu deformacji”? Przede wszystkim należy podkreślić stosowanie przez Doktoranta w przedstawionej pracy terminów „naprężenie” i odkształcenie” w liczbie mnogiej. W naukach technicznych nie ma niestety miejsca na określenia „naprężenia” i odkształcenia”, a jedynie możemy mówić o składowych naprężenia (odkształcenia) lub ich wartościach. Nie istnieje przecież definicja tensora naprężeń (odkształceń), ale jest konkretna definicja „tensora naprężenia lub tensora odkształcenia”. Prawdopodobnie, w tym konkretnym przypadku Recenzowanemu chodziło o analizę stanu naprężenia w odkształconym materiale przestrzeliwanej płyty oraz w odkształconym pocisku.
- Recenzujący stwierdził także niekonsekwencję w stosowaniu oznaczeń analizowanych parametrów wytrzymałościowych. Np. na str.68 umowna granica plastyczności raz jest oznaczana jako $R_{0,2}$, ale już kilka linijek poniżej $R_{e0,2}$. Ponadto skrót tego niezwykle istotnego, dla prowadzonych w niniejszej pracy analiz, parametru nie został zamieszczony w „Spisie ważniejszych symboli” umieszczonych na str.4-5.
- Zastrzeżenie budzi też brak zamieszczonych na rys.32, 33,37, 38, 61-66, 74, 76, 86 jednoznacznej identyfikacji analizowanej wielkości fizycznej i/lub jednostek ją opisujących. Także jakość niektórych zamieszczonych wykresów (np. rys. 67, 68) przy takim nagromadzeniu analizowanych krzywych, bez ich wyraźnego rozróżnienia znacznie utrudnia prowadzenie poprawnych analiz.

Oczywiście nie zamierzam w niniejszej recenzji wymieniać szczegółowo wszystkich tych drobnych błędów, ale moim celem było zwrócenie Recenzowanemu uwagi na zwiększenie dbałości o szczegóły, które w istotny sposób wpływają na finalny odbiór każdej publikowanej pracy, a tym samym jej ostateczną ocenę. Niemniej jednak w kwestii dotyczącej uwag

merytorycznych chciałbym poruszyć kilka spraw, na które oczekiwałbym ustosunkowania się Doktoranta:

1. Na str.68 Recenzowany stwierdza fakt istotnych różnic w plastyczności badanej stali 1.3964 spowodowany kierunkiem pobrania próbek w stosunku do kierunku walcowania. Oczywiście taka konstatacja jest całkowicie zasadna i nie budzi zastrzeżeń. Nasuwa się natomiast pytanie dlaczego do dalszych analiz numerycznych Doktorant wybrał próbki o mniejszej plastyczności, czyli pobrane prostopadle do kierunku walcowania? Ponadto Autor stwierdza w tym podrozdziale, na podstawie rys.25, iż próbki wycinane prostopadle charakteryzują się umowną granicą plastyczności o wartości $R_{0,2}=418\text{MPa}$, a próbki równoległe do kierunku walcowania posiadają obszar plastycznego płynięcia pozwalający określić wartość wyraźnej granicy plastyczności na poziomie 390MPa . Niestety jakość krzywych σ - ϵ zamieszczonych na tym rysunku nie pozwala na tak precyzyjne oszacowanie wartości i rodzaju naprężenia uplastyczniającego, a ponad to wyraźnie można zauważyć, iż lokuje się w przedziale wartości naprężenia wynoszącego $500\text{-}600\text{MPa}$. Skąd ta niejednoznaczność? Co ciekawe z analizy przeprowadzonej w środowisku MATLAB, zaprezentowanej na rys.26, wartość „umownej granicy plastyczności oszacowano na poziomie 560MPa , konkludując iż przeprowadzone dopasowanie przeprowadzono z dokładnością 95% . Nie zgadzam się z tym stwierdzeniem, gdyż wyraźnie widać na omawianym wykresie, iż dopasowanie w obszarze sprężystym oraz naprężenie uplastyczniające znacznie odbiegają od inżynierskiej i rzeczywistej krzywej σ - ϵ , uniemożliwiając tym samym poprawne wyznaczenie wartości granicy plastyczności. Co ciekawe w tabeli 8. (str.80) pojawia się jeszcze inna wartość tego parametru wynosząca 302MPa . Wątpliwości budzi także przyjęta w tej tabeli wartość parametru $d_1=0,02$, podczas gdy na rys. 5, 25,26 wynosi ona wyraźnie około $0,025$. Chciałbym także zwrócić uwagę, iż z reguły krzywe σ - ϵ , a do takich należy także krzywa rozciągania, przedstawiamy z pełnym zakresem odkształcenia sprężystego, pozwalającego na ocenę liniowości zmian $\sigma=f(\epsilon)$ w tym obszarze.
2. Kolejną wątpliwość budzi pominięcie członu temperaturowego, zarówno w równaniu konstytutywnym jak i w kryterium zniszczenia Johnsona-Cooka. Co prawda na str.39 Doktorant stwierdza, iż „*Zależnie od przygotowującego zadanie inżyniera oraz dostępnych mu informacji w niektórych zadaniach szybkozmiennych można pominąć człon temperaturowy w celu redukcji czasu obliczeń, uzyskując zbieżne wyniki.*”. Niestety w analizowanym przypadku, tzn. podczas prób przestrzeliwania, kiedy to prędkość odkształcania może osiągnąć wartość nawet 10^{-4}s^{-1} pominięcie wpływu temperatury jest

niedopuszczalne. Recenzowany sam stwierdza na str.49, iż przy odkształceniach z takimi prędkościami pojawiają się, w wyniku lokalnej kumulacji energii adiabatyczne pasma ścinania, które diametralnie zmieniają sposób niszczenia materiału, stając się obszarami w których następuje propagacja pęknięć (zob. pracę J. Marcisz, Statyczne i dynamiczne właściwości mechaniczne oraz mikrostruktura stali bainitycznych nanostrukturalnych, Prace IMŻ, Monografia nr 11, 2018, ISBN 978-83-938130-2-5). Zgodnie z danymi zawartymi w pracy B. Mishra et al. doi:10.1016/j.ijimpeng.2011.12.004 adiabatyczne pasma ścinania w stali odkształcanej w warunkach balistycznej penetracji pocisku tworzą się już w temperaturze 200°C, dlatego też pominięcie członu temperaturowego jest nieuzasadnione.

3. W tabeli 7 (str.75) Doktorant zamieścił stałe materiałowe materiału rdzenia i płaszczka pocisku, których niektóre wartości zdaniem recenzującego są wątpliwe. Rdzeń pocisku 7,62x54 mm R (ŁPS) wykonany jest ze stali, natomiast materiał płaszczka to jednofazowy mosiądz do głębokiego tłoczenia o zawartości cynku 5-30%. Dlatego też wartość stałej A, która odpowiada granicy plastyczności dla mosiądzu wydaje się mocno zawyżona. W literaturze (D.E.Tria, R.Trębiński - doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.10.011, P.Kędziński et al. - doi: 10.1515/bpasts-2015-0020) wartość tego parametru zawiera się w przedziale 112-206 MPa. Także w zaproponowanym modelu zniszczenia J-C wartości stałej d_1 , odpowiadającej odkształceni, zarówno dla płaszczka jak i rdzenia przyjmują nieprawdopodobne wartości, odpowiednio 2,25 oraz 5,625, co odpowiadałoby odkształceni 225% oraz 562,5%, czyli zarówno materiał stalowego rdzenia pocisku, jak i mosiężnego płaszczka musiałby osiągnąć stan nadplastyczny, co przy szybkości odkształcania występującej podczas penetracji pocisku jest niemożliwe.
4. W opinii recenzującego analizy przedstawione w rozdziale 8 - Badanie wpływu parametrów wejściowych na wyniki obliczeń MES, pozbawione są sensu fizycznego. Nie można rozpatrywać każdego z tych parametrów oddzielnie, bez uwzględniania wpływu jednego na drugi. Przecież powszechnie wiadomo, iż dla metali i ich stopów, a przecież do takich należy badana stal 1.3964, wzrost szybkości odkształcania powoduje wzrost granicy plastyczności powiązane z tym obniżeniem odkształcania. Z kolei podwyższenie temperatury powoduje obniżenie wartości obu tych parametrów. Przykładem wzajemnej korelacji stałych materiałowych wykorzystywanych zarówno w równaniu konstytutywnym jak i w kryterium zniszczenia Johnsona-Cooka mogą być analizy przedstawione w pracy T. Deniz - Ballistic penetration of hardened steel plates, Middle East Technical University, August 2010.

5. Na jakiej podstawie przyjęto rozmiar siatki (mesh size) równy $L=0,5\text{mm}$. Wartość tego parametru wpływa istotnie na wartość wyznaczanej numerycznie granicy plastyczności. W pracach M.E. Korkmaza (doi.org/10.1007/s12666-019-01734-9 oraz [doi: 10.2339/politeknik.555271](https://doi.org/10.2339/politeknik.555271)) stwierdzono, iż zmiana rozmiaru elementów skończonych z 0,1mm do 1,0mm powoduje wzrost wartości granicy plastyczności, od wartości rzeczywistej nawet o 40 MPa.
6. W podsumowaniu (str.142) Doktorant stwierdza, iż różnice pomiędzy symulacjami numerycznymi, a modelowaniem rzeczywistym wynoszą 22% i są na akceptowalnym poziomie. Na jakiej podstawie przyjęto taki poziom błędu jako akceptowalny? W literaturze (A.Manes - <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.07.015>) dla analizy prędkości pocisku za próbką błąd ten zawiera się w przedziale 4-8%. Ponadto analizując wykres zmian prędkości za przestrzeliwaną płytą, przedstawiony na rys.71, dla próbki pochylonej pod kątem 50° grubość sprowadzona wynosi 6,2mm, co w porównaniu z wynikami zamieszczonymi w tabeli 5 powinno skutkować prędkością pocisku za próbką rzędu około 630m/s, podczas gdy prędkość wyznaczona z symulacji numerycznych wynosi około 530m/s, co stanowi błąd rzędu 15%. Jednakże dla płyty pochylonej pod kątem 60° grubość sprowadzona wynosi 8mm, czyli prędkość pocisku po przebicciu płyty (zgodne z tab.5) powinna wynosić około 530m/s, podczas gdy symulacja skutkowałą prędkością około 200m/s, co stanowi już błąd 60%.

Wnioski końcowe

Praca doktorska Pana kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego dotyczy niezwykle aktualnych i ważnych zagadnień z wielu obszarów tematycznych, począwszy od bezpieczeństwa i obronności państwa, aż po obszar nauk technicznych skoncentrowanych głównie na inżynierii mechanicznej oraz inżynierii materiałowej. Ta interdyscyplinarność analiz i badań w połączeniu z koniecznością stosowania uproszczeń modelowych w celu przeprowadzenia symulacji numerycznych ewidentnie wpłynęła na jakość interesujących i jednocześnie o dużym potencjale aplikacyjnym wyników. Niewątpliwie Doktorant zdaje sobie sprawę ze złożoności poruszanych problemów, stwierdzając na str. 119 dysertacji o "konieczności dopracowania metodyki badań". Świadczy to o dojrzałości badawczej Recenzowanego oraz chęci doskonalenia warsztatu naukowego na drodze do osiągnięcia postawionych celów. W tym świetle przedstawione przeze mnie uwagi krytyczne nie wpływają na pozytywny odbiór pracy Pana kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego, a jednocześnie

mam nadzieję, iż część z postawionych przeze mnie pytań i komentarzy zostanie potraktowana jako sugestia i zachęta do podjęcia dalszych pogłębionych badań.

Reasumując stwierdzam, iż rozprawa doktorska Pana kpt. mar. mgr inż. Radosława Kicińskiego, zatytułowana „Analiza i modelowanie odporności na przebicie okrętowych konstrukcji osłonowych” spełnia wymagania wynikające z Ustawy o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. Ustaw z dnia 16 kwietnia 2003 r. z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

