

Andrzej GRZĄDZIELA

Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej
a.grzadziena@amw.gdynia.pl

Kadłuby laminatowe dla okrętów zwalczania min – problemy technologiczne

***Streszczenie.** Artykuł przedstawia problem obliczeń konstrukcji kadłubów niszczycieli min wykonanych z laminatów GRP. Scharakteryzowano zadania niszczycieli min oraz przedstawiono problem odporności udarowej na falę detonacji podwodnej. Wskazano metody obliczeń parametrów fali wywołującej odkształcenia sprężyste kadłuba okrętowego oraz oddziaływanie dynamiczne na struktury wewnętrzne. Przedstawiono współcześnie stosowane metody realizacji konstrukcji kadłubów GRP oraz łączenia z elementami stalowymi.*

POLYMER COMPOSITES IN MINEHUNTERS HULL CONSTRUCTION – TECHNOLOGICAL PROBLEMS

***Abstract.** The paper presents the problem of calculating the hull structures of minehunters made from GRP laminates. It characterizes the task of minehunters and presents the problem of impact resistance to the waves of underwater detonations. This method of calculating the parameters of the indicated wave causing elastic deformation of the hull of the ship and dynamic effects on the internal structures. The paper presents the implementation of modern methods of constructing GRP hulls and connecting laminate with steel part.*

1. WSTĘP

Marynarka Wojenna RP od ćwierćwiecza użytkuje okręty zwalczania min (OZM) polskiej konstrukcji projektu 207 wykonane z laminatu poliestrowo-szklanego, formowanego beciśnieniowo w temperaturze ok. $T = 20^{\circ}\text{C}$, na bazie żywic nienasyconych, ortoftalowych lub chemoutwardzalnych. Stan techniczny oraz wyposażenie bojowe użytkowanych jednostek wskazują na konieczność podjęcia w możliwie najbliższym czasie kroków zmierzających do wymiany wszystkich okrętów. Od połowy lat 90-tych XX wieku prowadzone są prace nad nowymi OZM pod roboczym kryptonimem KORMORAN. Wszystkie dotychczasowe badania i analizy wykorzystywały typowe w projektowaniu statków komercyjnych komputerowe środowiska wirtualne. Specyfika konstrukcji oraz wymagania eksploatacyjne OZM dotyczą między innymi problemów odporności okrętów wraz z wyposażeniem na

oddziaływania udarowe min morskich. Ostatnie badania eksperymentalne dotyczące odporności udarowej konstrukcji okrętowych przeprowadzono w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni w połowie lat 70-tych ubiegłego stulecia. Współczesny rozwój metod modelowania numerycznego oraz technik pomiarowych skutkuje wnioskiem, że nasza obecna wiedza na temat odporności udarowej jednostek bojowych oraz doboru rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych jest absolutnie niewystarczająca.

Większość sił morskich NATO badania odporności udarowej traktuje szczególnie; są one przedmiotem odbiorów technicznych zgodnie z standardami STANAG lub nawet bardziej rygorystycznymi, narzuconymi przez Dowództwa MW w fazie kontraktowej. Polska Marynarka Wojenna oraz biura konstrukcyjne mają dostęp do dokumentów normalizacyjnych jednakże są one jedynie zbiorem wymagań i zaleceń, a nie algorytmami obliczeń lub zbiorem

współczynników korekcyjnych uzyskanych na drodze eksperymentalnej. Tak, więc pomimo zastosowania nowoczesnych, wirtualnych metod projektowych nie możemy obecnie mieć pewności czy powstały w Polsce projekt OZM spełniłby oczekiwania w zakresie odporności udarowej. Rozwiązaniem tej kwestii powinno być przygotowanie badań obliczeniowych oraz eksperymentalnych, które określiłyby przydatność wirtualnych narzędzi do modelowania jednostki, oddziaływań dynamicznych oraz wartości współczynników empirycznych charakterystycznych w detonacjach podwodnych. Badania takie powinny przede wszystkim ocenić przydatność oraz wyższość rozwiązania kadłubów wykonanych ze stali małow magnetycznych lub z laminatów.

2. ZADANIA NISZCZYCIELI MIN

Typowe niszczyciele min są przeważnie okrętami o wyporności standardowej $D = 400-800 \text{ m}^3$, długości $L = 40-60 \text{ m}$ i zanurzeniu $T = 2-3 \text{ m}$. Niszczyciele min (*ang. mine hunter – MH*) wywodzą się z trałowców (*ang. mine sweeper – MS*) i posiadają z nimi wiele cech wspólnych. Powinny być jak najbardziej odporne na wybuchy podwodne, wywoływać niewielkie zmiany pól fizycznych mogących spowodować zadziałanie zapalnika miny morskiej. W tym celu stosuje się wyciszone układy napędowe, precyzyjne układy sterowania oraz kadłu-

by z tworzyw sztucznych lub stali małow magnetycznej.

Wspomniane klasy okrętów różnią się sposobem zwalczania min morskich, chociaż istnieją jednostki pływające łączące w sobie wszystkie cechy zarówno trałowca, jak i niszczyciela min. W nomenklaturze anglojęzycznej określane są jako MCMV – *mine counter measure vessel*. Należą do nich m.in. amerykańskie trałowce oceaniczne typu „Avanger” oraz szwedzkie przybrzeżne niszczyciele min typu „Landsort”.

Oprócz wymienionych jednostek do najbardziej rozpowszechnionych na świecie niszczycieli min zalicza się niemiecki typ „Frankenthal” (dwanaście jednostek wykonanych ze stali amagnetycznej) jednostki wykonane z laminatów GRP takie jak amerykański typ „Osprey” (dwanaście jednostek), brytyjski typ „Sandown” (osiemnaście jednostek) czy włoski typ „Gaeta” (szesnaście jednostek).

3. MODELOWANIE FALI DETONACJI PODWODNEJ

Zjawisko detonacji ładunku w środowisku wodnym było badane w Polsce przez stosunkowo wąskie grono naukowców, przy czym najwięcej informacji na ten temat można znaleźć w pracach autorstwa N. Klatki oraz Z. Powierży. Głównym ośrodkiem badań był Instytut Postaw Budowy Maszyn Okrętowych Aka-

a)



b)



Rys 1. a) Niszczyciele min – francuski „Céphée”, typu Tripartite; b) Niemiecki „Grömitz”, typu Frankenthal

demii Marynarki Wojennej oraz Wojskowa Akademia Techniczna.

Najwięcej pozycji w tej dziedzinie można znaleźć w obcojęzycznych publikacjach Cole'a i Nawagina, aczkolwiek większość wyników badań eksperymentalnych dotychczas nadal nie jest jawna [1].

Problem oddziaływania wybuchu miny morskiej na konstrukcję pływającą jest niezwykle skomplikowany i należy do trudniejszych zagadnień dynamiki okrętu. Składają się na niego między innymi takie zjawiska fizyczne, jak rozchodzenie się fali ciśnienia w ośrodku płynnym, odbicie fali na granicy dwóch różnych ośrodków, odbicie fali od dna, nakładanie się drgań własnych konstrukcji z drganiami wymuszonymi, zmiany temperatury i gęstości wody. Jednocześnie kadłub okrętu poddawany jest działaniu sił hydrodynamicznych, szczególnie istotnych przy pływaniu z dużymi prędkościami. Uwzględniając nieliniowy charakter oddziaływania, można stwierdzić, że zagadnienie odporności udarowej kadłuba OZM, bez wprowadzenia szeregu uproszczeń, nie może być rozwiązane, nawet w sposób przybliżony.

Siły pochodzące od detonacji ładunku wybuchowego są wynikiem oddziaływania ciśnienia fali uderzeniowej. Procesowi temu towarzyszą emisja znacznej ilości energii, duża prędkość reakcji chemicznych i fizycznych, wydzielanie ciepła oraz powstawanie produktów gazowych. Większość publikacji opisuje pierwszy etap procesu detonacji jest reakcją spalania materiału wybuchowego. Jej efektem jest powstanie fali ciśnienia i produktów spalania w postaci gazu. Gaz przybiera formę pęcherza, nazywanego pęcherzem gazowym lub kulą gazową. Fala detonacyjna rozchodzi się od centrum detonacji do powierzchni pęcherza gazowego i przekazuje sąsiadującym z nim cząsteczkom wody energię. Ciśnienie gazów w pęcherzu jest wielokrotnie większe od ciśnienia hydrostatycznego panującego na danej głębokości. Jego wartość może przekraczać ciśnienie $p = 14000$ MPa, a temperatura $T = 3300$ K. Tak duże wartości ciśnienia powodują powsta-

nie efektu ściśliwości wody, a tym samym strefy sprężania, która generuje falę uderzeniową. Przemieszcza się ona w początkowym okresie z prędkością detonacji (rzędu $v_d = 6000\text{--}8000$ m/s), a po kilku milisekundach osiąga prędkość dźwięku w wodzie. Wraz ze wzrostem rozmiarów pęcherza ciśnienie w jego wnętrzu maleje. W momencie zrównania się wartości ciśnienia w pęcherzu z ciśnieniem hydrostatycznym nadal będzie on zwiększał swoje rozmiary. Wywołane jest to bezwładnością cząsteczek wody, którym nadana została określona prędkość początkowa. Średnica pęcherza rośnie do momentu, gdy ciśnienie wewnętrzne będzie stanowiło około 20% wartości ciśnienia hydrostatycznego.

Kolejnym etapem jest proces powrotu cząsteczek wody w kierunku środka kuli gazowej. W efekcie kula zmniejsza swoją objętość do minimalnej wartości. Moment ten oznacza zakończenie tzw. pierwszej pulsacji, której przybliżony czas trwania można obliczyć zależnościami empirycznymi. Proces pulsacji powtarza się wielokrotnie aż do momentu, gdy pęcherz gazowy wypłynie na powierzchnię morza, zależnie od głębokości detonacji. Pulsacje pęcherza gazowego mogą mieć taką samą częstotliwość jak częstość własna kadłuba okrętowego. Wystąpi wówczas zjawisko rezonansu, które może zwielokrotnić efekty detonacji ładunku wybuchowego i spowodować znacznie poważniejsze uszkodzenie okrętu.

4. MODELOWANIE KADŁUBA ODPORNEGO UDAROWO

Dla potrzeb identyfikacji oddziaływań detonacji podwodnej na kadłub i wyposażenie techniczne okrętu wytypowano jednostkę typu 206 FM [2]. Podstawowym powodem wyboru był kadłub stalowy, którego parametry fizyczne znacznie łatwiej zamodelować niż w przypadku anizotropowej konstrukcji laminatowo-poliestrowej jaką posiadają jednostki typu 207M. W przypadku oddziaływania elementu kadłuba z otaczającą wodą równanie ruchu kadłuba można wyrazić następująco (1):

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

gdzie:

M – macierz masy;

C – macierz tłumienia;

K – macierz sprężystości;

x – przemieszczeniem rozpatrywanego elementu kadłuba;

$F(t)$ – zmienna w czasie siła oddziaływująca na ten element (2).

$$F(t) = -GA_f(p_i + p_s) \quad (2)$$

gdzie:

G – macierz opisująca liczbę stopni swobody wody otaczającej rozpatrywany element,

A_f – macierz zawierająca powierzchnie oczek przedstawiających otaczający płyn,

p_i – ciśnienie maksymalne powstałe w wyniku podwodnej eksplozji,

p_s – ciśnienie oddziaływujące na element kadłuba.

Zakładając, że prędkość wody i elementu kadłuba w momencie oddziaływania fali ciśnienia jest taka sama, można zapisać (3):

$$G^T \dot{x} = v_i + v_s \quad (3)$$

gdzie:

v_i – prędkość chwilowa cieczy pochodząca od podwodnego wybuchu,

v_s – prędkość rozproszona od elementu kadłuba.

W rozważaniach wstępnych założono, że woda jest nielepka i nieściśliwa. Ciśnienie oddziaływujące na element kadłuba i jego prędkość są ze sobą powiązane następującą zależnością (4):

$$p_s = \rho_w c_w v_s \quad (4)$$

Uwzględniając (2) i (3) otrzymano (5):

$$p_s = \rho_w c_w (G^T \dot{x} - v_i) \quad (5)$$

Podstawiając (5) do (2) uzyskano (6):

$$F(t) = -GA_f[p_i + \rho_w c_w (G^T \dot{x} - v_i)] \quad (6)$$

Po uwzględnieniu (1) zapisano różniczkowe równanie ruchu elementu kadłuba poddanego oddziaływaniu fali uderzeniowej jako (7):

$$M\ddot{x} + (C + GA_f G^T \rho_w c_w)\dot{x} + Kx = -GA_f[p_i + \rho_w c_w v_i] \quad (7)$$

Wyrażenie $\rho_w c_w$ reprezentuje dodatkowe tłumienie spowodowane dyssypacją części energii elementu kadłuba do wody. Jedyną niewiadomą w równaniu (7) jest przemieszczenie, które można obliczyć posługując się metodą elementów skończonych. Równanie ruchu (7) jest poprawne dopóki nie występuje kawitacja. Pomijając tłumienie i przemieszczenia węzłowe w czasie oddziaływania impulsu ciśnienia, zapisano (8):

$$m\ddot{x} + \rho_w c_w \dot{x} = 2P_m e^{-t/\theta} \quad (8)$$

gdzie:

m – masa odniesiona do jednostki powierzchni rozpatrywanego elementu kadłuba.

Wprowadzając warunki początkowe oraz bezwymiarowy współczynnik $\psi = \rho_w c_w \theta / m$ ciśnienie na elemencie kadłuba uzyskano (9):

$$P_p(t) = 2P_m e^{-t/\theta} - \frac{2P_m \psi_a}{\psi_a - 1} (e^{-t/\theta} - e^{-\psi_a t/\theta}) \quad (9)$$

Ciśnienie maksymalne dane będzie wzorem (10):

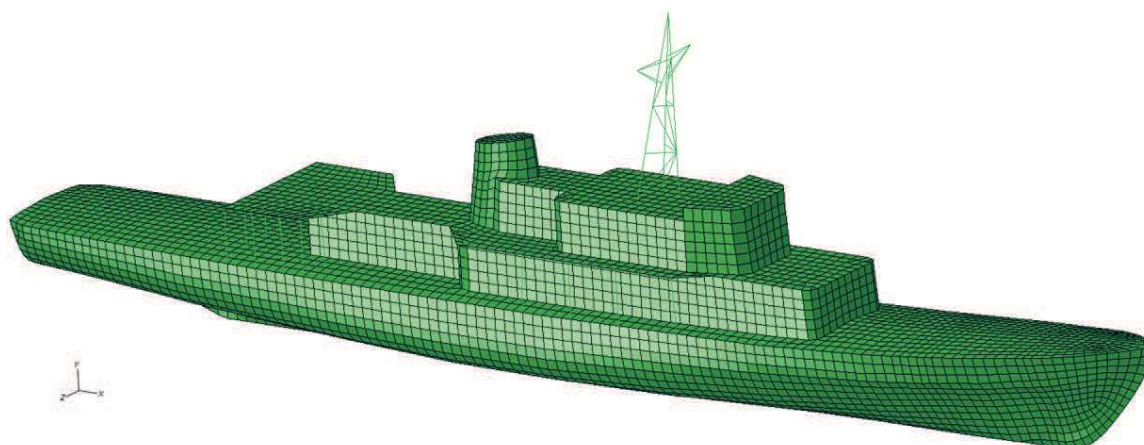
$$P_p = 2P_m \psi_a^{\frac{1}{1-\psi_a}} \quad (10)$$

Energia fali uderzeniowej przekazana elementowi, za którym znajduje się powietrze wynosi (11):

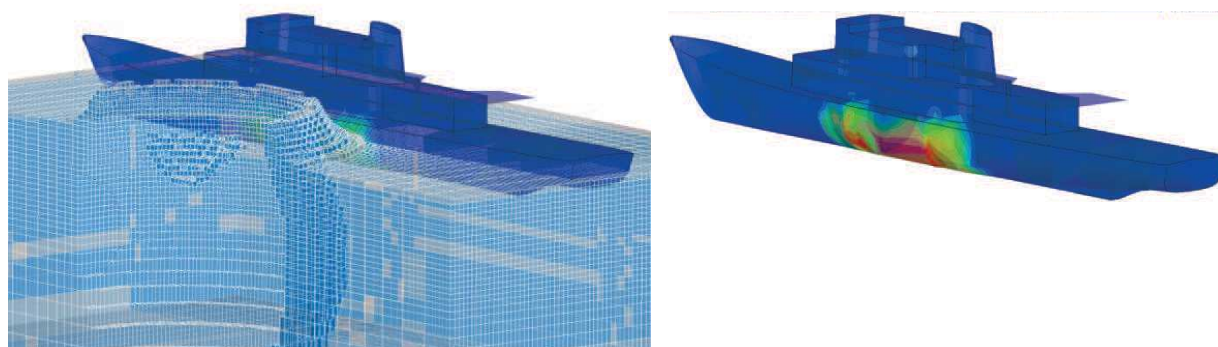
$$E_{pa} = \frac{m V_{ma}^2}{2} = \frac{2P_m^2 \theta^2}{m} \psi_a^{\frac{2\psi_a}{1-\psi_a}} \quad (11)$$

Eksplozje w niewielkiej odległości od kadłuba mogą spowodować reakcje kadłuba powodujące jego rozerwanie. Dlatego też z punktu widzenia projektantów istotne przewidywanie odpowiedzi elementów kadłuba na oddziaływanie impulsowe.

Na rysunku 2 przedstawiono wstępny model dyskretny niszczyciela min projektu 206 FM zdyskretyzowany 14475 kwadratowymi elementami powłokowymi, 76 trójkątnymi elementami powłokowymi, wyznaczonymi w przestrzeni przez 11753 węzłów, co stanowi 70518 stopni swobody. Na podstawie otrzymanych wyników w modelu wyznaczono rejony o najmniejszych i największych gradientach obliczanych wielkości. Stanowią one wytyczne do rozrzedzenia i zagęszczenia siatki elementów w następujących modelach (tzw. *remeshing*).



Rys. 2. Wstępny model dyskretny niszczyciela min projektu 206 FM [2]



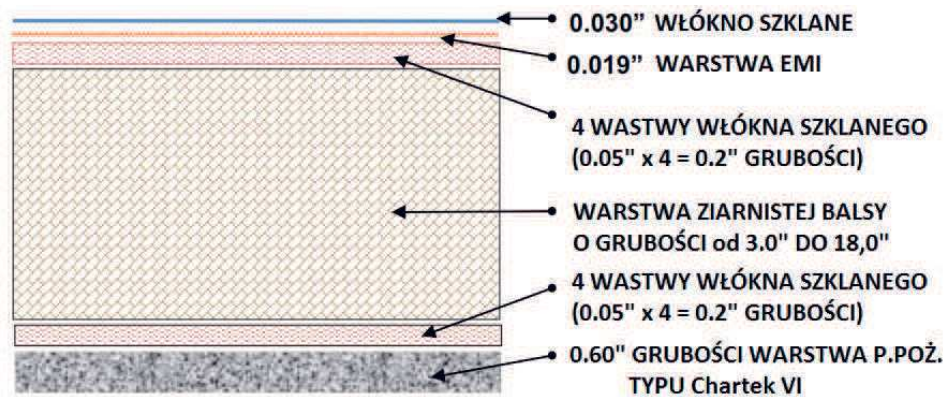
Rys. 3. Przykładowe wyniki symulacji oddziaływania fali detonacyjnej na model powłokowo belkowy kadłuba niszczyciela min wykonanego ze stali [2]

Kolejna geometria dyskretna kadłuba jest zazwyczaj modelem bryłowo-powłokowo-belkowym poszycia wraz z grodziami, zbiornikami, wręgami, wzdłużnikami i wzmocnieniami oraz fundamentami silników głównych, urządzeń pomocniczych, linii wałów. Same urządzenia modeluje się w postaci mas skupionych lub brył o dużym stopniu uproszczenia posadowionych bezpośrednio na fundamentach. Liczba elementów i stopni swobody jest rzędu kilkuset tysięcy. W modelu analizuje się wytrzymałość kadłuba dla różnych parametrów wybuchu podwodnego (masa ładunku, odległość, kierunek) oraz wyznacza wartości przyspieszeń na fundamentach. Otrzymane wartości przyspieszeń na fundamentach stanowią dane wejściowe (obciążenia kinematyczne) do analizy stanu naprężenia w szczegóło-

wych modelach urządzeń i maszyn (tzw. *sub-modeling*) – rysunek 3.

5. ZASTOSOWANIE KADŁUBÓW LAMINATOWYCH W BUDOWIE OKRĘTÓW – PROBLEMATYKA TECHNOLOGICZNA

Przedstawione wyniki wstępnych analiz wytrzymałościowych jednoznacznie wskazują na potencjalną możliwość wykonania obliczeń odporności udarowej kadłubów konstrukcji stalowej dla niszczycieli min. Powstaje zatem pytanie dlaczego od ostatnich 30 lat 90% okrętów zwalczania min jest wykonywanych z laminatów? Obecnie konstrukcje ze stali amagnetycznej są jedynie preferowane przez Bundesmarine, która wdrożyła serię okrętów klasy



Rys. 4. Przykładowa struktura laminatu stosowanego obecnie w okrętownictwie amerykańskim [3]

Frankenthal. Takie rozwiązanie ma wiele zalet, wśród których najważniejsze to:

- stosunkowa łatwość modelowania wirtualnego obciążenia statycznych i dynamicznych,
- podatność jednostek na remonty,
- dostępność technologii materiałowej dla Bundersmarine,
- dobre rezultaty w zakresie uzyskanych pól fizycznych kadłuba.

Należy jednak podkreślić pytania i wątpliwości, które są związane z faktem, że tylko tak niewielka populacja jednostek zwalczania min jest wykonana ze stali amagnetycznej tj.:

- koszty eksploatacji rozumiane jako LCC (Life Cycle Costs),
- zdolność stali amagnetycznej do odtworzenia swych własności po oddziaływaniu udaru detonacji podwodnej,
- zdolność własnego przemysłu do wytopu stali i jej walcowania oraz zdolność stoczni własnych do przejścia technologii spawania,
- koszty remontów w stocznich obcych lub koszty zakupu technologii.

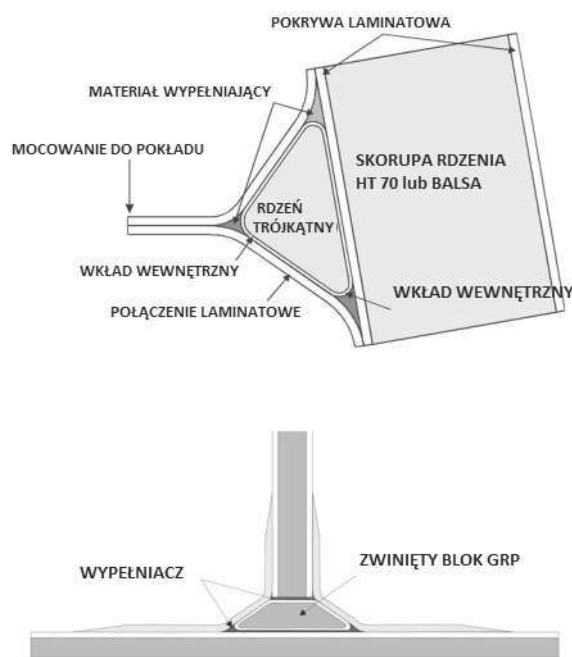
Stalowe i laminatowe rozwiązania materiałowe kadłubów OZM mają swoje zalety i wady. Podstawowym zagadnieniem w zakresie tematu artykułu jest jednak przedstawienie problematyki technologii, która może zaowocować przyjęciem jednego z proponowanych rozwiązań. Współcześnie budowane kadłuby GRP (często nazywanymi również FRP) okrętów są realizowane w technologii sandwich'o-

wej – rysunek 4 i 5, z żywicy poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym. Laminat jest rodzajem kompozytu powstającego z połączenia co najmniej dwóch materiałów różniących się właściwościami mechanicznymi, fizycznymi i technologicznymi. Połączenie zalet obu materiałów umożliwia uzyskanie materiału o wysokiej jakości i optymalnych cechach dla celów morskich.

Należy jednak podkreślić powszechną konieczność łączenia okrętowych konstrukcji stalowych z laminatowymi – rysunek 6. Takie rozwiązania okazują się wysoce efektywne w zakresie odporności udarowej jednakże są one efektem wieloletnich badań własnych często finansowanymi w całości z budżetu pań-



Rys. 5. Przykładowy przekrój poprzeczny kadłuba wykonanego w technologii GRP (FRP) [4]



Rys. 6. Przykładowy sposób łączenia elementów GRP ze stalowymi elementami kadłuba

stwa [5]. Podstawowym problemem nie jest samo wykonanie jednostki w technologii GRP lecz jej zaprojektowanie z zastosowaniem techniki MES z uwzględnieniem odporności udarowej przy założonej konieczności łączenia elementów laminatowych i stalowych oraz zagadnień anizotropowości użytych materiałów [6].

6. PODSUMOWANIE

Współczesne OZM są w większości budowane z laminatów w technologii GRP, takie tradycje posiada również polski przemysł stoczniowy. Nawet obecnie w konstrukcji kadłubów laminatowych dla potrzeb yachtingu

nie odstępujemy od czołówki światowej. Rozwiązanie konkurencyjne tj. ze stali amagnetycznej jest dla polskiego przemysłu stoczniowego nowym wyzwaniem, co do którego zasadności rodzi się wiele pytań i zastrzeżeń. Należy zatem zasygnalizować potencjalne możliwości realizacji militarnych konstrukcji w technologii GRP opracowanej przez polskie ośrodki naukowe lub potencjalny zakup gotowej technologii a realizację powierzyć w całości polskiemu przemysłowi stoczniowemu. Każde inne rozwiązanie wiązać się z uzależnieniem od obcego dostawcy lub ośrodka remontowego oraz wielokrotnym zwiększeniem kosztów.

Literatura

- [1] Cole R. H., Underwater Explosions, Princeton University Press, Princeton 1948
- [2] Grządziela A. Szturomski B: Impact Modeling of Underwater Explosion, Solid State Phenomena, Mechatronic Systems, Mechanics and Materials Vol. 180, Zurich, pp. 288 – 296, ISSN 1012-0394
- [3] Galanis K. Hull construction with Composite Materials for Ships over 100 m in length, Thesis of Master of Science in Ocean System Management, MIT, 2002.
- [4] Murray L. Scott (1997). Eleventh International Conference on Composite Materials. Woodhead Publishing. ISBN 978-1-85573-356-5
- [5] Hackett J.P. Composites Road to the Fleet— A Collaborative Success Story, The Science And Technology Foundation For Future Naval Fleets, Committee on Naval Engineering in the 21st Century Transportation Research Board, 2011
- [6] http://www.ericgreeneassociates.com/images/MARINE_COMPOSITES.pdf