

**WSPOMAGANIE PROCESU KSZTAŁCENIA W ZAKRESIE
WYTRZYMAŁOŚCI OGÓLNEJ KONSTRUKCJI STATKÓW
I JEJ WPŁYWU NA BEZPIECZNĄ EKSPLOATACJĘ**

**SUPPORTING THE PROCESS OF LEARNING ABOUT
THE LONGITUDINAL STRENGTH OF THE SHIPS
AND ITS INFLUENCE FOR THE SAFETY EXPLOITATION**

Dorota Łozowicka

Paweł Chorab

Akademia Morska w Szczecinie

Wydział Nawigacyjny

ul. Wały Chrobrego 1-2

70-500 Szczecin

e-mail: d.lozowicka@am.szczecin.pl

e-mail: p.chorab@am.szczecin.pl

Magdalena Kaup

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny

w Szczecinie

Wydział Techniki Morskiej i Transportu

al. Piastów 41

71-065 Szczecin

e-mail: mkaup@zut.edu.pl

Abstract: The nature of the operation of ships on the seas and oceans enforces a large number of guidelines for safety. There is a requirement that the longitudinal strength of the ship in various states of operation should be controlled. This is one of the most important areas of the ship's technical operation safety.

The article presents the different stages of student's training in the field of longitudinal strength of the ship's hull. The initial stage of education includes a methodology for calculating shear forces and bending moments in the rectangular barge. The second stage of the education is related to the teaching of the loading calculators, which are used for real ships. In the third stage of education it is carried out the visualization of typical fatigue damage of hull structure using *Survey Simulator*. In the article for each of the stages of education laboratory the lesson plans are presented. The aim of the educational process is to realize the risks arising from the abnormal operating of ships, as well as increasing the level of awareness in the context of responsibility for the technical condition of the ship and its equipment.

Keywords: longitudinal strength, damages, threats, simulation, learning process, ship's hull, shear forces, bending moments, safety.

Wprowadzenie

Statek podczas eksploatacji, zarówno na morzu jak i w porcie, jest poddawany obciążeniom wywołanym przez różne siły zewnętrzne. Na skutek ich oddziaływania może on ulec

trwałemu odkształceniu lub zniszczeniu, jeżeli zostanie przekroczony dopuszczalny poziom tych sił oraz powstałe naprężenia w materiale konstrukcyjnym kadłuba przekroczą wartości graniczne. W celu wyznaczenia naprężeń, należy określić siły wewnętrzne występujące w

konstrukcji. Siły spójności między cząsteczkami materiału nazywane siłami wewnętrznymi powstają na skutek oddziaływania sił zewnętrznych.

W analizie wytrzymałości wzdłużnej kadłuba statku, siły wewnętrzne określa się dla przekrojów poprzecznych. Zazwyczaj analiza sił wewnętrznych oddziaływujących na kadłub statku ogranicza się do wyznaczenia następujących wartości: siły tnącej (shear force), momentu gnącego (bending moment) i momentu skręcającego (torsional moment).

Naprężenia występujące w konstrukcji kadłuba są miarą relacji między obciążeniem kadłuba i jego wytrzymałością. Wytrzymałość konstrukcji kadłuba powinna być dostosowana do rodzaju i wielkości sił wewnętrznych, tak aby pod ich wpływem nie uległ on zniszczeniu czy też trwałemu odkształceniu. Kontrola wytrzymałości statku podczas eksploatacji wymaga znajomości przede wszystkim określenia wartości tych sił przy operacjach ładunkowo - balastowych [5].

Celem procesu edukacyjnego jest uświadomienie możliwości i sytuacji wystąpienia zagrożeń, jakie niesie ze sobą nieuwzględnienie działania tych sił podczas eksploatacji technicznej statku.

W toku studiów studenci poznają zagadnienia związane z wytrzymałością wzdłużną kadłuba statku, zarówno w formie zajęć teoretycznych, jak i w praktyczny sposób dokonują obliczeń dla prostych konstrukcji (barka prostopadłościenna). Naukę kontroli wytrzymałości podczas eksploatacji przeprowadza się wykorzystując rzeczywiste kalkulatory załadunku statków, które wspierają proces obliczeniowy dotyczący wyznaczenia sił tnących i momentów gnących porównując obliczone wartości z wartościami kryterialnymi dla danego typu konstrukcji.

Wykorzystując symulator inspekcji statku (Survey Simulator) można wizualizować zagrożenia powstałe podczas niewłaściwie planowanych i prowadzonych operacji balastowo-ładunkowych w czasie eksploatacji statku.

Celem prezentowanej pracy jest przedstawienie, w jaki sposób należy przeprowadzić proces kształcenia w zakresie wytrzymałości wzdłużnej kadłuba statku tak, aby uzyskać jak najlepsze efekty kształcenia, ze względu na istotność tego zagadnienia w zapewnieniu bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji jednostki pływającej.

Metodyka obliczania sił wewnętrznych w pontonie prostopadłościennym

Na początkowym etapie kształcenia studentom szczególnie trudno wyobrazić sobie jakie siły występują w kadłubie statku. Należałoby zatem pewne zjawiska wytłumaczyć na przykładzie prostszej konstrukcji, którą stanowić może barka prostopadłościenna.

Scenariusz zajęć laboratoryjnych dotyczących obliczania sił wewnętrznych w pontonie prostopadłościennym przedstawiono na rys. 1.

Poniżej zaprezentowano procedurę obliczania sił tnących i momentów gnących dla przykładowej barki, z tak przyjętym rozkładem ładunku, aby zademonstrować rejony kadłuba szczególnie narażone na przekroczenie dopuszczalnych wartości tych sił.

Barka prostopadłościenna o długości $L=40$ metrów, szerokości $B=6$ metrów pływa w wodzie słodkiej ($\rho=1,000$ t/m³). Masa kadłuba barki (m_{pb}) wynosi 200 ton i rozkłada się równomiernie na całej długości barki. Barka załadowana jest ładunkiem o masie $m_l=100$ ton i długości $l=8$ metrów. Ładunek rozmieszczony jest połowie długości barki i nie powoduje przegłębienia. Obciążenie ciągle kadłuba (q_{pb}) wynosi zatem:

$$q_{pb} = \frac{m_{pb}}{L} = 5 \frac{t}{m} \quad (1)$$

Z powodu obciążenia kadłuba ładunkiem z tego powodu występuje dodatkowe obciążenie ciągle (q_l):

$$q_l = \frac{m_l}{l} = 12,5 \frac{t}{m} \quad (2)$$

W kolejnym kroku dokonuje się obliczenia zanurzenia (T) barki:

$$T = \frac{m_{pb} + m_l}{\rho \cdot L \cdot B} = 1,25m \quad (3)$$

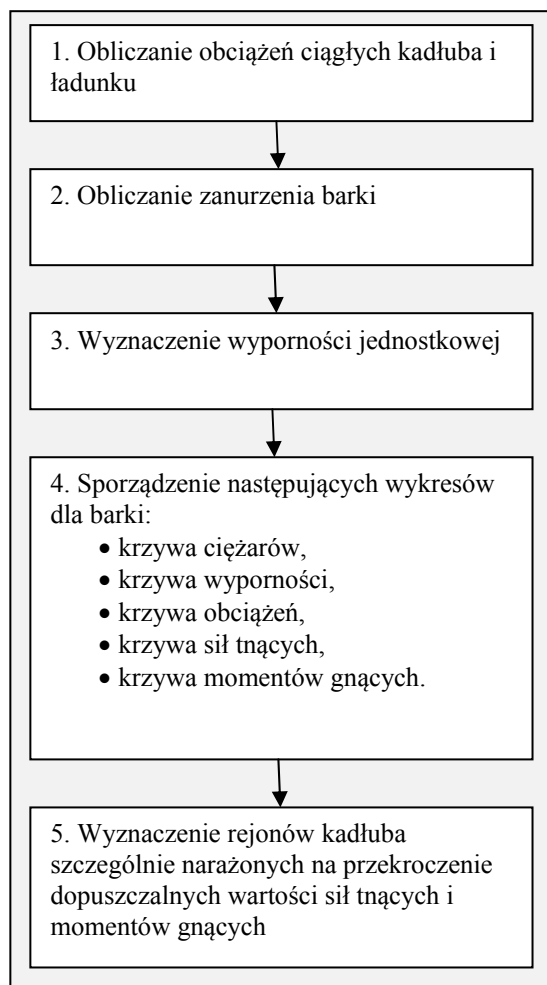
Masa wypieranej przez każdy metr barki wody (m) wyniesie:

$$m = T \cdot B \cdot \rho = 7,5 \frac{t}{m} \quad (4)$$

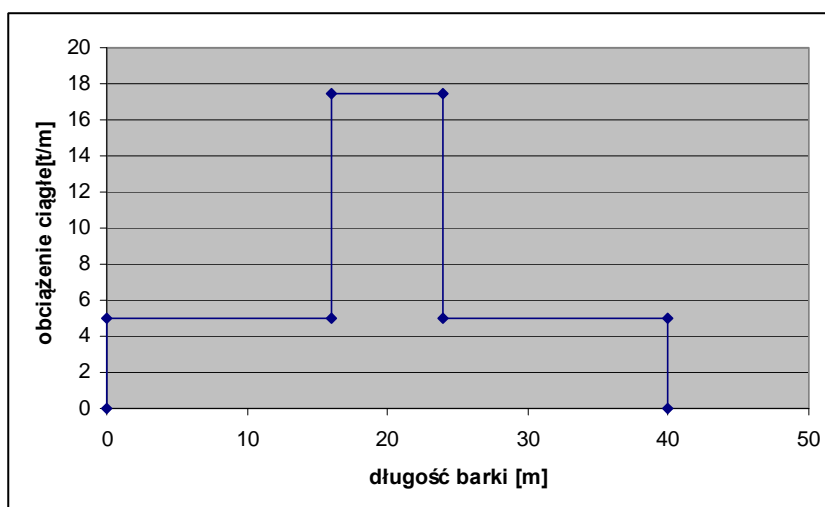
Na podstawie obliczonych powyżej wartości sporządza się poglądowe wykresów związane z wypornością barki oraz siłami zachodzącymi w jej kadłubie.

Pierwszym z wykresów jest tzw. krzywa ciężarów, która przedstawia obciążenia ciągle barki wraz z jej ładunkiem (rys. 2).

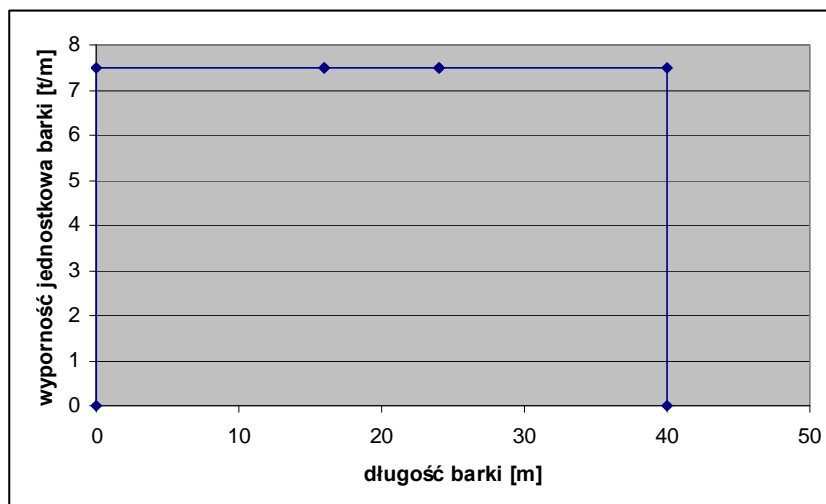
Następnym wykresem do sporządzenia jest tzw. krzywa wyporności, którą zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 1. Schemat procesu obliczania sił wewnętrznych w pontonie prostopadłościennym podczas zajęć laboratoryjnych (wg [1]).



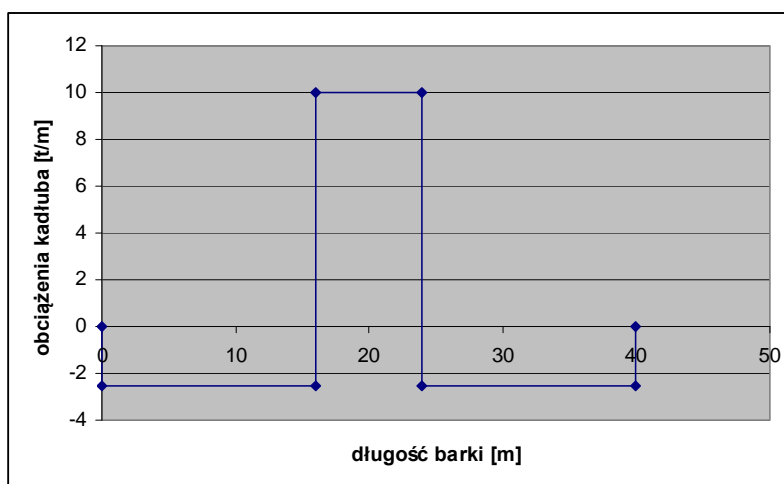
Rys. 2. Krzywa ciężarów dla barki prostopadłociennej.



Rys. 3. Krzywa wyporności dla barki prostopadłościowej.

W wyniku nałożenia na siebie krzywej ciężarów zakładając, że przyjmuje ona wartości dodatnie oraz krzywej wyporności przyjmującej

wartości ujemne otrzymujemy tzw. krzywą obciążeń (rys. 4).



Rys. 4. Krzywa obciążeń dla barki prostopadłościowej.

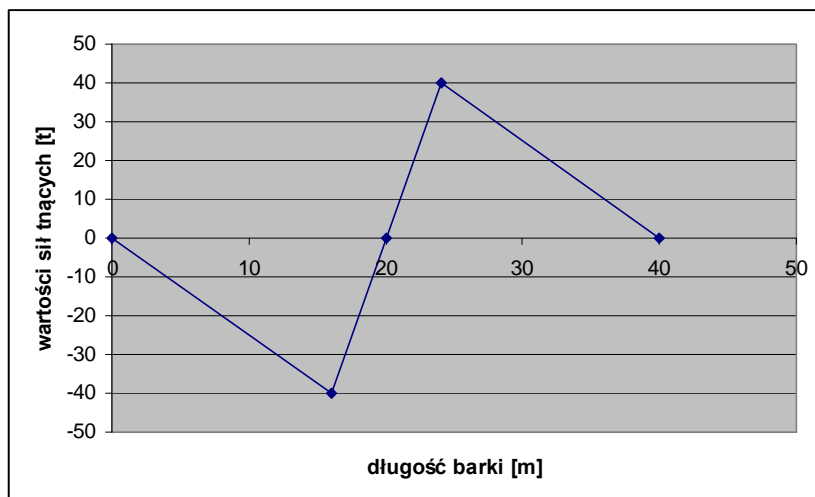
Na podstawie krzywej obciążeń sporządza się wykres sił tnących i momentów gnących, które są najistotniejsze przy ocenie wytrzymałości wzdłużnej jej konstrukcji. Jeżeli przyjmiemy że obciążenia kadłuba zapiszemy za pomocą funkcji $c(x)$ to wartości sił tnących (ST) w poszczególnych przekrojach wzdłużnych kadłuba możemy wyznaczyć z następującej zależności:

$$ST_i = ST_{i-1} + \int_i^{i+1} c(x)dL . \quad (5)$$

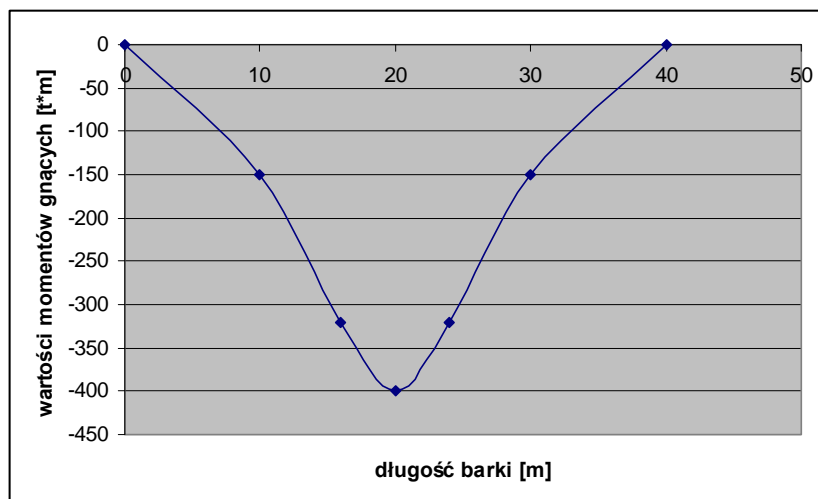
Natomiast wartości momentów gnących (MG) w poszczególnych przekrojach wzdłużnych z zależności:

$$MG_i = MG_{i-1} + \int_i^{i+1} ST(x)dL . \quad (6)$$

Wykres sił tnących oraz momentów gnących dla rozważanego przykładu przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Wykres sił tnących dla barki prostopadłościowej.



Rys. 6. Wykres momentów gnących dla barki prostopadłościowej.

Siły tnące osiągają maksymalne wartości w miejscach skrajnego położenia ładunku, natomiast wartości zerowe na końcach i w środku barki. Maksymalna wartość momentu gnącego występuje w środkowym miejscu położenia ładunku, który jest także środkiem barki. Maksymalny moment gnący wystąpi w miejscu, w którym siły tnące są najmniejsze.

Wykresy, które studenci tworzą podczas rozwiązywania tego typu przykładów służą do zaprezentowania toku postępowania przy obliczaniu wartości sił tnących i momentów gnących. Aby obliczyć występujące w rzeczywistym kadłubie statku siły tnące oraz momenty gnące należy posiadać następujące dane:

- informacja o rozkładzie ciężarów statku pustego,
- lista wszystkich ciężarów zmiennych znajdujących się na statku wraz z ich rozmieszczeniem,
- skala Bonjeana lub linie teoretyczne kadłuba statku do obliczenia pól przekrojów wręgowych.

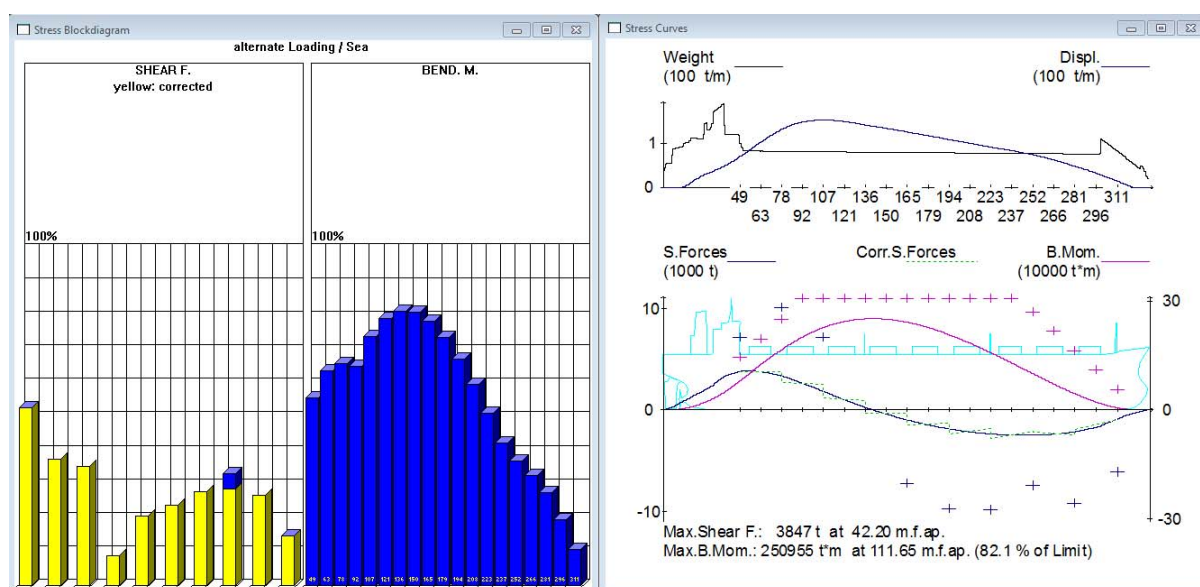
Wyliczanie sił tnących i momentów gnących dla rzeczywistego statku jest niezwykle czasochłonne i nie byłoby możliwe do przeprowadzenia przez studentów na zajęciach laboratoryjnych oraz w praktycznej eksploatacji statku. Dlatego też, nauka wykorzystywania kalkulatorów ładunkowych, w których wartości tych sił są obliczane automatycznie, jest

poprzedzona demonstracyjnymi obliczeniami dla prostego przykładu barki prostopadłościowej.

Ocena wytrzymałości ogólnej kadłuba statku w eksploatacji z wykorzystaniem kalkulatora załadunku

Jednym z narzędzi, które wspomagają kontrolę wytrzymałości wzdłużnej jest kalkulator załadunku. Przykład takiego kalkulatora

przedstawiona na rys. 7. Za pomocą tego typu programów wykonywane są obliczenia parametrów wytrzymałościowych oraz statecznościowych. Uzyskane wartości porównywane są z wartościami dopuszczalnymi dla danego typu konstrukcji oraz konkretnego stanu załadowania. Pozwala to na ocenę i weryfikację stateczności i wytrzymałości wzdłużnej kadłuba dla konkretnej sekwencji operacji ładunkowych.



Rys. 7. Wyniki obliczeń sił tnących i momentów gnących w kadłubie statku na przykładzie kalkulatora załadunku MACS 3 [3].

Scenariusz zajęć laboratoryjnych dotyczących opracowania sekwencji załadunku masowca pod kątem wytrzymałości ogólnej przedstawiono na rys. 8.

W etapie 1 realizowanego zadania dla początkowego stanu załadowania odczytywane są następujące parametry: zapas wyporności, procent zapełnienia zbiorników balastowych oraz zanurzenie na pionie dziobowym i rufowym. Na tym etapie należy odpowiedzieć na pytanie: Czy wytrzymałość ogólna statku w porcie jest wystarczająca? Pozytywna odpowiedź warunkuje przejście do kolejnego etapu.

Drugi etap dotyczący przygotowaniu planu ładunkowego, który polega na obliczeniu masy całkowitej ładunku oraz masy w poszczególnych ładowniach.

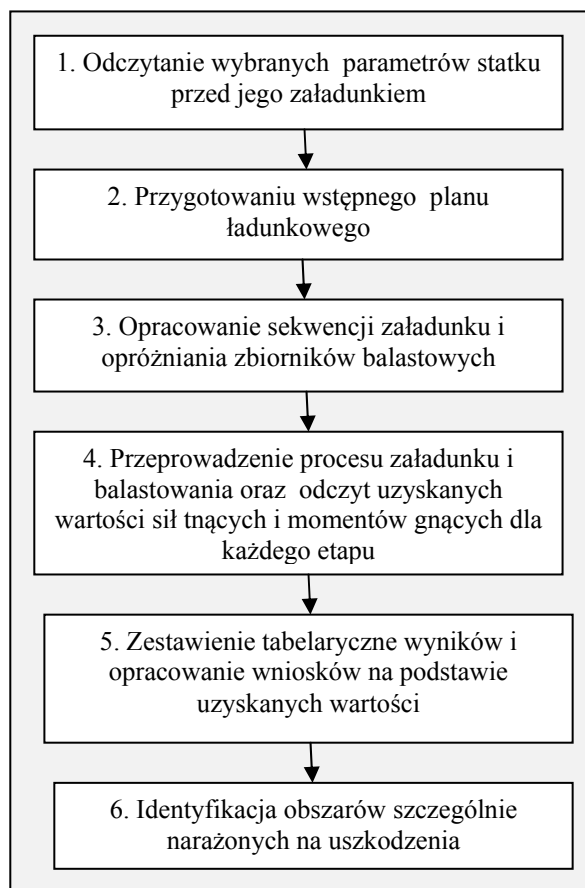
Na etapie 3 następuje ustalenie kolejności napełniania ładowni i opróżniania zbiorników balastowych.

Na podstawie opracowanej sekwencji w etapie 4 przeprowadza się symulację operacji ładunkowo-balastowych, z wykorzystaniem kalkulatora załadunku. Na tym etapie dokonywana jest kontrola stanu równowagi statku, parametrów statecznościowych i wytrzymałościowych kadłuba statku. Po załadowaniu wszystkich ładowni należy odczytać następujące wartości: zapas wyporności, całkowita masę ładunku i zanurzenia statku.

Uzyskane wyniki powinny zostać zaprezentowane w sprawozdaniu (etap 5), w którym w sposób tabelaryczny ujęte są poszczególne operacje wraz z wartościami sił tnących i momentów gnących po każdym etapie. Istotne jest

wykazanie miejsc występowania największych sił tnących i momentów gnących w kadłubie statku. Na tym etapie należy odpowiedzieć na pytanie: Czym spowodowane są duże wartości

siły tnącej i momentu? Ten etap analizy pozwala na wykonanie kolejnego, w którym identyfikowane są obszary kadłuba szczególnie narażone na uszkodzenia podczas eksploatacji.

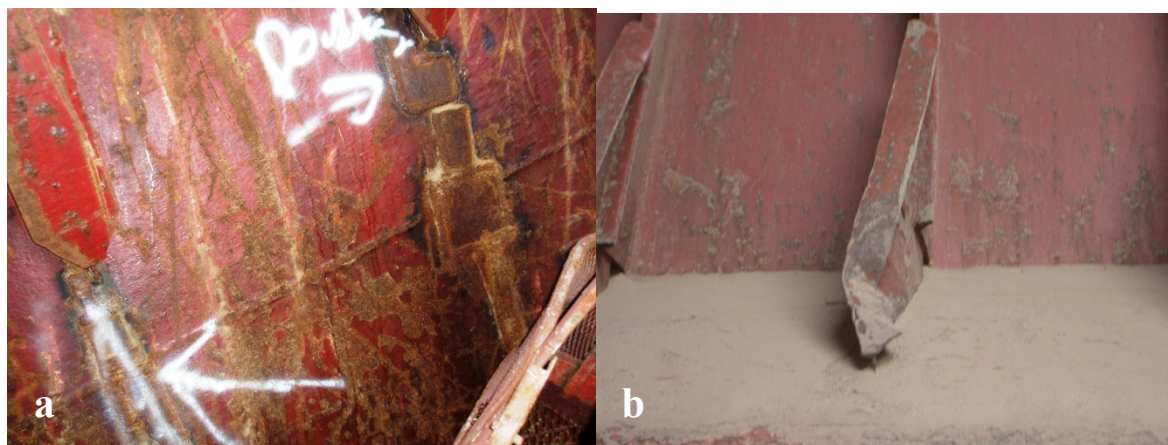


Rys. 8. Schemat procesu opracowania sekwencji załadunku masowca pod kątem wytrzymałości podczas zajęć laboratoryjnych [opracowanie własne na podstawie [1]].

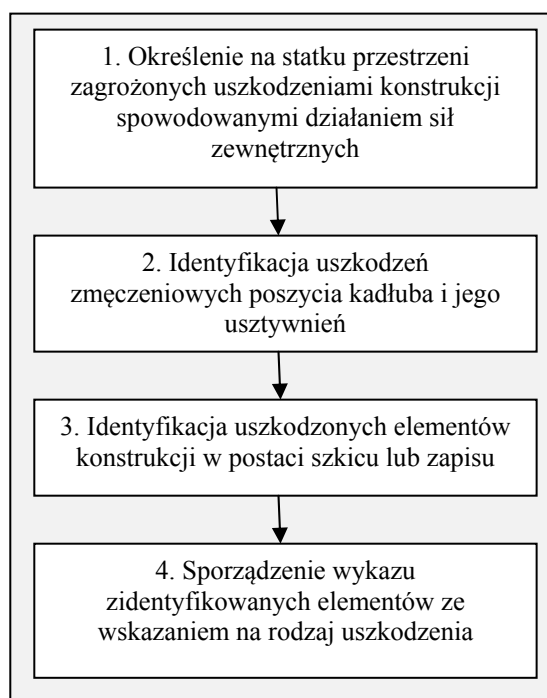
Wykorzystanie symulatora inspekcji statku (Survey Simulator) w wizualizacji uszkodzeń zmęczeniowych elementów kadłuba statku

Innym narzędziem wykorzystywanym w procesie dydaktycznym dotyczącym wytrzymałości kadłuba statku może być stworzony przez towarzystwo klasyfikacyjne Det Norsk Veritas-Germanischer Lloyd (DNV-GL) specjalny symulator o nazwie Survey Simulator (SuSi) [4]. Podstawowe funkcje tego symulatora pozwalają przede wszystkim na szczegółowe symulowanie inspekcji statku, z wyszczególnieniem obszarów kadłuba narażonych na uszkodzenia. W ten sposób można zaobserwować występujące zagrożenia elementów konstrukcyjnych statku ze względu na niewłaściwą eksploatację i znaczenie

poszczególnych elementów konstrukcyjnych w zapewnieniu bezpieczeństwa jednostce pływającej. Praca z symulatorem daje wiedzę nie tylko z zakresu budowy kadłuba statku, ale także z wykorzystania dokumentacji technicznej i właściwego przygotowania statku do inspekcji. Największym atutem symulatora jest fakt, iż pozwala on nabyć umiejętności niezbędne podczas przyszłej morskiej praktyki eksploatacyjnej. Główne funkcje symulatora pozwalają między innymi na symulowanie uszkodzeń w kadłubie statku (pęknięcia, wyboczenia, braki w wyposażeniu, inne) [2]. Do modułu dołączone są rzeczywiste fotografie, tak jak przedstawia rys. 9. Scenariusz zajęć laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatora inspekcji statku przedstawiono na rys. 10.



Rys. 9. Rzeczywiste zdjęcie uszkodzonego elementu konstrukcyjnego ładowni statku [4]:
a) przykład uszkodzenia (pęknięcie) krawężnicy dna podwójnego masowca, b) przykład uszkodzenia węzłówki w ładowni masowca.



Rys. 10. Schemat przebiegu zajęć laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatora inspekcji statku (opracowanie własne na podstawie [4]).

Podczas zajęć laboratoryjnych studenci odnajdują dla wybranego statku przestrzenie zagrożone uszkodzeniami konstrukcji o charakterze zmęczeniowym. Jest to dosyć trudne zadanie ze względu na to, iż w symulatorze występują również uszkodzenia o charakterze mechanicznym. Prawidłowe zidentyfikowanie uszkodzeń zmęczeniowych wymaga wiedzy teoretycznej o możliwych obszarach ich występowania.

Użyteczność symulatora inspekcji statku w nauczaniu zagadnień dydaktycznych związanych z wytrzymałością kadłuba statku można rozpatrywać w następujących aspektach:
- uświadomienia poziomu i konsekwencji zagrożeń wynikających z nieprawidłowo wykonanych operacji balastowo-ładunkowych podczas eksploatacji statku,

- zapewnienia właściwego stanu technicznego konstrukcji kadłuba statku w celu wydłużenia jego cyklu życia.

Podsumowanie

Nauczanie zagadnień związanych z wytrzymałością kadłuba statku może stanowić pewnego rodzaju trudność, gdyż na początkowym etapie kształcenia studentom szczególnie trudno wyobrazić sobie jakie jest oddziaływanie sił zewnętrznych oraz wewnętrznych na konstrukcję statku będącego w eksploatacji.

Usprawnienie procesu edukacji wymusza poszukiwanie nowych narzędzi, w celu sprawniejszego i skuteczniejszego przekazywania wiedzy oraz nabywania praktycznych umiejętności i kompetencji.

Zaprezentowana w pracy procedura nauczania zagadnień dotyczących wytrzymałości kadłuba statku obejmuje następujące etapy:

- obliczanie sił tnących oraz momentów gnących w barce prostopadłościennnej,
- ocenę wytrzymałości wzdłużnej kadłuba statku z wykorzystaniem kalkulatora załadunku rzeczywistego statku,
- wizualizację uszkodzeń zmęczeniowych elementów kadłuba statku w symulatorze inspekcji statku.

Zobrazowanie konsekwencji, jakie niesie ze sobą nieuwzględnienie działania różnych sił zewnętrznych i wewnętrznych podczas eksploatacji technicznej statku jest poprzedzone analizą teoretyczną niekorzystnych zjawisk. Ważne jest zachowanie odpowiedniej kolejności przeprowadzania analiz w procesie nauczania (tak jak pokazano w pracy), tak aby po zaprezentowaniu wiedzy teoretycznej możliwe było przeprowadzanie obliczeń, a następnie identyfikacja i wizualizacja uszkodzeń zmęczeniowych.

Bibliografia

1. Cepowski, T., Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu " Budowa i stateczność statku", Akademia Morska, Szczecin 2008.
2. Chorab, P., Łozowicka, D., Symulator inspekcji statku w procesie dydaktycznym nauki elementów konstrukcji kadłuba statku, *Logistyka* 6/2014, s. 2645-2652.
3. Kalkulator załadunku statku MACS 3, <http://www.interschalt.com/software/mac3-loading-computer.html> (dostęp 27.01.2016).
4. Towarzystwo Klasyfikacyjne DNV – GL, http://www.dnv.com/services/software/publications/2012/no_2/sesam_survey_imulator_innovative_technology_training_surveyors.asp (dostęp 27.01.2016).
5. Więckiewicz, W., Budowa kadłubów statków morskich, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2008.