

## PROGNOZOWANIE I OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI KADŁUBA OKRĘTOWEGO

Krzysztof ROSOCHOWICZ

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12,  
80-952 Gdańsk, sek2oce@pg.gda.pl

### Streszczenie

Omówiono aktualny stan wiedzy w zakresie przyczyn uszkodzeń kadłubów statków w eksploatacji. Wskazano na złożoność konstrukcji kadłuba. Podano zasady stopniowej dekompozycji analitycznej i badawczej konstrukcji do rozważań na różnych poziomach szczegółowości. Uwypuklono zasady tworzenia baz danych dotyczących pęknięcia konstrukcji kadłubów statków. Przedstawiono generalne zasady realizacji eksperymentów laboratoryjnych wielkogabarytowych modeli konstrukcji kadłubów. Scharakteryzowano założenia upraszczające metodykę i algorytm postępowania przy obliczeniowym prognozowaniu trwałości zmęczeniowej węzłów konstrukcji kadłuba statku.

Słowa kluczowe: kadłuby statków, zmęczenie, metody badań, metody obliczeń, prognozowanie trwałości.

### LIVE PREDICTION AND ESTIMATION OF FATIGUE DURABILITY OF SHIP HULL STRUCTURE

#### Summary

The paper presents current state of know how in the area of ships hull damages in operation. Complex character of hull structures is taken into account. Principles of decomposition of ship hull structure for analytical and test purposes for fatigue analysis, creation of data base of typical structural crack and fatigue experimental investigations are briefly characterized. Assumptions, and simplifications related of analytical fatigue life prediction methodology for ship hull structures are presented.

Keywords: ship hull, fatigue, experimental research and calculation methods, life prediction.

### 1. WPROWADZENIE

Do początków lat 70-tych XX wieku mimo znaczącego rozwoju techniki okrętowej problemy eksploatacyjnych uszkodzeń kadłubów statków skutkiem zmęczenia były w zasadzie marginalizowane. Prowadzono nawet badania laboratoryjne [1] celem udowodnienia, że w trakcie zawyżonej w stosunku do praktyki 30-to letniej eksploatacji statku nie może zaistnieć sytuacja, w której w zasięgu krzywej kumulacyjnej obciążeń eksploatacyjnych znajdują się wöhlerowskie charakterystyki zmęczeniowe stali kadłubowych z uwzględnieniem wpływu bogatego asortymentu karbów mechanicznych, czy zjawisk korozyjnych. Bagatelizowano przy tym zupełnie wpływ czynników technologicznych oraz efekt skali konstrukcji i przebiegu zjawisk, traktując je, zresztą słusznie, w zasadzie jako zjawiska o charakterze ściśle lokalnym. Sytuacja taka była źródłem wieloletnich zażartych sporów środowisk okrętowych, znajdujących odbicie w problematyce kolejnych kongresów International Ship Structures Congress odbywających się regularnie w odstępach

4-letnich. Brak akceptacji zjawisk zmęczeniowych w konstrukcjach kadłubów statków wynikał z [1]:

- nieznajomości wielu komponentów złożonego obciążenia kadłuba statku w eksploatacji,
- zdominowania procesów pęknięcia kadłubów stalowych przez często katastroficzne zjawiska pęknięcia kruchej wywołanego głównie słabym opanowaniem technik spawalniczych i towarzyszących im skutków (naprężenia własne, struktura, wady wykonawcze) oraz brakiem wiedzy w zakresie kształtowania składu i struktury stali w stanie wyjściowym,
- wystąpieniem problemu destrukcji statecznościowych w kadłubach statków,
- nieznajomości charakteru i mechanizmów narastania uszkodzeń zmęczeniowych w kadłubach statków, które mimo ściśle lokalnego charakteru rozwijały się wielopunktowo w określonych węzłach konstrukcji lub szczególnie niekorzystnie ukształtowanych i wykonanych rejonach tych węzłów,

- specyfiki rozwiązań konstrukcyjnych kadłubów statków, które składały się z niezliczonej ilości połączeń i węzłów elementarnych niedostępnych ówczesnym technikom obliczeniowym.

Rozwój kadłubów statków zmierzał w kierunku kreowania nowych typów struktur funkcjonalnych (np.: drobnicowce, kontenerowce, statki typu ro-ro dla ładunków wtocznych oraz transportu pojazdów czy też bogatej rodziny statków do przewozu stałych i płynnych ładunków masowych oraz różnych ich kombinacji uniwersalnych). Zwiększała się znacząco ilość statków, ich szybkość eksploatacyjna oraz moc napędów głównych. Jednocześnie coraz lepsze opanowywanie metodyki wymiarowania konstrukcji kadłuba statku niestety wyłącznie w oparciu o znajomość obciążeń statycznych, w tym od stanu załadowania na wodzie spokojnej oraz wprowadzanie kolejnych generacji stali kadłubowej zaowocowało znaczącym zmniejszeniem lokalnych i globalnych wskaźników przekroju. Kiedy z początkiem lat siedemdziesiątych praktycznie wyeliminowano pęknięcia kruche i zniszczenia odkształceniowe, pęknięcia zmęczeniowe stały się głównym czynnikiem determinującym uszkodzenia eksploatacyjne kadłubów statków [1].

Ze względu na złożoność i charakter konstrukcji kadłuba i warunki środowiskowe w okrętownictwie nie stosuje się w zasadzie technicznych metod diagnozowania stanu konstrukcji w trakcie eksploatacji. Jednakże w Przepisach Towarzystw Klasyfikacyjnych obok ustaleń konstrukcyjnych, materiałowych, spawalniczych i dotyczących wymagań stawianych urządzeniom i systemom okrętowym oraz remontom znajdują się regulacje dotyczące przeglądów konstrukcji kadłuba odbywających się w regularnych, obecnie 5-letnich odstępach czasu. Wyniki tych przeglądów są m.in. od lat katalogowane w kategoriach typów, grup i wielkości statków, tworząc odpowiednią bazę udokumentowanych, także fotograficznie danych o pęknięciach i innych uszkodzeniach kadłubów, dostępną aktualnie we współczesnych okrętowych konstrukcyjnych programach komputerowych [np.13]. Od początku lat 90-tych w programach tych znajdują się także uproszczone, lecz ciągle rozbudowywane procedury prognozowania trwałości zmęczeniowej węzłów konstrukcji kadłuba statku [8]. Program taki posiada również Polski Rejestr Statków [11]. Dla kadłubów statków szczególnie narażonych na pękanie (np. roporudomasowców „OBO”) prasa okrętowa postuluje prowadzenie systematycznej wizualnej kontroli obszarów szczególnie narażonych na pękanie [9]. Szereg instytucji okrętowych, w tym także zrzeszenie 10-ciu największych instytucji klasyfikacyjnych: International Association of Classification Societies (IACS), próbuje unifikować i ujednolicać przepisy instytucji narodowych oraz publikuje m.in. specjalne katalogi uszkodzeń

zmęczeniowych wraz z zalecanymi procedurami napraw tych uszkodzeń [6, 7]. Główne procedury zmęczeniowe Towarzystw Klasyfikacyjnych oparte są na tzw. projektowych krzywych Wöhlera i uproszczonych formułach określających naprężenia i szeroko rozumiane współczynniki koncentracji naprężenia w określonych metodami elementów skończonych obszarach o szczególnie wysokim zagrożeniu pękaniem (HOT SPOT). Trwałość w wybranych obliczeniowo tzw. punktach referencyjnych określana jest z uproszczonych reguł w latach, a zmodyfikowane prawo Palmgrena Minera służy do wskaźnikowego określania niebezpieczeństwa wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego. Pozostałe podobnego typu punkty konstrukcji objęte są uproszczoną procedurą, wykorzystując odpowiednie przeliczniki. Ważną rolę w kształtowaniu zmęczeniowej trwałości węzłów konstrukcyjnych kadłuba statku odgrywają optymalizacyjne badania laboratoryjne [1]. Są one prowadzone na zróżnicowanych jakościowo modelach badawczych, od tzw. małych prostych próbek, przez próbki złożone, fragmenty rozwiązań konstrukcyjnych, wielkogabarytowe modele konstrukcji kadłubowych aż do niezmiernie kosztownych modeli badawczych wykonywanych w skali naturalnej. Badania takie dostarczają informacji o trwałości zmęczeniowej poszczególnych rozwiązań, wytrzymałości zmęczeniowej, szybkości propagacji pęknięć, ich lokalizacji i złożonego sposobu rozwoju zniszczeń, pozwalają na optymalizację rozwiązań konstrukcyjnych. Generalnie można więc stwierdzić, że celem procedur zmęczeniowych rozwijanych w okrętownictwie w 3-ch kierunkach:

- inwentaryzacji uszkodzeń w katalogach,
- badań laboratoryjnych trwałości zmęczeniowej,
- uproszczonych procedur obliczeniowych,

jest podejmowanie próby zabezpieczenia „a priori” w procesie projektowania, możliwie wysokich właściwości zmęczeniowych konstrukcji [2, 3, 4, 5, 11]. Diagnozowanie bieżące jest natomiast prowadzone wzrokowo i ma na celu głównie sprawowanie kontroli nad rozwojem pęknięć w rejonach, gdzie jest to dopuszczalne oraz dobór odpowiednich metod ograniczających rozwój zniszczeń bądź ich naprawę.

## 2. TENDENCJE ROZWOJU ZNISZCZEŃ W KONSTRUKCJACH WSPÓŁCZESNYCH STATKÓW MORSKICH

Aktualnie uszkodzenia konstrukcji kadłubów statków skutkiem działania normalnych warunków eksploatacyjnych można opisać w następujących kategoriach:

- uszkodzenia odkształceniowe,
- uszkodzenia korozyjne,

- uszkodzenia przez pęknięcia, obecnie głównie zmęczeniowe,
- uszkodzenia skutkiem okresowego nakładania się wymienionych wyżej mechanizmów oraz pęknięcia kruche.

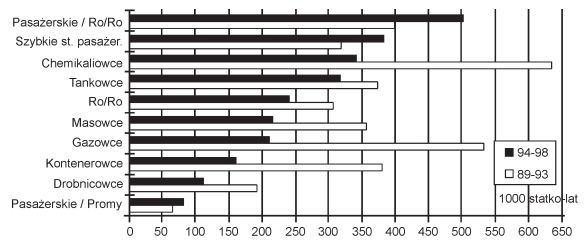
Wg [10] uszkodzenia odkształceniowe (głównie lokalna utrata stateczności) wynoszą mniej niż 10% ogólnej liczby uszkodzeń konstrukcji kadłubów statków stalowych. Natomiast uszkodzenia korozyjne utrzymują się w granicach 45%, a uszkodzenia przez pęknięcie 40% ogólnej liczby notowanych uszkodzeń.

Kategorie występujących uszkodzeń oraz czasokres od wejścia statku do eksploatacji do ich wykrycia zależą od wielkości, rodzaju i przeznaczenia statku oraz rejonu jego żeglugi [1]. W konstrukcjach kadłubów statków do przewozów ładunków masowych (zbiornikowce, masowce, ropo-rudo-masowce oraz statków ro-ro i pasażerskich) znaczące ilości pęknięć notuje się już po 5-ciu latach eksploatacji a po ok. 8-miu latach dołączają tu wtórne uszkodzenia korozyjne. Największe ilości nowych pęknięć notuje się w tych typach statków pomiędzy 8-mym a 12-tym rokiem eksploatacji. Generalnie można stwierdzić, że dla tej grupy statków wypukła się aktualnie tendencja wzrostu uszkodzeń przez pęknięcie do 50% ogólnej liczby notowanych uszkodzeń.

W konstrukcjach tradycyjnych statków drobnicowych pierwszą falę pęknięć obserwuje się po ok. 3 latach eksploatacji, przy czym przez ok. 20 lat utrzymuje się ona średnio na podobnym poziomie. Po ok. 14 latach eksploatacji wzrasta natomiast lawinowo zakres uszkodzeń korozyjnych. Na rys. 1 i 2 przykładowo pokazano za [10] ogólną ilość uszkodzeń konstrukcji kadłubów różnych typów statków oraz uszkodzeń wywołanych pęknięciem dla statków klasyfikowanych przez DNV w latach 1989-98.

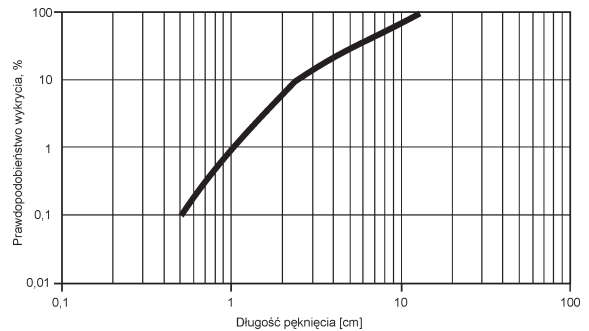
Z wykresów wynika, że prace podjęte nad stworzeniem i implantacją procedur zmęczeniowych przyniosły wyraźny efekt w stosunku do chemikaliowców, tankowców, masowców, statków do przewozu skroplonych gazów. Natomiast w przypadku statków pasażerskich, promów oraz ro-ro procedury okazały się niewystarczająco skuteczne dla zabezpieczenia przed generowaniem zwiększonej ilości uszkodzeń poprzez pęknięcia.

Rys. 1. Ogólna ilość uszkodzeń różnych typów konstrukcji kadłubów statków klasyfikowanych przez DNV w latach 1989-93 oraz 1994-98 wg [10]

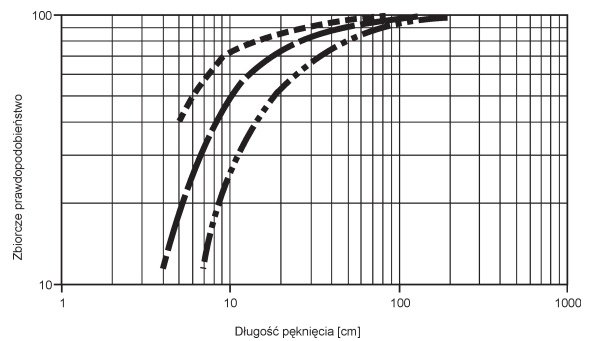


Rys. 2. Ogólna ilość uszkodzeń przez pęknięcia dla statków klasyfikowanych przez DNV w latach 1989-93 oraz 1994-98 wg [10]

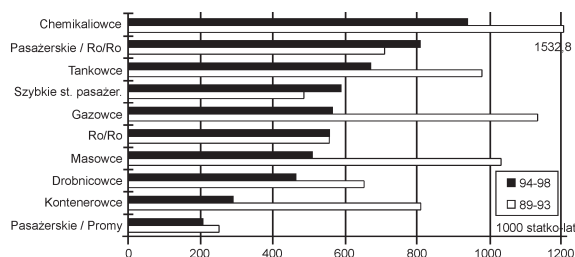
Problem uszkodzeń przez pęknięcie jest szczególnie trudny z uwagi na ograniczoną wykrywalność pęknięć w całej złożoności konstrukcji kadłuba (rys. 3, 4 i 5).



Rys. 3. Średnie prawdopodobieństwo wizualnego wykrycia pęknięcia w konstrukcji kadłuba statku [10]

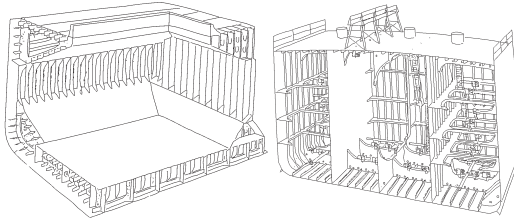


Rys. 4. Dystrybucja pęknięć wg długości wg raportów inspektorów DNV [10]



a)

b)



Rys. 5. Uproszczony przykład konstrukcji kadłuba dla a) masowca uniwersalnego (OBO) oraz b) zbiornikowca [10]

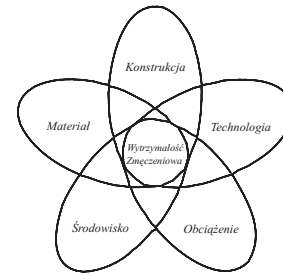
Uszkodzenia przez pęknięcia stwarzają rosnące zagrożenie ekologiczne i dla bezpieczeństwa statku, łączą się bowiem z powiększonym ryzykiem polucji ładunku a także utraty funkcji eksploatacyjnych przez statek a nawet katastroficznego jego zniszczenia (np. mt. ERICA zniszczona przez rozłamanie kadłuba).

Pęknięcia zmęczeniowe w zładach wiązań kadłubów statków w zdecydowanej większości przypadków należą do pęknięć relatywnie krótkich. Prawdopodobieństwo ich wykrywalności w górnym obszarze 10÷20 cm długości wynosi średnio 50÷80%. Znacząca ilość pęknięć mieści się jednak w zakresie kilkucentymetrowych długości a ich wykrywalność jest niewielka. Pęknięcia poszycia osiągają często także ponad metrowe długości, rzadko są jednak bezpośrednią przyczyną katastroficznego zniszczenia konstrukcji. Jeżeli dochodzi do większych awarii, to długie pęknięcia są najczęściej przyczyną utraty funkcji eksploatacyjnej konstrukcji np. szczelności zbiorników czy ładowni, a to może już grozić złożoną awarią innego typu niż dalszy rozwój długiego pęknięcia do kilkumetrowej długości krytycznej (w skali kadłuba statku).

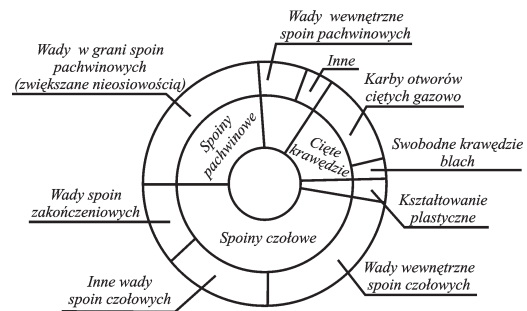
### 3. PRZYCZYNY I CHARAKTERYSTYKA INICJACJI PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH KONSTRUKCJI KADŁUBÓW STATKÓW

Trwałość i wytrzymałość zmęczeniowa konstrukcji kadłuba statku jest wynikiem współdziałania wielu czynników (rys. 6).

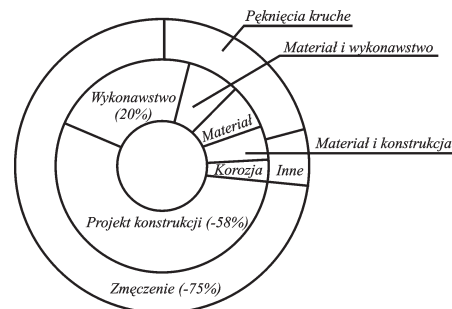
Złożoność tych czynników i ich często nieustalone, bardzo skomplikowane wzajemne relacje nie pozwalają jak dotąd na opracowanie jednolitej metodyki analizy i prognozowania własności zmęczeniowych konstrukcji. Dlatego też, mimo poznania i sklasyfikowania przyczyn typowych lokalnych pęknięć (rys. 7 i 8) przy prognozowaniu trwałości zmęczeniowej przyjęto stosować różne, często znaczące uproszczenia w rozumowaniu.



Rys. 6. Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową konstrukcji [1]



Rys. 7. Klasyfikacja i przyczyny pęknięć zmęczeniowych kadłubów statków [1]



Rys. 8. Klasyfikacja i jakościowy podział pęknięć zmęczeniowych wywołanych procesami wytwarzania konstrukcji [1]

Generalnie należy stwierdzić, że przyczyną inicjacji pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach kadłubów statków jest nakładanie się działania karbów różnego rodzaju i pochodzenia, bardzo zróżnicowanych składowych obciążenia oraz złożonych mechanizmów rozwoju zniszczeń. Cechą charakterystyczną tych pęknięć na etapie propagacji jest niestabilny ich rozwój, w którym okresy rozrostu pęknięcia przerywane są okresami całkowitego zatrzymania rozwoju. Cechą charakterystyczną niszczenia zmęczeniowego kadłuba statku jest również to, że punkt chwilowej intensywności rozwoju pęknięć przemieszcza się w sposób niestabilny w obrębie określonego obszaru węzła konstrukcyjnego lub strefy konstrukcji.

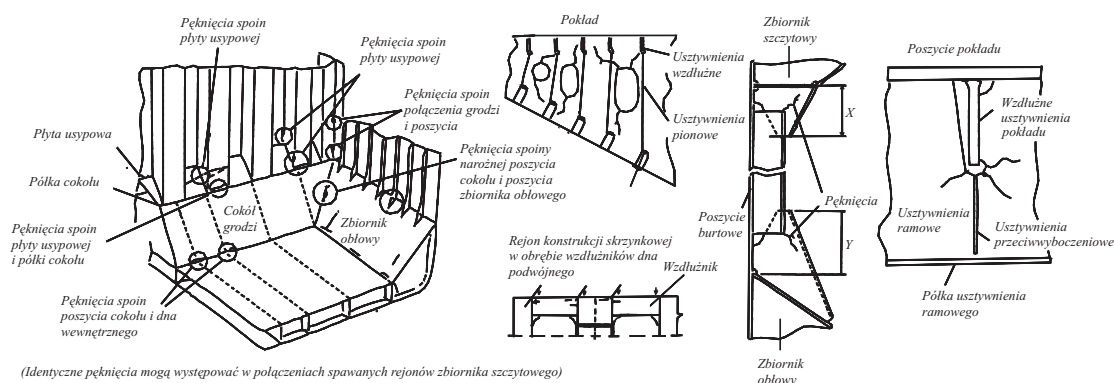


#### 4. TYPOWE RODZAJE PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH W KONSTRUKCJACH KADŁUBÓW STATKÓW

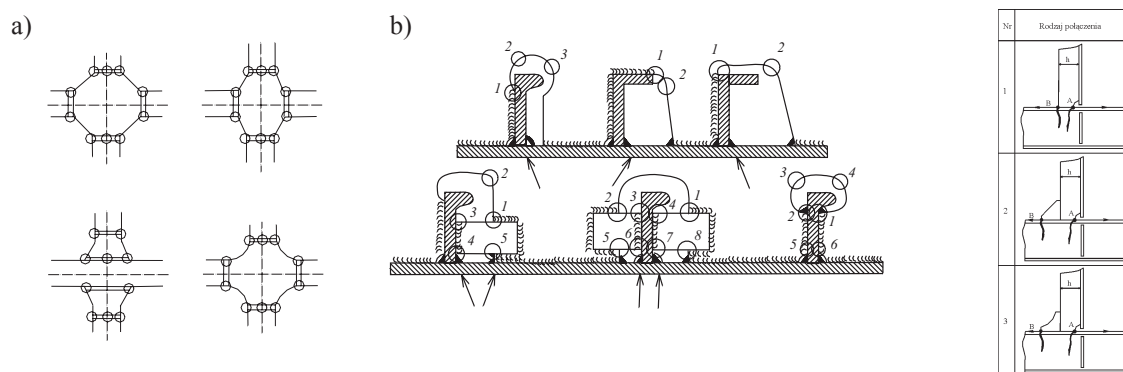
Generalnie każdy typ funkcjonalny statku posiada własne charakterystyczne miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych (rys.9).

Wynikają one generalnie ze sposobu ukształtowania poprzecznego i podłużnego zładu konstrukcji, rodzaju i rozmieszczenia ładunku i

balastów oraz charakterystyki eksploatacyjnej. Istnieją jednak dla wszystkich rodzajów statków charakterystyczne wspólne rodzaje pęknięć, zlokalizowane z reguły w zładach wiązań kadłuba a szczególnie w miejscach wzajemnego krzyżowania się wiązań różnych typów (rys.10) oraz obszarów połączenia wzajemnie prostopadłych zespołów konstrukcyjnych (np. burta-gródź, gródź-dno, burta-dno itp. węzłówki)



Rys. 9. Charakterystyczne obszary pęknięć zmęczeniowych w kadłubie masowca oraz wybrane przykłady pęknięć [1]



Rys. 10. Charakterystyczne punkty inicjacji pęknięć w zładach wiązań okrętowych [1] a) skrzyżowanie wiązarów, b) skrzyżowanie usztywnień o zróżnicowanej wysokości – kontur wycięcia i połączenie lokalnego usztywnienia przeciw wyboczeniowego z niskim usztywnieniem wzdłużnym

#### 5. METODY PROGNOZOWANIA RODZAJÓW I LOKALIZACJI PĘKNIĘĆ W KONSTRUKCJI KADŁUBÓW STATKÓW

##### 5.1. Opcje postępowania

Istnieją trzy kierunki działania w tym zakresie:

- systematyczne dokumentowanie pęknięć konstrukcji rzeczywistych (kierunek chronologicznie najstarszy),
- badania laboratoryjne modeli badawczych od próbek materiałowych poprzez próbki ze złączami i wielkogabarytowe próbki poszczególnych elementów konstrukcyjnych aż do wielkogabarytowych, często wykonanych w skali 1:1 kosztownych modeli złożonych

węzłów konstrukcyjnych a nawet określonych sekcji strefowych kadłuba (w skrajnych wypadkach wykonanych jako dublety konstrukcji montowanych w stoczni w kadłub statku),

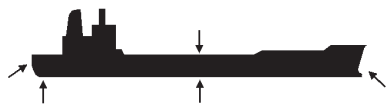
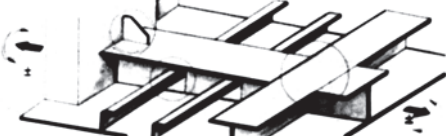



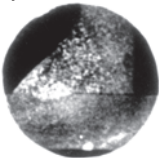
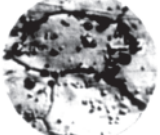
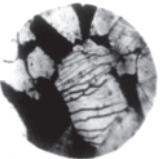
- postępowanie analityczno-obliczeniowe, wykonywane na ogół w ramach rozbudowanych globalnych programów obliczeniowych posiadających wydzielone bloki „zmęczeniowej kontroli konstrukcji”.

**Ad.a.** Budową bazy danych rzeczywistych pęknięć zmęczeniowych kadłubów statków zajmują się praktycznie wszystkie Towarzystwa Klasyfikacyjne, a także szereg znaczących instytucji międzynarodowych (np. International Institute of

Welding czy International Association of Classification Societies) oraz narodowych (np. brytyjski Department of Health and Security Executive czy wcześniej Department of Energy). W większości wypadków bogato udokumentowane przypadki pęknięć dostępne są w specjalnych katalogach [12] lub blokach zmęczeniowych specjalistycznych okrętowych programów konstrukcyjnych [13]. Podawany jest szkic pęknięć i ich lokalizacja, dokumentacja fotograficzna, prawdopodobne przyczyny inicjacji oraz

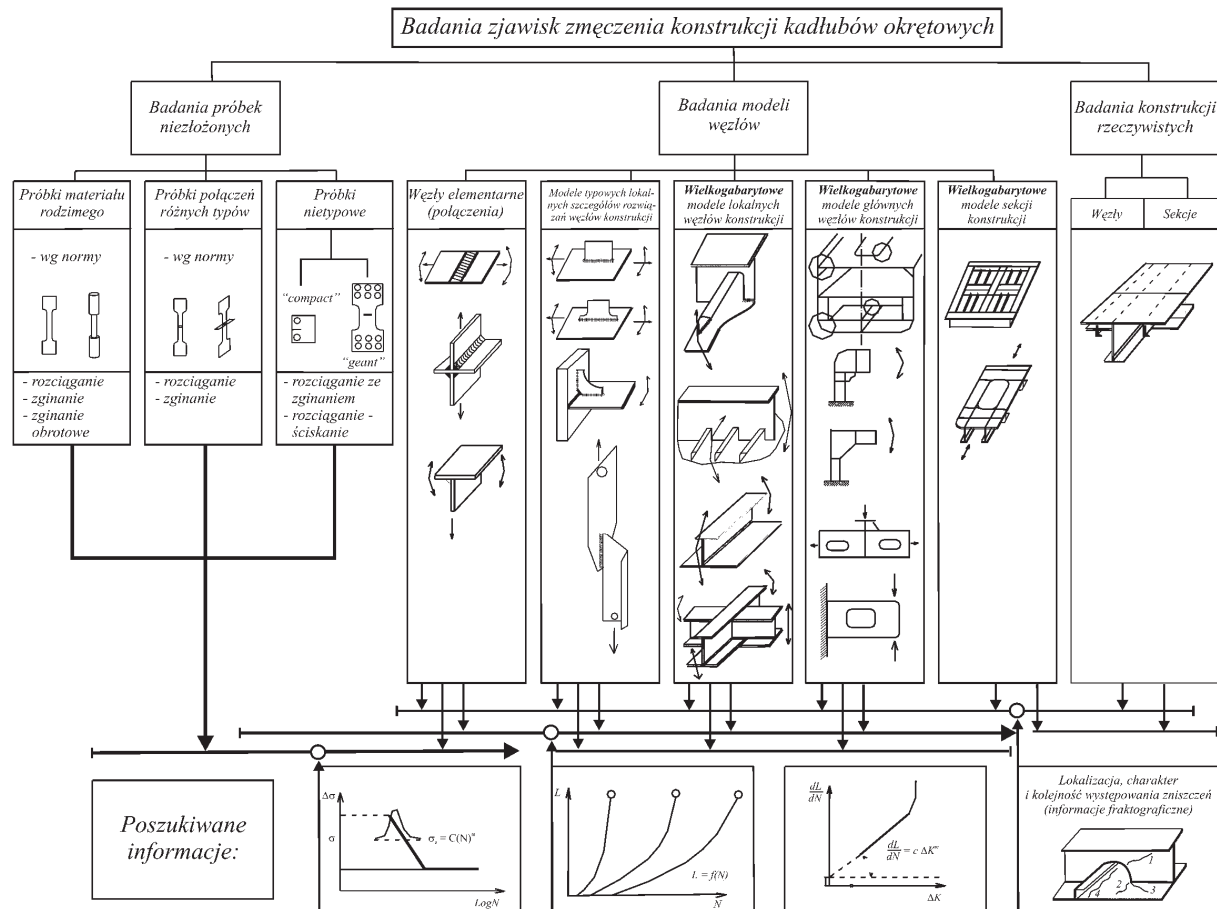
proponowane opcje naprawy uszkodzeń.

**Ad.b.** Badania laboratoryjne procesów inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych są problemem bardzo złożonym. Wynika to głównie z tego, że wynik uzyskany z badań jest zawsze odpowiedzią badanego podmiotu na warunki stworzone przez próbę. Biorąc pod uwagę charakter konstrukcji kadłuba badania są prowadzone dla różnych poziomów dekompozycji konstrukcji kadłuba (rys. 11).

Skala obserwacji	Poszukiwane informacje	Rozpatrywane czynniki
Kadłub okrętu	1. Najbardziej obciążone obszary kadłuba. 	- obciążenia zewnętrzne - obszary oddziaływania maksymalnych obciążeń - wymiary wiązań konstrukcyjnych - obszary nieciągłości
Część konstrukcji	2. Najbardziej obciążone elementy konstrukcyjne. 	- charakter obciążenia siłami zewnętrznymi - rozkład naprężeń w wiązaniach i poszyciu - miejsca spiętrzenia naprężeń
Wzł konstrukcji	3. Miejsca spiętrzenia naprężeń. 	- karby konstrukcyjne - przebieg linii sił w obszarze karbów konstrukcyjnych - osłabienia przekroju
Szczegóły konstrukcji węzła	4. Miejsca prawdopodobnych uszkodzeń zmęczeniowych. 	- usytuowanie spoin - zakończenia spoin - geometria szczegółów konstrukcyjnych - rozkład naprężeń - miejsca spiętrzenia naprężeń
Szczegóły wykonania węzła	5. Miejsca zapoczątkowania zmęczeń. 	- wady wykonawcze powiększające spiętrzenie naprężeń - jakość powierzchni w miejscach spiętrzenia naprężeń
Makro-struktura	6. Miejsca początkowych zmian strukturalnych. 	- zróżnicowanie strukturalne powodujące zróżnicowanie właściwości wytrzymałościowych i dodatkowe naprężenia
Mikro-struktura	7. Najsłabsze elementy struktury. 	- jakość struktury - wielkość ziarna - granice ziaren - składniki stopowe - zanieczyszczenia i segregacje
Elementy mikro-struktury	8. Procesy zmian w granicach ziaren. 	- budowa granicy ziarna - stan odkształcenia ziarna - struktura wewnątrz ziarna - wakanse, dyslokacje, wtrącenia

Rys. 11. Poziomy dekompozycji problemu pęknięcia zmęczeniowego konstrukcji kadłuba statku oraz materiałów konstrukcyjnych [1]

Poziomom tym odpowiadają odpowiednie próbki i modele badawcze (rys. 12).



Rys. 12. Klasyfikacja próbek i modeli badawczych oraz poszukiwanych w badaniach informacji [1]

Generalnie poszukuje się rodziny krzywych Wöhlera dla określonych rozwiązań konstrukcyjnych, krzywych korelacyjnych na warunki korozyjne próby oraz jakość wykonawstwa, krzywych propagacji pęknięć  $l = f(N)$  i pochodnych charakterystyk propagacji  $\frac{dL}{dN} = C(\Delta K)^m$  a także

charakterystycznych lokalizacji pęknięć i informacji o przebiegu procesów niszczenia w różnych warunkach środowiska i technologii wykonawczych oraz sztywności konstrukcji.

Uzyskiwane wyniki mogą w kolejnych krokach optymalizacyjnych doprowadzić do doboru prawidłowego rozwiązania konstrukcyjnego i procesu jego wytwarzania. Jest to działanie długotrwałe i bardzo kosztowne – stąd obecnie rzadko wybierane. Wyniki te mogą też tworzyć bazy danych do wypracowania założeń dla analitycznych obliczeń symulacyjnych oraz znajdować zastosowanie do wycinkowej kontroli prawidłowości wylczeń, co staje się obecnie standardem.

Metody badawcze wymagają szeregu działań upraszczających, szczególnie w zakresie:

- wyboru reprezentatywnego rozwiązania konstrukcyjnego,
- wyboru i schematyzacji widma i sposobu przykładania obciążenia,
- wyboru odpowiednich warunków brzegowych podparcia i zamocowania modeli badawczych.

Do realizacji tego typu badań niezbędne są kompleksowe laboratoria specjalistyczne. Do wiodących w Europie należą: Ship Structures Laboratory – Delft, DNV Laboratory – Høvik, Ship Structures Laboratory – Hamburg oraz Laboratorium Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

**Ad.c.** Mimo obszernej bazy danych charakterystyk propagacji dla materiałów w stanie wyjściowym oraz ich połączeń, a także modeli fragmentów czy też całych węzłów konstrukcyjnych w zmęczeniowych analizach konstrukcji okrętowych instytucjonalnie nie wykorzystuje się dotąd filozofii projektowania dla warunków bezpiecznego pęknięcia (FAIL SAFE). Działania analityczne ujęte w procedurach Towarzystw Klasyfikacyjnych prowadzone są w obszarze ograniczonej trwałości zmęczeniowej (SAFE LIFE) w oparciu o rodzinę

tw. projektowych krzywych Wöhlera (S-N) odwzorowujących formułę  $\sigma^m \cdot N = C$  w układzie logarytmicznym. Krzywe te (w zależności od instytucji firmującej procedurę) zawierają się w granicach od 4 do 8 a nawet 14. Każda z krzywych odpowiada określonej grupie wzorcowych elementów konstrukcyjnych. Dane są też zunifikowane dla wszystkich rozwiązań geometrii elementu krzywe ujmujące wpływ środowiska korozyjnego oraz standardu wykonania konstrukcji. Krzywe określane są doświadczalnie w laboratoriach, dlatego przy ich stosowaniu do obliczeń zmęczeniowych konstrukcji niezbędne jest wprowadzenie różnych poprawek. Do oceny parametrów wytrzymałości zmęczeniowej przy użyciu krzywych projektowych przyjmuje się trzy opcje naprężeń kalkulacyjnych dla obciążenia rozciągania i zginania:

- naprężenia nominalne,
- tzw. naprężenia geometryczne, wyznaczone przez graficzną liniową interpolację geometryczną w punkcie potencjalnego zagrożenia pęknięciem zmęczeniowym (tzw. HOT SPOT),
- naprężenia rzeczywiste, określane dla potencjalnego punktu inicjacji, ze znajomości naprężeń nominalnych oraz stabelaryzowanych współczynników koncentracji naprężeń K uzyskanych z obliczeń MES lub badań laboratoryjnych.

### 5.2. Procedury prognozowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji kadłuba statku

Stosowane są dwie podstawowe procedury:

- ✓ bezpośrednia, oparta na znajomości widma wymuszeń falowaniem morza właściwym dla określonych, zdefiniowanych akwenów morskich,
  - ✓ deterministyczna (uproszczona),
- Dla procedury pierwszego rodzaju, określającej długoterminowe widmo rozkładu naprężeń konieczna jest znajomość funkcji falowania morza w różnych warunkach eksploatacji oraz tzw. funkcja przeniesienia, opisująca widmo naprężeń w konstrukcji wywołane falowaniem morza. Funkcje przeniesienia określa się dla każdego „hot spotu” dla różnych opcji załadowania, prędkości statku, jego kursu do fali oraz znajomości warunków falowania na trasie podróży. Znając długookresowy rozkład naprężeń w postaci widma skumulowanego i wykorzystując krzywe projektowe S-N oraz prawo Palmgrana-Minera kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych dla cyklu eksploatacji statku określić można w długotrwałym, pracochłonnym cyklu obliczeń prognozę trwałości zmęczeniowej analizowanych węzłów konstrukcji.

Procedura uproszczona, dająca wyniki mniej dokładne, również opiera się na krzywych S-N oraz prawie Palmgrana-Minera. Inaczej określa się

jednak długoterminowe rozkłady naprężeń. Podstawą jest oszacowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa tego rozkładu na podstawie dwuparametralnego rozkładu Weibulla.

Postępowanie prowadzi się w następujących krokach:

- określenie obciążeń,
- dobór i korekta krzywej S-N,
- dobór opcji naprężenia kalkulacyjnego,
- obliczenie uszkodzenia zmęczeniowego.

### 5.3. Identyfikacja stanów obciążenia

Na obciążenie kadłuba składają się:

1. Ciężar statku i jego rozłożenie (statycznie).
2. Ciężar ładunku oraz balastu i jego rozłożenie (statycznie).
3. Siły wyporu i ich rozłożenie (statycznie).
4. Obciążenie od falowania:
  - a) zmiany ciśnienia hydrostatycznego (nurzenie i kołysanie),
  - b) parcie od dynamicznych ruchów ładunku,
  - c) udary fali (slamming) (dziób, rufa).
5. Obciążenia od pracy systemów napędowych i pomocniczych (śruba, wał, silnik, napędy, przekładnie, różne agregaty itp.).
6. Obciążenie od działania wiatrów i prądów morskich.
7. Obciążenia od krótko i długo okresowych zmian temperatury.
8. Statyczne i udarowe obciążenia od działania lodów.
9. Naprężenia technologiczne (statyczne).

W procedurze uproszczonej uwzględniane są wyłącznie składowe 1, 2, 3 oraz 4a i 4b.

### 5.4. Pewniki i założenia upraszczające dla procedur prognozowania trwałości zmęczeniowej

- trwałość zmęczeniowa materiału w stanie dostarczenia rośnie praktycznie liniowo wraz ze wzrostem  $R_m$  i dla okrętowych stali normalnej wytrzymałości (NW) jest niższa niż dla stali podwyższonej wytrzymałości (PW),
- trwałość zmęczeniowa połączeń spawanych dla wszystkich rodzajów stali okrętowych jest niższa niż dla materiału rodzimego i nie zależy od właściwości statycznych materiału,
- zjawiska korozyjne generalnie obniżają trwałość zmęczeniową o ok. 50% w stosunku do uzyskanej dla warunków „bezkorozyjnych”,
- w przypadku korozji wodnej wytrzymałość zmęczeniowa dla wszystkich rodzajów stali okrętowych nie jest zależna od właściwości statycznych,
- trwałość zmęczeniowa jest znacząco zależna od szczegółowego zaprojektowania elementów węzła konstrukcji, należytego ich wykonania w procesie produkcyjnym oraz oddziaływania środowiska,
- staranne pokrywanie konstrukcji powłokami



- ochronnymi zwiększa trwałość zmęczeniową,
- o trwałość zmęczeniowa w warunkach lokalnego zginania jest niższa niż dla rozciągania,
- o lokalne asymetryczne zginanie elementów konstrukcji obniża dodatkowo trwałość zmęczeniową,
- o trwałość zmęczeniowa konstrukcji statków eksploatowanych na trasach północno atlantyckich jest niższa do 50% w stosunku do innych światowych morskich tras żeglugowych,
- o obliczenia zmęczeniowe należy prowadzić dla wszystkich znaczących stanów załadowania oraz stanów balastowych,
- o punkty potencjalnej inicjacji pęknięć zmęczeniowych (HOT SPOT) należy określać drogą obliczeń MES,
- o określenie uszkodzenia zmęczeniowego  $D_i$  dla określonego i-tego stanu załadowania należy określać ze zmodyfikowanej reguły Palmgren-Minera o postaci:

$$D_i = \frac{\alpha_i N_L}{C} \frac{S_R^m}{(L_n N_R)^{m/k}} \eta \Gamma \left( 1 + \frac{m}{k} \right)$$

gdzie:

$N_L$  – szacunkowa liczba cykli w czasie eksploatacji statku,

$M$  – współczynniki pochylenia krzywej projektowej S-N

$\Gamma$  – funkcja gamma Eulera,

$\alpha_i$  – część czasu eksploatacji statku przy analizowanym stanie załadowania (np. balast, pełny ładunek itp.),

$S_R$  – skrajny zakres naprężeń w czasie  $N_R$  cykli (parametr rozkładu Weibulla),

$N_R$  – ilość cykli odpowiadająca prawdopodobieństwu przekroczenia zakresu  $10^{-8} \leq 1/N_R \leq 10^{-2}$  przy wartości parametru „Weibulla”  $0,7 \leq k \leq 1,3$ ,

$m$  i  $C$  – stałe.

- o sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe określonego węzła konstrukcji wyraża się formułą:

$$D = \sum_i D_i$$

- o trwałość zmęczeniową węzła konstrukcji określa formuła:

$$N_F = \frac{\text{Trwalosc projektowa}}{D}$$

- o trwałość (w latach) określana jest wzorem:

$$N \cong C_s \left( \frac{1}{\sigma \cdot K} \right)^3$$

$\sigma$  – naprężenie nominalne,

$K$  – zintegrowany umowny współczynnik koncentracji naprężeń,

$C_s$  – stała ujmująca wpływ środowiska.

- o zintegrowany współczynnik koncentracji naprężenia opisuje formuła:

$$K = K_g \cdot K_w \cdot K_o \cdot K_{te} \cdot K_{t\alpha} \cdot K_n$$

gdzie:

$K_g$  – współczynnik geometrycznej koncentracji naprężeń,

$K_w$  – współczynnik geometrii spoiny (ok. 1,5),

$K_e$  – współczynnik jakości zakończenia spoiny,

$K_{te}$  – współczynnik koncentracji dla tolerancji „przekoszenia” krawędzi przy spawaniu doczołowym,

$K_{t\alpha}$  – współczynnik koncentracji wywołany kątowym odkształceniem spoin doczołowych,

$K_n$  – współczynnik koncentracji dla profili asymetrycznych,

- o naprężenie rzeczywiste w punkcie potencjalnej inicjacji pęknięcia (HOT SPOT):

$$S = K \cdot \Delta \sigma_{nom}$$

- o trwałość zmęczeniową wyznacza się dla wybranych z analizy statycznej MES tzw. punktów referencyjnych,

- o dla pozostałych punktów trwałość oznacza się przez określenie przeliczeniowej wartości naprężeń lokalnych  $\sigma_i$  w stosunku do naprężeń punktu referencyjnego  $\sigma_{ref}$

$$\sigma_i = \sigma_{ref} \cdot C_x$$

gdzie:

$C_x$  – iloczynowy współczynnik ujmujący wpływ stabelaryzowanych współczynników jednostkowych określających wpływ:

- kształtu spoiny,
- lokalnych ciśnień dynamicznych,
- sił ściskających we wiązarach,
- rodzaju połączenia przenikających się systemów wiązań
- otworów konstrukcyjnych,
- węzłówek.

Następnie powtarza się dla  $\sigma_i$  procedurę obliczeniową.

## 5.5. Komputerowe systemy obliczeniowe dla konstrukcji kadłubów okrętowych

Rozwój techniki komputerowej stworzył możliwości trójwymiarowego modelowania konstrukcji kadłuba (koncept model). Model ten stworzył możliwości wprowadzenia procedur zmęczeniowych dla analizy konstrukcji. Aktualnie możliwości takie oferują następujące systemy: Nauticus Hull (DNV), Safe Hull (ABS), Ship Rights (Lloyd), Posejdon (GL), VeriStar (BV) a także procedury PRS.

## 6. PODSUMOWANIE

1. W okrętownictwie nie istnieje pojęcie technicznego diagnozowania stanu konstrukcji kadłuba statku w eksploatacji.
2. Przeglądy okresowe stanu konstrukcji nie są w stanie zidentyfikować większości tzw. małych pęknięć.
3. Procedura zabezpieczania pożądanej trwałości

zmęczeniowej sprowadza się do wieloopcyjnych obliczeń zmęczeniowych opartych na znacząco uproszczonych formułach oraz doświadczeniu.

4. W wymienionych działaniach osiągnięto znaczący postęp a nieustannie doskonalone procedury i algorytmy postępowania wpisano w przepisy klasyfikacyjne.
5. Problemu projektowego kształtowania trwałości zmęczeniowej rozwiązań konstrukcyjnych kadłubów statków nie można uznać jeszcze za opanowany.
6. Znaczące zmiany charakterystyk nowych typów statków (rosnące wymiary kadłuba – statki typu VLCC, duże szybkości eksploatacyjne – statki typu HSLC, wzrost mocy siłowni, podwójne kadłuby oraz nowa generacja spawanych laserowo, sandwich'owych konstrukcji stalowych czy wprowadzanie m.in. kompozytów nie metalowych) są przyczyną, dla której prowadzi się w dalszym ciągu zaawansowane prace badawcze nad doskonaleniem możliwości prognozowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji statków.

## 7. LITERATURA

- [1] K. Rosochowicz: Problemy pękania zmęczeniowego kadłubów statków. Monografia. Wyd. Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2000.
- [2] Fatigue Strength of Welded Ship Structures, BV-Rules, 1999.
- [3] Rules for Classification and Construction, Section 20. Fatigue Strength – GL Rules, 1999.
- [4] Fatigue Assessment of Ship Structures. DNV Classification Note Nr 307, 1998 and Procedures: CSA-2, Plus-1, Plus-2.
- [5] Fatigue Design Assessment Procedure – LRS 1998.
- [6] Report on the Development of a Unified Procedure for Fatigue Design of Ship Structures. IACS Report 1996.
- [7] Fatigue Assessment of the Ship Structures. IACS 1999.
- [8] B.Blagojewic, Z.Domazet, K.Zima: Procedural, Operational and Theoretical Sensitivites of Fatigue Damage Assessment in Shipbuilding. Jour.of Ship Prod. Nr IX/2002.
- [9] J.M.Fergusson: Bulk carriers the need to know. Lloyds List 30.X.1997.
- [10] W.Magelssen: Fatigue the Challenge for Modern Ship Design. DNV Paper Nr 2000-P004 (Febr.2000).
- [11] Fatigue Strength Analysis of Steel Ship Hull Structures. Publ. PRS Nr45/P/1998
- [12] Bulk Carriers: Guide Lines for Surveys Assessment and Repair of Hull Structure. IACS 1994.
- [13] Nauticus Hull – DNV Information Bulletin 2000.



Prof. dr hab. inż. Krzysztof Rosochowicz (1938) (dr nt 1962, dr hab. 1986, prof. P.G. 1993, prof. tyt. 2002) od roku 1992 do chwili obecnej kierownik Katedry Technologii Okrętu, Systemów Jakości i Materiałoznawstwa. W latach 1996-2002 Dziekan Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Specjalizuje się w zagadnieniach optymalizacji technik wytwarzania oraz wytrzymałości eksploatacyjnej konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem problemów zniszczenia zmęczeniowego wielkogabarytowych konstrukcji spawanych. Jest przewodniczącym Grupy Zmęczeniowego Projektowania Konstrukcji Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji KBM PAN.