

Polski Rejestr Statków

PRZEPISY

ZMIANY NR 1/2005

do

PUBLIKACJI NR 45/P

**ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
STAŁOWEGO KADŁUBA STATKU**

1998



GDAŃSK

Zmiany nr 1/2005 do Publikacji nr 45/P – Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku – 1998, zostały zatwierdzone przez Zarząd PRS S.A. w dniu 16 listopada 2005 r. i wchodzi w życie z dniem 15 grudnia 2005 r.

Wymagania zawarte w *Zmianach Nr 1/2005* mają w pełnym zakresie zastosowanie do wszystkich statków morskich z klasą PRS.

Wprowadza się następujące zmiany do Publikacji Nr 45/P – Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku – 1998:

1. *W ostatnim zdaniu punktu 2.2.8.1 obecny zapis:*

..., dla których nie podano wartości współczynników koncentracji naprężeń w 2.2.8.3 i 2.2.3.4, ...

zmienia się na:

..., dla których w 2.2.8.3 i 2.2.8.4 nie podano wartości współczynników koncentracji naprężeń, ...

2. *W tabeli 2.2.8.4, Nr 24, kolumna 3, obecny zapis:*

$$r < 0,5h \text{ albo } \varphi < 20^\circ$$

zmienia się na:

$$r < 0,5h \text{ albo } \varphi > 20^\circ.$$

3. *W tabeli 2.4.3-2, w ostatniej kolumnie, zmienia się wartość współczynnika redukcyjnego z 2,54 na 2,13.*

4. *Dodaje się podrozdział 2.4.4:*

2.4.4 Próby zmęczeniowe konstrukcji prototypowych

2.4.4.1 W przypadku konstrukcji prototypowych, w których zastosowano nietypowe rozwiązania węzłów konstrukcyjnych, może być wymagane sprawdzenie wytrzymałości zmęczeniowej poprzez przeprowadzenie laboratoryjnych prób zmęczeniowych.

Próby takie można wykonać przy stałych wartościach zakresów obciążeń, przestrzegając następujących zasad:

- modele powinny być zbudowane ze stali o takich samych parametrach jak konstrukcja rzeczywista;
- przy wytwarzaniu modelu należy zastosować te same procedury spawalnicze, które będą stosowane przy wytwarzaniu konstrukcji;
- współczynnik asymetrii cykli naprężeń, $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, powinien podczas

prób zachowywać stałą wartość przy różnych poziomach obciążeń i naprężeń; zalecane jest zastosowanie R z przedziału $<0; 0,1>$.

2.4.4.2 Szczegółowe wymagania dotyczące prób zmęczeniowych są każdorazowo określone przez PRS.

2.4.4.3 W uzupełnieniu do prób zmęczeniowych zalecane jest wykonanie obliczeń MES dla testowanego modelu konstrukcji w celu opracowania procedury obliczania naprężeń geometrycznych w konstrukcji rzeczywistej.

W szczególności zalecane jest obliczenie wartości naprężeń w miejscach, w których w trakcie prób zmęczeniowych wykonywane są tensometryczne pomiary naprężeń.

5. Wzór (2.5.3) otrzymuje postać:

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\Delta\sigma_1}{\left(\frac{t_B}{t}\right)^{0,3}} \quad (2.5.3)$$

6. Punkt 2.6.1 otrzymuje brzmienie:

2.6.1 Zasady ogólne

Standard wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba stosowany w niniejszej Publikacji oparty jest na założeniu, że statek jest eksploatowany przez co najmniej 20 lat w rejonie północnego Atlantyku.

Jeżeli Armator zakłada eksploatację statku na określonej trasie żeglugowej o łagodniejszych (statystycznie) warunkach pogodowych, dopuszczalne jest wykonanie obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba dla obliczonego bezpośrednio dla założonej trasy żeglugowej długoterminowej rozkładu obciążeń – według rozdziału 3.

W takiej sytuacji PRS może także, po odrębnym rozpatrzeniu, wyrazić zgodę na zastosowanie obliczeń uproszczonych z zastosowaniem długoterminowego rozkładu zakresu naprężeń wyznaczonego wg punktu 2.3 dla wartości $\Delta\sigma_R$ zmniejszonej o 20% ($\Delta\sigma_R$ jest wyznaczane dla obciążeń obliczeniowych przyjmowanych wg Przepisów).

Sprawdzenie kryterium wytrzymałości zmęczeniowej może być wykonane w sposób szacunkowy według 2.6.8.

7. Wzór (2.6.5-1) otrzymuje postać:

$$D_0 = \sum_{i=1}^{I_p} \frac{n_i}{N_i} \quad (2.6.5-1)$$

8. Wprowadza się następujące zmiany w tabeli 2.6.7-1:

- dla $n = 2,40$ wartość $\Gamma(n + 1) = 2,9812$ (było 3,9812)
- dla $n = 6,50$ wartość $\Gamma(n + 1) = 1871,3$ (było 1571,3)

9. Punkt 3.2.1 otrzymuje brzmienie:

3.2.1 Wykonując prognozę krótkoterminową dla wartości zakresów naprężeń w elementach konstrukcji kadłuba należy obliczyć momenty m_0 i m_2 funkcji gęstości widmowej zakresów naprężeń $S_{\Delta\sigma}$, wyznaczające tzw. rozkład Rayleigha (3.2.4) lub liczbę cykli obciążenia (3.4):

$$m_i = \int_0^{\infty} \omega^i S_{\Delta\sigma}(\omega) d\omega \quad (3.2.1)$$

$i = 0, 2$ – rząd momentu funkcji ;
 ω – częstość kątowna fali, [1/s];
 $S_{\Delta\sigma}(\omega)$ należy obliczać według 3.2.2.

10. *Punkt 3.2.2 otrzymuje brzmienie:*

3.2.2 Funkcję gęstości widmowej $S_{\Delta\sigma}(\omega)$ należy obliczać wg wzoru:

$$S_{\Delta\sigma}(\omega) = |Y(\omega)|^2 S_{\zeta}(\omega) \quad (3.2.2)$$

gdzie:

ω – częstość kątowna fali, [1/s];
 $Y(\omega)$ – funkcja przenoszenia zakresu naprężeń, tzn. wartość $\Delta\sigma$ odpowiadająca obciążeniom kadłuba na fali regularnej o jednakowej amplitudzie, o częstości kątowej ω , przy prędkości v statku (patrz p. 3.1.4) i przy kącie kursowym μ ($\mu = \pi$ gdy statek przemieszcza się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu fali, prostopadle do linii grzbietów fal).

11. *Punkt 3.2.3 otrzymuje brzmienie:*

3.2.3 Funkcję gęstości falowania należy przyjmować w następującej formie:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{H_s^2}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_0} \right)^4 \omega^{-5} \exp \left(- \frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_0} \right)^4 \omega^{-4} \right) \quad (3.2.3)$$

gdzie:

ω – patrz 3.2.1;
 H_s – znacząca wysokość fali, [m];
 T_0 – średni okres fali (tj. średni odstęp pomiędzy chwilami, gdy poziom wody przekracza poziom zerowy w górę), [s].

12. *W p. 3.3.1 zmienia się symbol „ T_1 ” na „ T_0 ”, symbol „ T_{1j} ” na „ T_{0j} ”, a symbol „ m_{ijkl} ” poniżej wzoru 3.3.1-4 – na „ m_{2ijkl} ”.*

13. *Punkt 3.3.2 otrzymuje brzmienie:*

3.3.2 W obliczeniach według wzoru 3.3.1-1 wystarczy zastosować H_{si} i T_{0j} oraz P_{ij} podane w tabeli 3.3.2.

Wartości P_{ij} w tabeli 3.3.2 określają prawdopodobieństwo wystąpienia różnych warunków falowania w rejonie północnego Atlantyku, które określają w niniejszej Publikacji standard bezpieczeństwa kadłuba związany z jego wytrzymałością zmęczeniową.

Tabela 3.3.2
Prawdopodobieństwo występowania różnych stanów morza
(x 100 000)

T_0 [s] \ H_s [m]	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5
0,5	0,0	0,0	1,3	133,7	865,6	1186,0	634,2	186,3	36,9	5,6
1,5	0,0	0,0	0,0	29,3	986,0	4976,0	7738,0	5569,7	2375,7	703,5
2,5	0,0	0,0	0,0	2,2	197,5	2158,8	6230,0	7449,5	4860,4	2066,0
3,5	0,0	0,0	0,0	0,2	34,9	695,5	3226,5	5675,0	5099,1	2838,0
4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	196,1	1354,3	3288,5	3857,5	2685,5
5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	51,0	498,4	1602,9	2372,7	2008,3
6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	12,6	167,0	690,3	1257,9	1268,6
7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	52,1	270,1	594,4	703,2
8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	15,4	97,9	255,9	350,6
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,3	33,2	101,9	159,9
10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	10,7	37,9	67,5
11,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	3,3	13,3	26,6
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	4,4	9,9
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,4	3,5
14,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	1,2
15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4
16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Suma	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898

c.d. tabeli 3.3.2

T_0 [s] \ H_s [m]	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	SUMA
0,5	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3050
1,5	160,7	30,5	5,1	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	22575
2,5	644,5	160,2	33,7	6,3	1,1	0,2	0,0	0,0	23810
3,5	1114,1	337,7	84,3	18,2	3,5	0,6	0,1	0,0	19128
4,5	1275,2	455,1	130,9	31,9	6,9	1,3	0,2	0,0	13289
5,5	1126,0	463,6	150,9	41,0	9,7	2,1	0,4	0,1	8328
6,5	825,9	386,8	140,8	42,2	10,9	2,5	0,5	0,1	4806
7,5	524,9	276,7	111,7	36,7	10,2	2,5	0,6	0,1	2586
8,5	296,9	174,6	77,6	27,7	8,4	2,2	0,5	0,1	1309
9,5	152,2	99,2	48,3	18,7	6,1	1,7	0,4	0,1	626
10,5	71,7	51,5	27,3	11,4	4,0	1,2	0,3	0,1	285
11,5	31,4	24,7	14,2	6,4	2,4	0,7	0,2	0,1	124
12,5	12,8	11,0	6,8	3,3	1,3	0,4	0,1	0,0	51
13,5	5,0	4,6	3,1	1,6	0,7	0,2	0,1	0,0	21
14,5	1,8	1,8	1,3	0,7	0,3	0,1	0,0	0,0	8
15,5	0,6	0,7	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	3
16,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	1
Suma	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

Uwaga: Wartości H_s i T_0 należy interpretować jako środkowe współrzędne przedziałów o długościach równych, odpowiednio, 1 m oraz 1 s.

14. W punkcie 3.4 wprowadza się zmiany:

- dodaje się numer 3.4.1 w pierwszym wierszu tekstu po tytule punktu 3.4;
- Symbol $Y(\omega_E, \mu)$ zmienia się na $Y(\omega)$.

15. Punkt 4.1.2 otrzymuje brzmienie:

4.1.2 Metoda obliczeń

Obliczanie zakresów naprężeń, których wartości są bezpośrednio stosowane w analizie wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba, może być wykonane w dwóch etapach, w zakresie liniowo-sprężystym.

W pierwszym etapie należy wyznaczyć naprężenia nominalne, poprzez rozwiązanie modelu MES dotyczącego fragmentu konstrukcji lub całego kadłuba statku. Wartości naprężeń normalnych mogą być wykorzystane wprost do obliczenia trwałości zmęczeniowej, przy wykorzystaniu odpowiedniego wykresu Wöhlera, wynikającego z tabeli 2.4.2. Model MES powinien spełniać wymagania podane w 4.1.3. Obciążenie modelu należy przyjąć na podstawie Przepisów, jeżeli nie jest wykonywana prognoza długoterminowa obciążeń, albo obliczyć bezpośrednio dla statku na fali regularnej wg zasad podanych w rozdziale 3.

W etapie drugim należy wyznaczyć naprężenia geometryczne, poprzez rozwiązanie precyzyjnego modelu MES dotyczącego fragmentu konstrukcji zawierającego analizowany element. Szczegółowe wymagania dotyczące tego modelu obliczeniowego podano w 4.2.

W obliczeniach należy zastosować obciążenie brzegów modelu naprężeniami obliczonymi w etapie pierwszym albo otrzymanymi z rozwiązania belkowych modeli wiązarów lub usztywnień, lub wymusić przemieszczenia węzłów leżących na brzegu modelu, o wartościach obliczonych metodą opisaną wyżej.

Jeżeli obciążenia kadłuba na fali regularnej są obliczane bezpośrednio, to po wykonaniu drugiego etapu obliczeń należy wykonać długoterminową prognozę dla zakresów naprężeń wg wymagań rozdziału 3.

16. Na końcu punktu 4.1.3.1 dodaje się zapis:

Wartości naprężeń nominalnych powinny uwzględniać wpływ spiętrzeń naprężeń spowodowany przez gwałtowne zmiany wymiarów elementów konstrukcji, duże otwory w blachach, itp.

Jeżeli pole naprężeń w konstrukcji istotnie różni się od stanu jednoosiowego rozciągania/ściskania, to w obliczeniach trwałości zmęczeniowej należy stosować większą z wartości naprężeń głównych w miejscu potencjalnego pęknięcia zmęczeniowego.

17. W p. 4.1.3.4, po drugim zdaniu dodaje się tekst:

Stosowana siatka elementów skończonych powinna zapewnić płynną zmianę wymiarów elementów skończonych, tzn. należy unikać gwałtownych zmian wielkości elementów.

18. Punkt 4.2.4.1 otrzymuje brzmienie:

4.2.4.1 Tworząc precyzyjny model MES do obliczania naprężeń geometrycznych należy stosować następujące zasady:

- model powinien odwzorowywać idealną geometrię konstrukcji, tzn. bez uwzględniania przypadkowych przesunięć pomiędzy osiami poszczególnych blach (niewielkie realne przesunięcia są uwzględnione wprost przez wykres Wöhlera, a większe przesunięcia należy uwzględniać w formie dodatkowego współczynnika koncentracji naprężeń, wg 4.2.4.3);
- stosowany podział na elementy skończone w bezpośrednim sąsiedztwie karbu (najczęściej spoiny) powinien być odpowiednio zagęszczony, aby możliwe było wyznaczenie naprężeń w punktach, gdzie mogą być zastosowane tensometry do pomiarów naprężeń;
- stosowane elementy skończone powinny zapewniać liniową zmienność naprężeń normalnych w kierunku grubości blach. Dopuszczalne jest zastosowanie 4-węzłowych elementów powłokowych albo 8-węzłowych elementów przestrzennych. W przypadku spodziewanej dużej zmienności naprężeń zalecane jest stosowanie 8-węzłowych elementów powłokowych lub 20-węzłowych elementów przestrzennych;
- jeżeli stosowane są elementy powłokowe, to sztywność spoin pachwinowych łączących ustawione poprzecznie blachy powinna być uwzględniona w modelu MES – np. poprzez modelowanie spoin przy pomocy elementów powłokowych usytuowanych ukośnie w stosunku do blach. Elementy powłokowe powinny być usytuowane w płaszczyznach środkowych blach. Zastosowane elementy przestrzenne powinny natomiast dokładnie odwzorowywać grubości i usytuowanie blach oraz spoin;
- w bezpośrednim sąsiedztwie karbu (np. miejsce przecięcia się krawędzi blach usytuowanych względem siebie poprzecznie) długości krawędzi 4-węzłowych elementów powłokowych i 8-węzłowych elementów przestrzennych powinny być w przybliżeniu równe grubości blachy, w której spodziewana jest inicjacja pęknięcia zmęczeniowego. W przypadku elementów powłokowych 8-węzłowych długość boku może być w przybliżeniu równa podwójnej grubości blachy;
- w miejscach odległych od karbu dopuszczalne jest zastosowanie elementów skończonych o większych wymiarach. Wzrost wymiarów elementów w miarę oddalania się od karbu powinien być stopniowy, a wydłużenie elementów nie powinno być większe niż 3;
- naprężenia geometryczne powinny być wyznaczone przy zastosowaniu procedury ekstrapolacji pokazanej na rys. 4.2.4.1. Ekstrapolacji podlegają wartości naprężeń głównych na powierzchni blachy o największych wartościach bezwzględnych, których kierunek odchyła się od linii AB (rys. 4.2.4.1) o kąt nie większy niż 45°;

- naprężenia główne będące podstawą ekstrapolacji (rys. 4.2.4.1) należy wyznaczać poprzez ekstrapolację liniową (w kierunku powierzchni blachy) wartości naprężeń w punktach, w których oblicza je program komputerowy (najczęściej są to tzw. punkty Gaussa), następnie poprzez zastosowanie ekstrapolacji liniowej w kierunku krawędzi AB (rys. 4.2.4.1) i na końcu – poprzez zastosowanie ekstrapolacji liniowej wzdłuż krawędzi AB;
- Jeżeli w obliczeniach stosowane są elementy powłokowe 4-węzłowe, to naprężenia główne w odległościach $t/2$ i $3t/2$ od krawędzi spoiny, będące podstawą ekstrapolacji, mogą być wyznaczone poprzez interpolację liniową wartości naprężeń głównych na powierzchni blachy, w węzłach poszczególnych elementów skończonych leżących na linii AB.

19. Dodaje się punkt 4.2.4.5:

4.2.4.5 W przypadku karbów w konstrukcji, uniemożliwiających zastosowanie procedury wyznaczania naprężeń geometrycznych wg 4.2.4.1 lub powodujących niejednoznaczność wyników, PRS może dopuścić zastosowanie, w obliczeniach trwałości zmęczeniowej, wartości naprężeń głównych w elemencie skończonym leżącym w bezpośrednim sąsiedztwie karbu, jako naprężeń geometrycznych.

20. Punkt 4.3 otrzymuje brzmienie:

4.3 Obliczanie naprężeń z uwzględnieniem wymiarów i kształtu spoin

Najbardziej zaawansowany sposób analizy wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych polega na bezpośrednim obliczaniu naprężeń w samej spoinie, przy zastosowaniu modelu MES.

Model taki powinien obejmować podobny fragment konstrukcji kadłuba, jak określony w 4.2, ale wymiary stosowanych elementów skończonych w obszarze spoiny i w jej bezpośrednim sąsiedztwie powinny być jeszcze mniejsze.

W przypadku, gdy grubości łączonych spawaniem blach są równe 5 mm lub większe, należy stosować w tworzeniu modelu MES następujące zasady:

- pomiędzy powierzchnią blachy a powierzchnią lica spoiny należy zakładać płynne przejście o promieniu $r = 1$ mm;
- kąt pomiędzy płaszczyzną styczną do powierzchni lica spoiny na końcu zaokrąglenia a powierzchnią blachy wynosi 30° w przypadku spoiny czołowej i 45° w przypadku spoiny pachwinowej.

Zastosowanie takiej metody obliczeń MES oraz odpowiednie dobranie krzywej Wöhlera podlega odrębnemu rozpatrzeniu przez PRS, po sprawdzeniu przedstawionych wyników obliczeń.