

Polski Rejestr Statków

PRZEPISY

PUBLIKACJA NR 24/P

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI KADŁUBA KONTENEROWCA

1997

Publikacje P (Przepisowe) wydawane przez Polski Rejestr Statków są uzupełnieniem lub rozszerzeniem Przepisów i stanowią wymagania obowiązujące tam, gdzie mają zastosowanie.



GDĄŃSK

Publikacja PRS Nr 24/P „Analiza wytrzymałości kadłuba kontenerowca”, 1997 stanowi rozszerzenie wymagań części II – „Kadłub”, 1996 Przepisów klasyfikacji i budowy statków morskich.

Publikacja ta została zatwierdzona przez Dyrektora Naczelnego PRS w dniu 1 września 1997 r. i wchodzi w życie z dniem 1 października 1997.

Niniejsza Publikacja została rozpatrzona i pozytywnie zaopiniowana przez Radę Techniczną PRS w dniu 5 marca 1997 r.

SPIS TREŚCI

str.

1	Informacje ogólne	5
1.1	Zakres zastosowania	5
1.2	Stosowane metody obliczeń wytrzymałości konstrukcji kadłuba statku	5
1.3	Określenia.....	6
2	Naprężenia i odkształcenia w kadłubie obliczone z uwzględnieniem skręcania na podstawie teorii belek cienkościennych	8
2.1	Momenty zginające i skręcające kadłub	8
2.2	Sumaryczne naprężenia normalne w ładunkowej części kadłuba	11
2.3	Dopuszczalne wartości σ_{tot}	14
2.4	Naprężenia σ_s i σ_w wywołane zginaniem kadłuba w płaszczyźnie pionowej	14
2.5	Naprężenia σ_{wh} wywołane zginaniem w płaszczyźnie poziomej	15
2.6	Naprężenia σ_t wywołane skręcaniem	15
2.7	Naprężenia wywołane zginaniem pokładu	23
2.8	Naroża luków ładunkowych	26
3	Odkształcenia konstrukcji kadłuba – model belkowy	28
3.1	Informacje ogólne	28
3.2	Odkształcenia konstrukcji kadłuba wywołane skręcaniem	28
3.3	Odkształcenia kadłuba wskutek zginania pokładu	29
4	Naprężenia i odkształcenia obliczane metodą elementów skończonych (MES) przy pomocy tarczowego lub powłokowego modelu całego kadłuba	30
4.1	Informacje wstępne	30
4.2	Wymagania dla modeli MES	30
4.3	Analiza naprężeń i odkształceń kadłuba	32
5	Wytrzymałość strefowa kadłuba kontenerowca	34
5.1	Informacje wstępne	34
5.2	Modelowanie konstrukcji	34
5.3	Obciążenie	36
5.4	Naprężenia dopuszczalne	40
6	Wytrzymałość konstrukcji kadłuba w rejonie urządzeń do ustalania położenia i mocowania kontenerów	41
6.1	Postanowienia ogólne	41
6.2	Rozmieszczenie	41
6.3	Rozwiązania konstrukcyjne	41
6.4	Obciążenia obliczeniowe	41
6.5	Modelowanie konstrukcji i wykonywanie obliczeń	41
6.6	Naprężenia dopuszczalne	42

1 INFORMACJE OGÓLNE

1.1 Zakres zastosowania

1.1.1 W przypadku kontenerowców (dodatkowy znak **kon** w symbolu klasy) oraz innych typów statków, posiadających w pokładach otwory lukowe o wymiarach spełniających następujące warunki:

$$\frac{b}{B_1} > 0,6$$
$$\frac{l}{l_m} > 0,7$$
(1.1.1)

gdzie:

- b – szerokość luków, mierzona między skrajnymi po obu burtach wzdłużnymi zębnicami otworów lukowych, [m];
- B_1 – szerokość pokładu wytrzymałościowego mierzona w środku długości luku, [m];
- l – długość otworu lukowego, [m];
- l_m – wzdłużna odległość pomiędzy środkami poprzecznych międzylukowych pasów pokładu (przewiązek) przylegających do rozpatrywanego luku, [m];

należy przeprowadzić analizę odkształceń i naprężeń w kadłubie statku z uwzględnieniem skręcania kadłuba, w sposób podany w 1.2.1. do 1.2.7 niniejszej Publikacji.

W przypadkach konstrukcji uznanych za nietypowe, PRS może zażądać analizy odkształceń i naprężeń z uwzględnieniem skręcania także w sytuacji, gdy wymiary otworów lukowych nie spełniają warunków określonych wzorami 1.1.1.

1.2 Stosowane metody obliczeń wytrzymałości konstrukcji kadłuba statku

1.2.1 Obliczenia wytrzymałości ogólnej statków z uwzględnieniem skręcania kadłuba, spełniających warunki podane w 1.1.1, mogą być wykonane metodą opisaną w rozdziale 2, opartą na teorii belek cienkościennych. Odkształcenia kadłuba powinny być przy tym obliczane według rozdziału 3. Obliczenia według powyższego modelu prowadzą jednak zazwyczaj do zawyżonych wartości naprężeń – zwłaszcza w końcowych rejonach ładunkowej części kadłuba. Zaleca się więc stosować dokładniejszy model obliczeniowy, opisany w 1.2.2.

1.2.2 Obliczenia wytrzymałości i sztywności kadłuba, z uwzględnieniem skręcania zaleca się wykonać metodą elementów skończonych (MES), modelując cały kadłub statku tarczowymi lub powłokowymi elementami skończonymi, według zasad podanych w rozdziale 4. Obciążenia skręcające można ustalić na podstawie przepisowych formuł dla momentów skręcających, stosując zasady podane w rozdziale 4. Zastosowanie takiego sposobu obliczeń pozwala z reguły zaprojektować lżejszą konstrukcję kadłuba niż w przypadku stosowania obliczeń wg 1.2.1.

1.2.3 W modelu MES spełniającym wymagania określone w 1.2.2 zaleca się stosowanie obciążeń kadłuba obliczanych na tzw. fali projektowej – czyli fali regularnej, przy której amplituda momentu zginającego kadłub w płaszczyźnie pionowej albo poziomej odpowiada wartościom tych momentów obliczonym wg Przepisów klasyfikacji i budowy statków morskich PRS, Cz. II – „Kadłub”, a następnie zredukowanym poprzez zastosowanie mnożnika o wartość 0,59. Szczegóły ustalania parametrów fali projektowej podane są w 4.2.2. Dla kilkunastu chwil w ciągu przedziału o długości równej okresowi fali projektowej, należy wyznaczyć obciążenie modelu MES odpowiadające chwilowym wartościom ciśnień zewnętrznych i sił bezwładności ładunku, zapasów i pustego statku, a następnie obliczyć odkształcenia i naprężenia w kadłubie. Do obliczeń obciążeń statku na fali regularnej dopuszczalne jest zastosowanie uznanych przez PRS programów komputerowych, działających w oparciu o założenie płaskiego przepływu wody w płaszczyznach wřęgowych wokół kadłuba.

1.2.4 Po specjalnym rozpatrzeniu, PRS może zatwierdzić bezpośrednio obliczenia prognozy sumarycznych naprężeń w krytycznych miejscach kadłuba, z uwzględnieniem zginania pionowego, poziomego i skręcania. Do obliczeń odzewu statku na fali dopuszczalne jest zastosowanie uznanych przez PRS programów komputerowych.

1.2.5 Po specjalnym rozpatrzeniu, PRS może zatwierdzić obliczenia wytrzymałościowe z uwzględnieniem skręcania kadłuba, wykonane metodami o pośrednim stopniu złożoności i dokładności w stosunku do metod wymienionych w 1.2.1 ÷ 1.2.4.

1.2.6 Wytrzymałość strefowa konstrukcji kontenerowca powinna być sprawdzona zgodnie z wymaganiami rozdziału 5 niniejszej Publikacji.

1.2.7 Wytrzymałość lokalna konstrukcji w pobliżu podparć kontenerów powinna być sprawdzona zgodnie z wymaganiami rozdziału 6 niniejszej Publikacji.

1.3 Określenia

1.3.1 W niniejszej Publikacji przyjęto określenia zgodne z podanymi w Przepisach PRS Cz. II – „Kadłub”.

1.3.2 Oznaczenia

Poniżej podano zestawienie częściowej występujących oznaczeń. Oznaczenia nie wymienione objaśniono przy odpowiednich wzorach i rysunkach. Oznaczenia wielkości stosowanych także w rozdz. 1 Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS:

L_0 – długość obliczeniowa statku, [m];

B – szerokość statku, [m];

H – wysokość boczna statku, [m];

T – zanurzenie statku, [m];

- δ – współczynnik pełnotliwości kadłuba;
- E – moduł sprężystości podłużnej (Younga), [MPa];
- G – moduł postaciowy (Poissona), [MPa];
- k – współczynnik materiałowy, zależny od granicy plastyczności stali;
- R_e – granica plastyczności stali, [MPa];
- M_s – moment zginający na wodzie spokojnej, [kNm];
- M_w – pionowy falowy moment zginający, [kNm];
- Q_s – siła poprzeczna na wodzie spokojnej, [kN];
- Q_w – pionowa falowa siła poprzeczna, [kN];
- Q_{wh} – pozioma falowa siła poprzeczna, [kN];
- M_{wh} – poziomy falowy moment zginający kadłub, [kNm].

Wielkości używane w niniejszej Publikacji oznaczono następująco:

- M_V – całkowity pionowy moment zginający, [kNm];
- W – wskaźnik poprzecznego przekroju kadłuba względem poziomej osi obojętnej, [cm³];
- W_h – wskaźnik poprzecznego przekroju kadłuba względem osi pionowej, [cm³];
- M_t – całkowity moment skręcający kadłub, [kNm];
- M_{tc} – moment skręcający kadłub na wodzie spokojnej, [kNm];
- M_{tw} – falowy moment skręcający kadłub, [kNm];
- M_{tw1}, M_{tw2} – składowe momentu M_{tw} , [kNm];
- σ_s – naprężenia od zginania kadłuba momentem M_s , [MPa];
- σ_w – naprężenia od zginania kadłuba momentem M_w , [MPa];
- σ_{wh} – naprężenia od zginania kadłuba momentem M_{wh} , [MPa];
- σ_t – naprężenia od skręcania kadłuba momentem M_t , [MPa];
- σ_{tc} – naprężenia od skręcania kadłuba momentem M_{tc} , [MPa];
- σ_{wt} – naprężenia od skręcania kadłuba falowym momentem skręcającym, [MPa]
($\sigma_{wt} = \sigma_t - \sigma_{tc}$);
- σ_{bc} – naprężenia od zginania pokładu wytrzymałościowego siłami w przewiazkach i wzdłużnikach pokładowych, od momentu M_{tc} , [MPa];
- σ_{bw} – naprężenia od zginania pokładu wytrzymałościowego siłami w przewiazkach i wzdłużnikach pokładowych od momentu $M_t - M_{tc}$, [MPa];
- σ_{bp} – naprężenia od zginania pokładu wytrzymałościowego ciśnieniami zewnętrznymi działającymi na burty, [MPa];
- σ_{tot} – naprężenia sumaryczne, [MPa];
- B_t – bimoment, [Nm²];
- φ – kąt obrotu poprzecznego przekroju kadłuba względem osi skręcania, [rd];
- Θ – współczynnik deplanacji, [1/m];
- I_ω – wycinkowy moment bezwładności przekroju poprzecznego kadłuba, [m⁶];
- I_{hh} – biegunowy moment bezwładności przekroju poprzecznego kadłuba, [m⁴];
- I_t – stała skręcania swobodnego pręta, [m⁴];

$$m = -\frac{dM_t}{dx}, [\text{N}];$$

ρ – współczynnik korekcyjny;

ω – główne wycinkowe pole przekroju, $[\text{m}^2]$;

Z – siła poprzeczna w przewiązce pokładowej, $[\text{kN}]$;

Y – siła podłużna we wzdlużniku pokładowym, $[\text{kN}]$;

q_{wV} – pionowe obciążenie falowe od morza, $[\text{kN/m}]$;

q_{wh} – poziome obciążenie falowe od morza, $[\text{kN/m}]$;

m_{tw} – skręcające obciążenie falowe od morza, $[\text{kN/m}]$.

1.3.3 Jednostki stosowane w niniejszej Publikacji

W niniejszej Publikacji stosowany jest układ jednostek „SI”.

Jeśli przy objaśnieniach do poszczególnych wzorów nie podano zastosowanych jednostek, to należy stosować spójny system jednostek. Zaleca się wówczas stosować jako jednostkę długości metr $[\text{m}]$, jako jednostkę masy kilogram $[\text{kg}]$ i jako jednostkę czasu sekundę $[\text{s}]$. Jednostki wszelkich innych wielkości są wówczas kombinacjami wyżej wymienionych, np. ciśnienie, naprężenie i moduł Younga są wówczas mierzone w N/m^2 , siła w N , kąty w rd itp.

2 NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W KADŁUBIE OBLICZONE Z UWZGLĘDNIENIEM SKRĘCANIA NA PODSTAWIE TEORII BELEK CIENKOŚCIENNYCH

2.1 Momenty zginające i skręcające kadłub

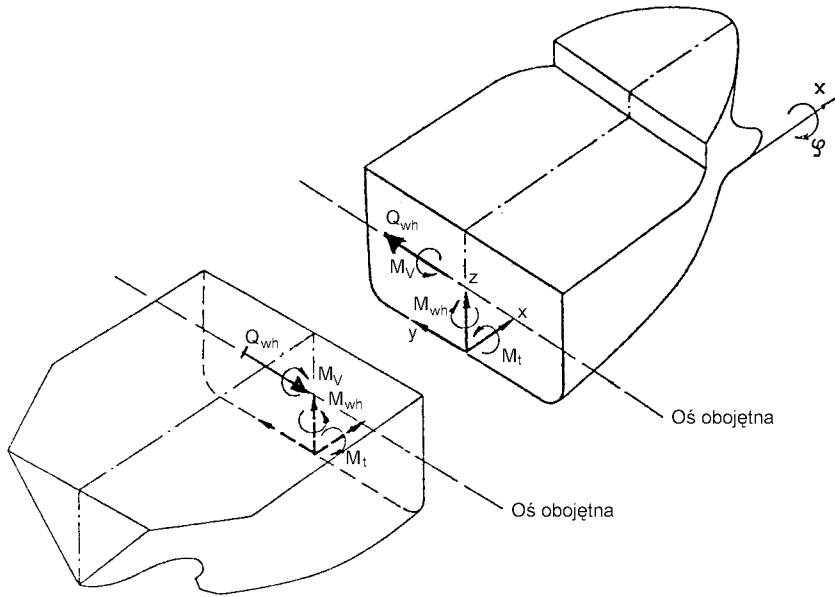
2.1.1 Informacje wstępne

W niniejszym rozdziale podany jest sposób wyznaczania wartości momentów zginających i skręcających kadłub, niezbędnych do wykonania analizy naprężeń normalnych σ w pokładzie wytrzymałościowym i w ciągłych zębnicach luków – czyli tam, gdzie osiągają one wartości ekstremalne.

2.1.2 Umowa znaków sił wewnętrznych w kadłubie

Przyjęte dodatnie zwroty momentów zginających i skręcających oraz poziomej falowej siły poprzecznej pokazano na [rys. 2.1.2](#).

Stosowanie podanej na rysunku umowy znaków jest niezbędne do prawidłowego zsumowania różnych składników naprężeń σ w rozdziale 2.2.



Rys. 2.1.2

2.1.3 Moment zginający kadłub w płaszczyźnie pionowej

Całkowity moment M_V zginający kadłub w płaszczyźnie pionowej jest sumą momentu M_S zginającego kadłub na wodzie spokojnej i momentu M_w zginającego kadłub na fali.

Wartości M_S i M_w oraz ich rozkłady wzdłuż osi statku należy określić zgodnie z wymaganiami 15.5, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS. Wartość M_w odpowiada prawdopodobieństwu przewyższenia równemu 10^{-8} .

2.1.4 Poziomy falowy moment zginający

Wartość i rozkład po długości statku poziomego falowego momentu zginającego M_{wh} (rys. 2.1.2) należy obliczyć zgodnie z wymaganiami 15.5, Cz. II – „Kadłub” Przepisów. Wartość M_{wh} odpowiada prawdopodobieństwu przewyższenia równemu 10^{-8} .

2.1.5 Moment skręcający kadłub

Całkowity moment skręcający kadłub M_t jest sumą momentu skręcającego na wodzie spokojnej M_{tc} i falowego momentu skręcającego M_{tw} , o wartości odpowiadającej prawdopodobieństwu przewyższenia równemu 10^{-8} .

2.1.5.1 Moment M_{tc} wynika z przypadkowego, asymetrycznego rozkładu masy zapasów i kontenerów na statku. Jako obliczeniową wartość M_{tc} na owręzu należy przyjąć:

$$M_{tc} = 30\sqrt{nB}, \quad [\text{kNm}] \quad (2.1.5.1)$$

n – liczba kontenerów 20-stopowych przewożonych przez statek (TEU). Wykres funkcji $M_{tc}(x)$ jest linią łamaną o wartościach na owężu obliczonej według 2.1.5.1 i wartościach zerowych na pionach rufowym i dziobowym.

W przypadku statku przewożącego ładunek masowy można przyjąć $M_{tc} = 0$.

2.1.5.2 Falowy moment skręcający M_{tw} składa się z dwóch składników M_{tw1} i M_{tw2} , obliczanych ze wzorów:

$$M_{tw1} = 126K_2C_wBL_0^2(\delta\alpha_1(x) - 0,5\alpha_3(x))10^{-3}, \quad [\text{kNm}] \quad (2.1.5.2-1)$$

$$M_{tw2} = 63C_wBL_0^2K_1\alpha_2(x)10^{-3}, \quad [\text{kNm}] \quad (2.1.5.2-2)$$

gdzie:

$$K_1 = 2x_1x_0\left(1 + 3,6(C_{WL} - 0,7)\right)\frac{B}{L_0};$$

$$K_2 = 10x_2\frac{T}{L_0}\frac{e}{B};$$

$$x_1 = 1 - 8\frac{T}{L_0};$$

$$x_2 = 1 - 4\frac{T}{L_0};$$

$$x_0 = 1 - 4C_{WL}\frac{B}{L_0};$$

C_{WL} – współczynnik pełnotliwości letniej wodnicy ładunkowej

e – odległość w pionie od środka skręcania przekroju kadłuba na owężu do punktu na wysokości $0,6T$ powyżej płaszczyzny podstawowej, [m].

Sposób obliczenia położenia środka skręcania podany jest w 2.6.4 .

C_w – współczynnik falowy określony według Cz. II. – „Kadłub” Przepisów PRS.

$$\alpha_1(x) = \sin\frac{2\pi x}{L_0};$$

$$\alpha_2(x) = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\frac{2\pi x}{L_0}\right);$$

$$\alpha_3(x) = \sin\frac{3\pi x}{L_0};$$

x – odległość od pionu rufowego (patrz oś x na rys. 2.1.2), [m].

Uwaga: Zamiast momentu skręcającego M_{tw} , którego składowe są obliczone wg wzorów 2.1.5.2-1 i 2.1.5.2-2, można zastosować odpowiednie wielkości obliczane bezpośrednio na fali projektowej dobieranej wg wymagań 4.2.2.3. Tak obliczone M_{tw} można bezpośrednio stosować w

wariancie B (patrz 2.2.1). W wariancie C (patrz 2.2.1) należy zastosować wartości podzielone przez 0,59.

2.1.5.3 W obliczeniach naprężeń i odkształceń w kadłubie z uwzględnieniem skręcania należy rozpatrzyć następujące dwa rozkłady wzdłuż osi statku całkowitego momentu skręcającego statek:

$$\begin{aligned}M_t &= M_{tw1} + M_{tw2} + M_{tc} \\M_t &= M_{tw1} - M_{tw2} - M_{tc}\end{aligned}\tag{2.1.5.3}$$

Zwrot M_t należy przyjmować zgodnie z rys. 2.1.2.

2.2 Sumaryczne naprężenia normalne w ładunkowej części kadłuba

2.2.1 Obciążenia kadłuba podlegające rozpatrzeniu

Należy wykonać analizę naprężeń normalnych w kadłubie w zdefiniowanych niżej pięciu wariantach obciążenia A, B, C, D i E.

Wariant A. Statek na fali czołowej

Należy przeanalizować wytrzymałość wzdłużną kadłuba w sposób zgodny z wymaganiami Cz. II. – „Kadłub” Przepisów PRS, obowiązujący wszelkie typy statków.

Należy wykonać analizę zginania kadłuba momentem $M_s + M_w$ oraz ścinania kadłuba siłą $Q_s + Q_w$. Skręcania kadłuba nie uwzględnia się w tym wariancie. Dopuszczalne wartości naprężeń σ i τ podane są w Cz. II. – „Kadłub” Przepisów PRS.

Wyznaczając wskaźnik W poprzecznego przekroju kadłuba kontenerowca należy wzdłużne wiązania pomiędzy rzędami luków (zwane dalej przewiązkami wzdłużnymi luków) włączać ze współczynnikiem redukcyjnym nie większym niż średnia wartość naprężeń σ w pokładzie przy burcie na długości części ładunkowej statku, podzielona przez maksymalną wartość σ . Średnią wartość σ można obliczyć w pierwszym przybliżeniu przyjmując wartość wskaźnika przekroju kadłuba wyznaczoną bez uwzględnienia wzdłużnych przewiązek luków.

W przypadku, gdy końce wzdłużnych przewiązek luków nie będą efektywnie podparte w kierunku wzdłużnym, to współczynnik redukcyjny należy wyznaczyć w oparciu o analizę przeprowadzoną w sposób uzgodniony z PRS.

Wariant B. Statek na fali skośnej

Analizując naprężenia normalne w pokładzie wytrzymałościowym i w ciągłej zębownicy luku należy uwzględnić następujące składniki naprężeń:

- 1 naprężenia σ_s wywołane zginaniem kadłuba w płaszczyźnie pionowej, na wodzie spokojnej, momentem M_s ;
- 2 naprężenia σ_w wywołane zginaniem kadłuba w płaszczyźnie pionowej, na fali, momentem M_w ;

- .3 naprężenia σ_{wh} wywołane zginaniem kadłuba w płaszczyźnie poziomej, na fali, momentem M_{wh} ;
- .4 naprężenia $\sigma_t = \sigma_{tc} + \sigma_{wt}$ wywołane skręcaniem kadłuba na fali momentem M_t , obliczonym według 2.1.4;
- .5 naprężenia σ_{bc} i σ_{bw} wywołane zginaniem pokładu w płaszczyźnie poziomej, momentami od sił w przewiązkach wzdłużnych i poprzecznych, w miejscach połączeń przewiązek poprzecznych z pokładem;
- .6 naprężenia σ_{bp} wywołane zginaniem pokładu w płaszczyźnie poziomej, wskutek ciśnień działających na burty kadłuba.

Sposób wyznaczenia powyższych składowych naprężeń .1 do .6 podany jest w punktach 2.4 do 2.7 niniejszej Publikacji, a sposób ich sumowania – w 2.2.2.1.

Naprężenia τ w poszyciu kadłuba i pokładów nie muszą być wyznaczane przy pływaniu na fali skośnej.

Wariant C. Statek na fali skośnej – bez uwzględnienia σ_{bp}

W niniejszym wariantcie obciążenia uwzględnia się wszystkie składniki naprężeń analizowane w wariantcie B, oprócz naprężeń σ_{bp} . Sposób sumowania poszczególnych składowych podano w 2.2.2.2.

Wariant D. Statek na fali czołowej skręcany momentem M_{tc}

W tym wariantcie obciążenia dodatkowo w stosunku do wariantu A uwzględnia się naprężenia normalne σ_{tc} wywołane skręcaniem kadłuba momentem M_{tc} oraz naprężenia wywołane zginaniem pokładu wskutek ciśnień działających na burty kadłuba oraz wskutek sił w przewiązkach wzdłużnych i poprzecznych. Uwzględnia się więc następujące składowe naprężenia: σ_s , σ_w , σ_{tc} , σ_{bc} , σ_{bp} . Naprężenia σ_{bc} są teraz naprężeniami w pokładzie wytrzymałościowym pochodzącymi od jego zginania siłami w przewiązkach, wywołanymi momentem skręcającym M_{tc} na wodzie spokojnej. Sposób sumowania wymienionych składników naprężeń podany jest w 2.2.2.3. Zwrot M_{tc} jest w tym wariantcie dowolny.

Wariant E. Statek na fali czołowej skręcany momentem M_{tc} – bez uwzględniania σ_{bp}

W niniejszym wariantcie obciążenia uwzględnia się wszystkie składniki naprężeń analizowane w wariantcie D, oprócz naprężeń σ_{bp} .

Sposób sumowania poszczególnych składowych naprężeń podano w 2.2.2.4.

2.2.2 Sposób wyznaczania sumarycznych naprężeń normalnych w kadłubie statku, z uwzględnieniem skręcania.

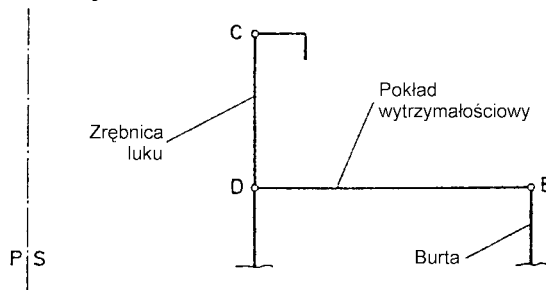
2.2.2.1 Naprężenia sumaryczne σ_{tot} w pokładzie wytrzymałościowym i w ciągłej zrębnicy wzdłużnej łuku w wariantcie B z 2.2.1 należy wyznaczać według wzoru:

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_{tc} + \sigma_{bc} + 0,35\sigma_w + 0,59(\sigma_{wh} + \sigma_{wt} + \sigma_{bw}) + \sigma_{bp} \quad (2.2.2.1)$$

Znaczenie symboli użytych we wzorze 2.2.2.1 jest wyjaśnione w punkcie 2.2.1.

Naprężenia σ_{tot} powinny być wyznaczone w punktach C, D, E pokazanych na rys. 2.2.2.1, na obu burtach statku, w następujących przekrojach poprzecznych kadłuba:

- w końcowych przekrojach ładunkowej części kadłuba, tzn. w miejscach połączeń ładowni z przedziałem siłowni i ze skrajnikiem dziobowym;
- w przekrojach wręgowych w środkach ładowni;
- w przekrojach wręgowych, w których leżą skrajne krawędzie poprzecznych przewiązek pokładowych.



Rys. 2.2.2.1

Wyznaczając σ_{tot} , składowe naprężenia σ należy przyjmować z następującymi znakami:

- znak σ_s jest adekwatny do znaku momentu M_s . Jeśli w rozpatrywanym stanie załadowania statek pływa w ugięciu, to $\sigma_s < 0$. W przypadku wygięcia statku $\sigma_s > 0$;
- znak σ_w należy przyjąć taki sam jak znak σ_s ;
- składowa M_{tw1} momentu skręcającego, z założenia dodatnia, ma zwrot zgodny z rys. 2.1.2. Naprężenia σ_{wh} których znak wynika ze wzajemnej relacji pomiędzy znakami M_{wh} , a M_{tw1} , należy przyjąć jako naprężenia rozciągające poszycie prawej burty i ściskające poszycie lewej burty;
- wyznaczając σ_{tc} i σ_{wt} należy stosować zwrot M_t zgodnie z rys. 2.1.2. (M_t – patrz wzory 2.1.5.3). Należy pamiętać o tym, aby uwzględnić dwa rozkłady M_t , zgodnie z 2.1.5.3;
- znaki σ_{bc} i σ_{bw} odpowiadają wprost zwrotom sił poprzecznych w przewiązkach poprzecznych i sił podłużnych we wzdłużnych przewiązkach luków, które z kolei wynikają z przyjętego zwrotu momentu skręcającego M_t (patrz 2.1);
- znak σ_{bp} wynika z analizy zginania burt ciśnieniem działającym z zewnątrz.

2.2.2.2 Naprężenia sumaryczne σ_{tot} w pokładzie i w ciągłej zrębnicy wzdłużnej luku w wariancie C z 2.2.1 należy wyznaczyć według wzoru:

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_{tc} + \sigma_{bc} + 0,6\sigma_w + \sigma_{wt} + \sigma_{bw} \quad (2.2.2.2)$$

Miejsca, gdzie należy wyznaczyć σ_{tot} oraz sposób ustalenia znaków poszczególnych składników naprężeń są identyczne jak w 2.2.2.1.

2.2.2.3 Naprężenia sumaryczne σ_{tot} w pokładzie i w ciągłej zębownicy wzdłużnej łuku w wariancie D z 2.2.1 należy wyznaczyć według wzoru:

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_{tc} + \sigma_{bc} + 0,59\sigma_w + \sigma_{bw} \quad (2.2.2.3)$$

Miejsca, gdzie należy wyznaczyć σ_{tot} oraz sposób ustalania znaków poszczególnych składników naprężeń są identyczne jak w 2.2.2.1. Zwrot M_{tc} przyjęty do obliczeń może być dowolny.

2.2.2.4 Naprężenia sumaryczne w pokładzie i w ciągłej zębownicy wzdłużnej łuku, w wariancie E z 2.2.1 należy wyznaczyć według wzoru:

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_{tc} + \sigma_{bc} + \sigma_w \quad (2.2.2.4)$$

Miejsca, gdzie należy wyznaczyć σ_{tot} oraz sposób ustalania znaków poszczególnych składników naprężeń są identyczne jak w 2.2.2.1.

2.3 Dopuszczalne wartości σ_{tot}

Naprężenia σ_{tot} nie mogą być wyższe niż :

- w wariancie B: 190k, [MPa],
- w wariancie C: 175k, [MPa],
- w wariancie D: 190k, [MPa],
- w wariancie E: 175k, [MPa].

Warianty B, C, D, E zdefiniowano w 2.2.1

2.4 Naprężenia σ_s i σ_w wywołane zginaniem kadłuba w płaszczyźnie pionowej

Naprężenia σ_s i σ_w należy obliczyć według wzorów:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{M_s}{W} 10^3, \quad [\text{MPa}] \\ \sigma_w &= \frac{M_w}{W} 10^3, \quad [\text{MPa}] \end{aligned} \quad (2.4)$$

M_s – moment zginający kadłub na wodzie spokojnej, określony według 2.1.3, [kNm];

M_w – falowy moment zginający kadłub, określony według 2.1.3, [kNm];

W – wskaźnik poprzecznego przekroju kadłuba w rozpatrywanym przekroju poprzecznym kadłuba, określony dla poziomej osi obojętnej według zasad podanych w 2.2.1 dla wariantu A i w Przepisach PRS, Cz. II – „Kadłub”, wyznaczony dla punktu, gdzie należy obliczyć naprężenia, tzn. dla punktu C, D lub E na rys. 2.2.2.1, [cm³].

2.5 Naprężenia σ_{wh} wywołane zginaniem w płaszczyźnie poziomej

Naprężenia σ_{wh} należy obliczać według wzoru:

$$\sigma_{wh} = \frac{M_{wh}}{W_h} 10^3, \quad [\text{MPa}] \quad (2.5)$$

M_{wh} – poziomy falowy moment zginający, określony według 2.1.4, [kNm];

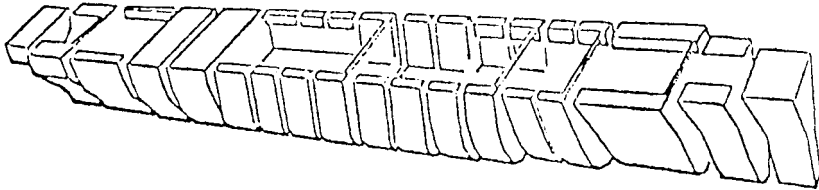
W_h – wskaźnik poprzecznego przekroju kadłuba określony dla poziomej osi obojętnej, wyznaczony dla punktu, gdzie należy obliczyć naprężenia, tzn. dla punktu C, D lub E na rys. 2.2.2.1, [cm³].

2.6 Naprężenia σ_t wywołane skręcaniem

2.6.1 Informacje wstępne

Zalecana metoda uproszczonych obliczeń naprężeń i odkształceń kadłuba wywołanych skręcaniem wynika z tzw. teorii Hajdina-Kollbrunera skręcania skrępowanego prętów cienkościennych.¹⁾

Obliczenia z zastosowaniem uznanych przez PRS programów komputerowych polegają na podzieleniu kadłuba na pryzmatyczne z założenia segmenty. W obliczeniach uwzględnia się także części kadłuba o profilu zamkniętym, leżące poza przedziałem ładunkowym, tzn. skrajniki dziobowy i rufowy oraz przedział maszynowni (rys. 2.6.1).



Rys. 2.6.1 Podział kadłuba na segmenty

Liczba pryzmatycznych segmentów przybliżająca kadłub powinna być wystarczająco duża, aby uniknąć dużych różnic parametrów przekroju (I_o , I_t) sąsiednich segmentów.

W obliczeniach należy uwzględnić powiększającą sztywność kadłuba wpływ poprzecznych i wzdłużnych przewiązek luków oraz zbiorników wysokich pomiędzy ładowniami – według 2.6.5.

¹⁾ Teoria Hajdina-Kollbrunera jest szczegółowo przedstawiona w publikacjach:

- Kollbruner C. F., Hajdin N.: Wolbkrafttorsion dünwandiger Stabe mit offener Profil. Mitteilungen der T. K. S. S. V. Z. 29. Verlag S. S. V. Zürich;
- Kollbruner C. F., Hajdin N.: Wolbkrafttorsion dünwandiger Stabe mit geschlossenem Profil. Mitteilungen der T. K. S. S. V. Z. 32. Verlag S. S. V. Zürich.

2.6.2 Równanie skręcania i naprężenia σ_t

2.6.2.1 Równanie skręcania pryzmatycznego segmentu pręta (kadłuba) ma postać:

$$E\rho I_\omega \frac{d^4\varphi}{dx^4} - GI_t \frac{d^2\varphi}{dx^2} = m(x) \quad (2.6.2.1)$$

I_ω – wycinkowy moment bezwładności przekroju pręta, [m⁶],

I_t – stała skręcania swobodnego segmentu (moment bezwładności przy czystym skręcaniu), [m⁴],

$\rho = \frac{I_{hh}}{I_{hh} - I_t}$ – współczynnik korekcyjny,

I_{hh} – biegunowy moment bezwładności przekroju poprzecznego pręta, względem środka skręcania, [m⁴],

φ – kąt obrotu przekroju poprzecznego pręta wokół osi skręcania, [rad],

x – współrzędna wzdłuż kadłuba statku, [m],

$m = -\frac{dM_t}{dx}$ (M_t przyjąć w [Nm], a m w [N]),

M_t – patrz (2.1.5.3).

Dodatknie zwroty x , φ i M_t pokazano na rys. 2.1.2. W obliczeniach można założyć, że $m(x)$ zmienia się liniowo wzdłuż segmentu. Parametry I_ω , I_t , I_{hh} należy obliczyć według zasad podanych w 2.6.4.

2.6.2.2 W wyniku rozwiązania równania 2.6.2.1 zgodnie z zasadami podanymi w 2.6.3÷2.6.7, oblicza się uogólnioną siłę wewnętrzną B_t w przekroju poprzecznym pręta o współrzędnej x , zwaną bimomentem:

$$B_t = -E\rho I_\omega \frac{d^2\varphi}{dx^2} - \frac{m}{k_1^2} \quad (2.6.2.2)$$

gdzie: $k_1^2 = \frac{GI_{hh}}{E\rho I_\omega}$

2.6.2.3 Naprężenia σ_t w dowolnym punkcie przekroju poprzecznego pręta należy obliczyć według wzoru:

$$\sigma_t = \frac{B_t}{I_\omega} \omega \quad (2.6.2.3)$$

ω – główne pole wycinkowe przekroju poprzecznego pręta w rozpatrywanym punkcie przekroju, [m²], obliczane według zasad podanych w 2.6.4.

2.6.3 Zależności pomiędzy przemieszczeniami i siłami wewnętrznymi w płaszczyznach styku segmentów.

2.6.3.1 W celu obliczenia wzdłużnych przemieszczeń poszczególnych punktów pręta należy wyznaczyć parametr Θ zwany współczynnikiem deplanacji, zależny od kąta φ :

$$\Theta = \frac{d\varphi}{dx} + \frac{1}{k_2^2} \frac{d^3\varphi}{dx^3} + \frac{1}{k_1^2} \frac{1}{G(I_{hh} - I_t)} \frac{dm}{dx} \quad (2.6.3.1)$$

$$k_2^2 = \frac{G(I_{hh} - I_t)}{E\rho I_\omega}$$

$\rho, I_\omega, I_{hh}, I_t$ – patrz 2.6.2.1,
 k_1^2 – patrz 2.6.2.2.

2.6.3.2 Rozwiązując równanie 2.6.2.1 należy spełnić następujące warunki w płaszczyźnie przekroju kadłuba na styku dwóch sąsiednich segmentów:

$$\begin{aligned} \varphi(x_+) &= \varphi(x_-) \\ \Theta(x_+) &= \alpha\Theta(x_-) \\ B_t(x_+) &= \frac{1}{\alpha} B_t(x_-) \\ M_t(x_+) &= M_t(x_-) + Q_{wh}(e(x_+) - e(x_-)) \end{aligned} \quad (2.6.3.2-1)$$

gdzie: x_+, x_- – współrzędne x z prawej i z lewej strony płaszczyzny styku segmentów

$$\alpha = \sqrt{\frac{I_\omega(x_-)}{I_\omega(x_+)}} \quad (2.6.3.2-2)$$

$$Q_{wh} = \frac{M_{tw1}}{e}$$

M_{tw1} – patrz 2.1.5.2,

φ, I_ω – wielkości zdefiniowane w 2.6.2.1,

Θ, B_t – wielkości zdefiniowane w 2.6.3.1 i 2.6.2.2,

e – odległość w pionie od środka skręcania przekroju do punktu na wysokości 0,6 T powyżej płaszczyzny podstawowej, [m],

M_t – wartość momentu skręcającego, [Nm].

2.6.3.3 Warunki 2.6.3.2-1 obowiązują w przekroju styku części ładunkowej kadłuba ze skrajnikiem dziobowym, przedziałem maszynowni i (lub) skrajnikiem rufowym. Jeżeli zbiornik wysoki jest uwzględniony jako osobny segment o zamkniętym przekroju, to warunki te należy uwzględnić również w przekrojach granicznych tego segmentu.

Na styku segmentów w otwartej (ładunkowej) części kadłuba, we wzorach 2.6.3.2-1 należy stosować wartości:

$$\alpha = 1$$

$$Q_{wh} = 0$$

2.6.3.4 Zależności określające skokowe zmiany B_t na stykach segmentów, gdzie występują poprzeczne konstrukcje przeciwskrętne lub przewiązki, podano w 2.6.5 i 2.6.6.

2.6.3.5 Na końcach pręta modelującego kadłub należy zastosować następujące warunki brzegowe:

- na końcu rufowym:
 $\varphi = 0, B_t = 0$
- na końcu dziobowym:
 $B_t = 0$

2.6.4 Sposób obliczenia charakterystyk przekroju poprzecznego pręta

Zaleca się obliczać I_ω, I_t i I_{hh} oraz położenie środka skręcania przekroju poprzecznego kadłuba przy pomocy zatwierdzonych przez PRS programów komputerowych. Programy te powinny wyznaczać główne pole wycinkowe ω w przekroju poprzecznym pręta, z uwzględnieniem zamkniętych obwodów. Przy obliczaniu I_ω oraz położenia środka skręcania, wzdlużne usztywnienia poszycia można uwzględnić poprzez równomierne rozłożenie pól przekroju poprzecznego poszczególnych usztywnień na odcinkach o długości równej odstępowi usztywnień. Można więc zastosować fikcyjne zgrubienia poszycia.

I_t należy obliczać bez fikcyjnego zgrubienia poszycia.

2.6.5 Uwzględnienie poprzecznych konstrukcji przeciwskrętnych

Elementy konstrukcji kadłuba o przekroju poprzecznym w formie zamkniętych obwodów, łączące obie burty statku, zwiększają sztywność kadłuba na skręcanie i należy je uwzględnić w obliczeniach. Przykłady takich konstrukcji to zbiorniki wysokie lub poprzeczne przewiązki pokładowe o konstrukcji skrzynkowej. Konstrukcje takie będą dalej zwane konstrukcjami przeciwskrętnymi.

Rozwiązując równanie skręcania 2.6.2.1, należy w przekroju poprzecznym kadłuba przechodzącym w połowie szerokości konstrukcji przeciwskrętnej (mierzonej wzdluż długości statku) spełnić następujący warunek:

$$\Delta B_t = -K_w \Theta \tag{2.6.5-1}$$

ΔB_t – przyrost bimomentu

K_w – sztywność konstrukcji przeciwskrętnej

W przypadku konstrukcji przeciwskrętnej o stałym przekroju poprzecznym, K_w należy obliczyć ze wzoru:

$$K_w = 4 \frac{GI_0}{l} \left| \frac{d\omega}{ds} \right|^2$$

$$I_0 = \frac{4A^2}{\int \frac{ds_1}{t}} \tag{2.6.5-2}$$

- A – pole powierzchni ograniczone zewnętrznym konturem przekroju poprzecznego konstrukcji przeciwskrętnej,
 s_1 – współrzędna obwodowa wzdłuż linii szkieletowej konturu konstrukcji przeciwskrętnej,
 t – grubość ścianki (poszycia) konstrukcji przeciwskrętnej,
 l – długość konstrukcji przeciwskrętnej (najczęściej jest to odległość między burtami wewnętrznymi kadłuba),
 $\frac{d\omega}{ds}$ – pochodna głównego pola wycinkowego względem współrzędnej obwodowej przekroju poprzecznego kadłuba w miejscu styku konstrukcji przeciwskrętnej z kadłubem. Wartość $\frac{d\omega}{ds}$ jest stała w dowolnym punkcie ww. styku, jeśli krawędź jest prostoliniowa. $\left| \frac{d\omega}{ds} \right|$ jest jednakowe na obu burtach kadłuba. $\omega(s)$ należy wyznaczać według zasad podanych w 2.6.4.

W przypadku konstrukcji przeciwskrętnej złożonej z N pryzmatycznych odcinków o długościach l_i i wartościach $I_{0,i}$ parametru I_0 , do wzoru 2.6.5-2 należy w miejsce I_0/l podstawić I_0/l obliczone ze wzoru:

$$\frac{l}{I_0} = \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{I_{0,i}} \quad (2.6.5-3)$$

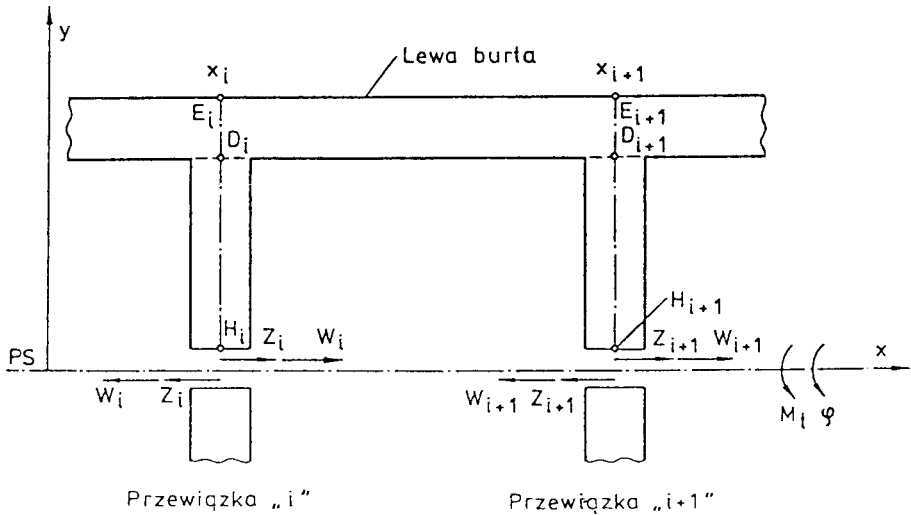
2.6.6 Sposób rozwiązywania równania 2.6.2.1 z uwzględnieniem sił poprzecznych w przewiązkach pokładowych poprzecznych i sił podłużnych we wzdłużnych przewiązkach luków.

2.6.6.1 W obliczeniach należy uwzględnić wpływ przewiązek poprzecznych i wzdłużnych na naprężenia oraz odkształcenia w kadłubie.

2.6.6.2 Statek z jednym rzędem otworów lukowych (tzn. bez wzdłużnych przewiązek luków)

Wpływ sił poprzecznych w przewiązkach poprzecznych na naprężenia i odkształcenia w kadłubie oraz ich wartości należy wyznaczyć w następujący sposób, złożony z etapów a) – f):

a) założyć przecięcie wszystkich przewiązek w płaszczyźnie symetrii kadłuba (rys. 2.6.6.2)



Rys. 2.6.6.2

- b) wyznaczyć przemieszczenia w_i końców przewiązek wzdłuż osi x ($i = 1, 2, \dots, N$; N – liczba przewiązek), spowodowane tylko zewnętrznym momentem skręcającym M_t , ze wzoru:

$$w_i = -\Theta \omega_{ps} \quad (2.6.6.2-1)$$

Θ – współczynnik deplanacji zdefiniowany w 2.6.3.1, obliczony według wzoru 2.6.3.1,

x_i – współrzędna x środkowego przekroju i -tej przewiązki (rys. 2.6.6.2),

ω_{ps} – wartość głównego pola wycinkowego w płaszczyźnie symetrii statku.

Wartość ω_{ps} wynika z przedłużenia linią prostą wykresu ω na odcinku $E_i D_i$ (rys. 2.6.6.2) w stronę PS kadłuba.

Uwaga: W punkcie D_i na lewej burcie należy przyjąć wartość $\omega_{D_i} > 0$. Sposób wyznaczania ω podano w 2.6.4.

- c) wyznaczyć przemieszczenia końców przewiązek wzdłuż osi x , wynikające ze skręcania pręta siłami Z_i w przewiązkach ($i = 1, 2, \dots, N$). Wynik przedstawić w postaci macierzowej, w formie następującego wzoru:

$$[U]\{Z\} = \{w_z\} \quad (2.6.6.2-2)$$

$\{w_z\}$ – macierz jednokolumnowa, której elementami są przemieszczenia końców kolejnych przewiązek, wywołane siłami Z_i , $i = 1, 2, \dots, N$;

$\{Z\}$ – macierz jednokolumnowa, której elementami są siły Z_i , $i = 1, 2, \dots, N$;

$[U]$ – macierz kwadratowa o wymiarach $N \times N$. Element U_{ij} jest przemieszczeniem końca H_i i -tej przewiązki wskutek skręcania kadłuba wywołanego siłą $Z_j = 1$ w j -tej przewiązce, wyznaczonym w sposób wynikający ze wzoru 2.6.6.2-1.

Rozwiązując równanie skręcania 2.6.2.1 pręta obciążonego siłą Z_j , należy w przekroju pręta o współrzędnej x_j spełnić warunek:

$$\Delta B_i(x_j) = -2\omega_D Z_j \quad (2.6.6.2-3)$$

ω_D – główne pole wycinkowe w punkcie D_j na lewej burcie, $\omega_D > 0$;

$\Delta B_i = B_i(x_j^+) - B_i(x_j^-)$ – przyrost bimomentu w przekroju $x = x_j$;

- d) wyznaczyć przemieszczenia końców przewiązek wzdłuż osi x , wynikające ze zginania ramy utworzonej z przewiązek pokładowych i pokładu przy burcie, leżącej z jednej strony płaszczyzny symetrii kadłuba. Przewiązki są przecięte jak na rys. 2.6.6.2.

Zalecany sposób wykonania obliczeń podany jest w 2.7.

Wynik przedstawić w postaci macierzowej:

$$[V]\{Z\} = \{w_b\} \quad (2.6.6.2-4)$$

$\{w_b\}$ – macierz jednokolumnowa, której elementami są przemieszczenia końców kolejnych przewiązek, wynikające ze zginania ramy, obciążonej siłami Z_i , $i = 1, 2, \dots, N$;

$[V]$ – macierz kwadratowa o wymiarach $N \times N$.

Element V_{ij} jest przemieszczeniem końca H_i i -tej przewiązki wskutek zginania ramy siłą $Z_j = 1$ w i -tej przewiązce;

- e) wyznaczyć siły Z_i , $i = 1, 2, \dots, N$, jako rozwiązanie układu równań algebraicznych:

$$([U] + [V])\{Z\} + \{w\} = 0 \quad (2.6.6.2-5)$$

$\{w\}$ – macierz jednokolumnowa przemieszczeń w_i , $i = 1, 2, \dots, N$, obliczonych w punkcie b);

- f) rozwiązać równanie 2.6.2.1 dla łącznego działania zewnętrznego momentu skręcającego M_i i sił Z_i , $i = 1, 2, \dots, N$ w przewiązkach, stosując warunki 2.6.6.2-3 w przekrojach o współrzędnych x_j , $j = 1, 2, \dots, N$. Po wyznaczeniu $\varphi(x)$ naprężenia σ_i w kadłubie należy obliczyć według wzoru 2.6.2.3, wykorzystując wzór 2.6.2.2.

2.6.6.3 Statek z dwoma rzędami luków i z przewiązką wzdłużną luków w płaszczyźnie symetrii kadłuba

Dopuszcza się na ogół pominięcie sztywności giętej w płaszczyźnie poziomej wzdłużnych przewiązek luków. Sposób wyznaczania wartości sił Z_i w przewiązkach poprzecznych jest identyczny jak w 2.6.6.2. Z_i oznaczają teraz wartości sił poprzecznych w przewiązkach poprzecznych, w miejscach ich połączeń ze wzdłużną przewiązką luków. Znaczenie parametru ω_{ps} określonego dla wzoru 2.6.6.2-1 pozostaje bez zmian.

W przypadku konstrukcji nietypowych, ze wzdłużną przewiązką luków o znacznej sztywności na zginanie w płaszczyźnie poziomej, sposób uwzględnienia tej sztywności przy wyznaczaniu Z_i należy uzgodnić z PRS.

$$\Delta B_i(x_i) = -2\omega_{Di}(Z_i + Y_i - Y_{i-1}) \quad (2.6.6.4)$$

2.6.7 Zalecana metoda rozwiązania równania skręcania 2.6.2.1

Równanie 2.6.2.1 może być rozwiązane tzw. metodą macierzy przejścia, przy pomocy specjalnego programu komputerowego.

Zalecane jest zastosowanie programu komputerowego WOKA opracowanego w Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku.

Dopuszczalne jest zastosowanie innych metod rozwiązania równania 2.6.2.1, zapewniających równoważną dokładność wyników obliczeń.

2.7 Naprężenia wywołane zginaniem pokładu

2.7.1 Informacje ogólne

W niniejszym rozdziale podany jest sposób obliczania naprężeń σ_{bc} i σ_{bw} wywołanych zginaniem pokładu siłami poprzecznymi w przewiązkach poprzecznych i ewentualnie siłami podłużnymi we wzdluznych przewiazkach lukowych, oraz naprężeń σ_{bp} wywołanych zginaniem pokładu wytrzymałościowego wskutek ciśnienia oddziaływania morza obciążających z zewnątrz burty kadłuba. Naprężenia σ_{bc} i σ_{bp} stanowią składowe naprężeń σ_{tot} we wzorach 2.2.2.1 ÷ 2.2.2.4.

W obliczeniach σ_{bp} należy uwzględnić współpracę belki pokładu wytrzymałościowego z wiązarami burty (wręgi ramowe i wzdluzniki lub niższe pokłady) i wiązarami dna podwójnego. Taki model obliczeniowy, opisany w 2.7.2.1 może być także wykorzystany przy obliczaniu elementów macierzy $[V]$ (patrz wzór 2.6.6.2-4) do określenia wpływu wiązarów burty na odkształcenia ramy płaskiej pokładu (wg 2.7.2.2) przy skręcaniu kadłuba.

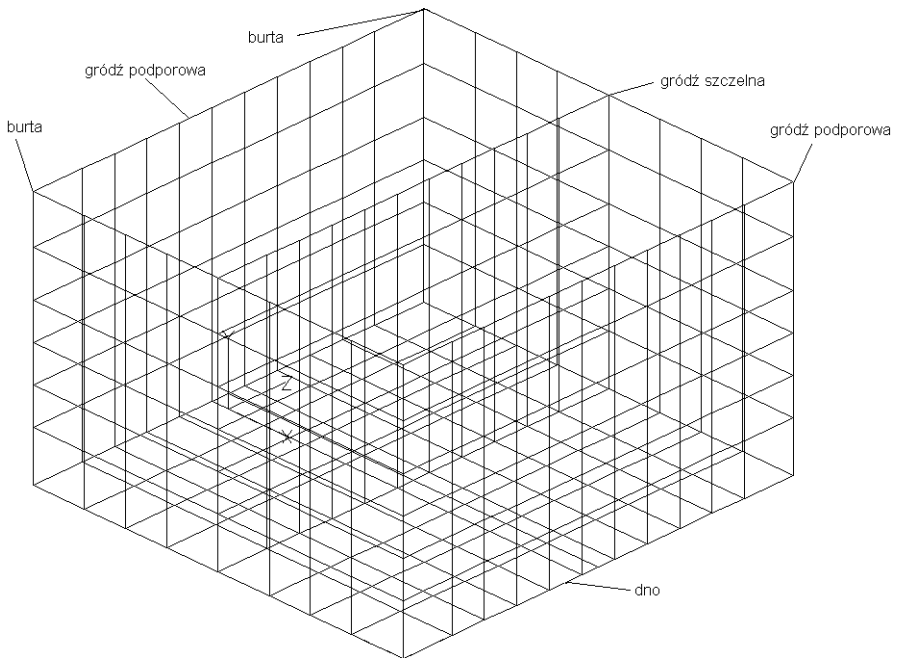
2.7.2 Geometria modelu

2.7.2.1 W obliczeniach σ_{bp} zalecane jest zastosowanie modelu konstrukcji kadłuba statku w formie ramy przestrzennej. Przykładowy fragment takiego modelu pokazano na rys. 2.7.2.1. Model taki powinien obejmować fragment kadłuba nie mniejszy niż pomiędzy środkami dwóch sąsiednich ładowni.

Zastosowany model obliczeniowy powinien posiadać następujące cechy :

- powinien zawierać wszystkie wiązary dna, burt i grodzi modelowane przy pomocy elementów prętowych, położone po jednej stronie płaszczyzny symetrii kadłuba;
- elementy ramy przestrzennej (rys. 2.7.2.1) należy umieścić jak najbliżej osi obojętnych wiązarów, w płaszczyznach średniców;
- parametry przekrojów poprzecznych elementów belkowych (momenty bezwładności, wskaźniki wytrzymałości itp.) należy obliczyć dla przekrojów netto tzn. po odjęciu naddatków korozyjnych o wartościach określonych według wymagań 2.5 Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS;

- szerokość pasów współpracujących poszycia należy wyznaczyć według wymagań 3.2.2 Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS;
- usztywnienia lokalne poszycia leżące w obrębie szerokości pasa współpracującego mogą być uwzględnione przy obliczaniu pola przekroju poprzecznego, momentu bezwładności i wskaźników przekroju elementów prętowych modelujących wiązary;
- sztywność na skręcanie wiązarów dna podwójnego i burty podwójnej należy przyjąć jak dla elementów o przekroju zamkniętym, zgodnie z wymaganiami Publikacji Nr 18/P „Analiza strefowej wytrzymałości kadłuba masowca”;
- rejonny połączeń wiązarów o różnych kierunkach należy modelować przy pomocy tzw. elementów sztywnych. W obliczeniach numerycznych można przyjąć wartości momentów bezwładności przekrojów tych elementów około 100 razy większe, a wartości powierzchni przekrojów i powierzchni na ścinanie – około 4 razy większe od odpowiednich parametrów sąsiadujących z nimi prętów;
- model obliczeniowy zaleca się przedłużyć poza rozpatrywaną ładownię, w stronę dziobu i rufy, w celu poprawnego wyznaczenia odkształceń i sił wewnętrznych w elementach wzdłużnych;
- ciągle wzdłużne zrębnice luków połączone z poszyciem pokładu wytrzymałościowego można włączyć w całości do przekroju poprzecznego elementu modelującego ten pokład;
- dopuszczalne jest nieprzesuwne podparcie w kierunku pionowym węzłów modelu leżących na oble kadłuba i węzłów na krawędziach wspólnych dna podwójnego i grodzi poprzecznych;
- w przypadku stosowania do wyznaczania elementów macierzy $[V]$ według równania 2.6.6.2-4 i do wyznaczania naprężeń σ_{bc} w pokładzie wytrzymałościowym modelu obejmującego wiązary położone po jednej stronie płaszczyzny symetrii kadłuba, należy wiązary poprzeczne dna podeprzeć w płaszczyźnie symetrii kadłuba podporami typu Δ , zapewniającymi zerowe wartości ugięć, w celu zapewnienia asymetrii odkształceń konstrukcji. Przy wyznaczaniu naprężeń σ_{bp} wywołanych ciśnieniami zewnętrznymi należy zastosować w płaszczyźnie symetrii kadłuba podpory typu $\begin{matrix} | \\ \text{O} \\ | \\ \text{O} \\ | \end{matrix}$ dające zerowe kąty obrotu przekrojów poprzecznych prętów poprzecznych i zapewniające symetrię odkształceń konstrukcji. Pręty modelujące przewiazki poprzeczne należy podeprzeć w płaszczyźnie symetrii kadłuba – w kierunku poprzecznym.



Rys. 2.7.2.1

2.7.2.2 Przy obliczaniu elementów macierzy $[V]$ wg wzoru 2.6.6.2-4 oraz naprężeń σ_{bc} , zalecane jest zastosowanie ramy płaskiej do modelowania elementów pokładu. Rama płaska pokładu obejmuje cały przedział ładunkowy statku w celu uwzględnienia sprzężeń pomiędzy siłami w przewiązkach pokładowych. Węzły połączeń elementów poprzecznych i wzdłużnych (przy burcie) powinny być zamocowane ze względu na przesunięcia.

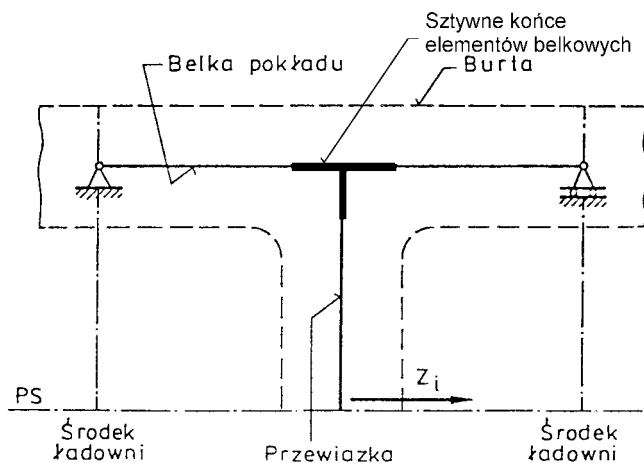
Elementy wzdłużne pokładu są sztywno utwierdzone na brzegach otwartej części kadłuba. Przy modelowaniu należy stosować w jak najszerszym zakresie zasady podane w 2.7.2.1.

2.7.2.3 W przypadku konstrukcji o wiotkich przewiązkach poprzecznych i stosunkowo sztywnej na zginanie burcie, tzn. z dużą ilością sztywnych ramowych wręgów burtowych i wzdłużników burtowych lub międzypokładów (w burcie podwójnej) PRS może wyrazić zgodę na zastosowanie prostszego modelu do wyznaczenia macierzy $[V]$.

Można wówczas pominąć sprzężenia pomiędzy siłami w poszczególnych przewiązkach i zastosować prosty model pokazany na [rys. 2.7.2.3](#).

Macierz $[V]$ jest w takich przypadkach macierzą diagonalną.

Ten prosty model może być również zastosowany do wyznaczania naprężeń σ_{bc} .



Rys. 2.7.2.3

2.7.2.4 W każdym przypadku zastosowany model obliczeniowy powinien być przedstawiony PRS do zatwierdzenia.

2.7.3 Obciążenie modelu

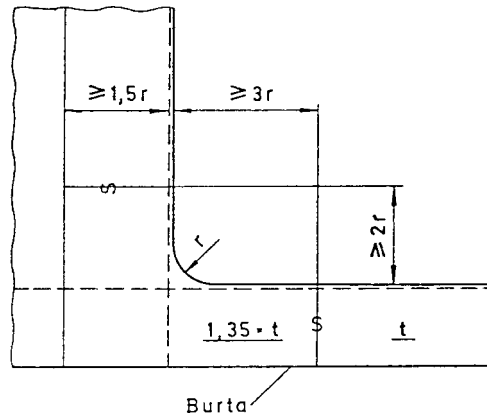
2.7.3.1 Obciążenie modelu pokazanego na rys. 2.7.2.1, stosowane przy określaniu naprężeń σ_{bp} , stanowią ciśnienia działające od zewnątrz, będące oddziaływaniem morza oraz siły nacisku kontenerów (ładunku) na dno ładowni.

Ciśnienia oddziaływania morza należy określić według 16.2.2 Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS. Siły nacisku kontenerów na dno należy określać według Cz. III – „Wyposażenie kadłubowe” Przepisów PRS, dla statku w pozycji wyprostowanej.

2.7.3.2 Obciążenie modelu omawianego w 2.7.2.2, stosowane przy określaniu naprężeń σ_{bc} , stanowią siły Z przyłożone do końców przewiązek w płaszczyźnie symetrii kadłuba oraz ewentualnie siły Y przyłożone w (przeciętych z założenia) przekrojach poprzecznych przewiązek wzdłużnych, jak pokazano na rys. 2.6.6.4.

2.8 Naroża luków ładunkowych

2.8.1 Zaleca się stosowanie naroży luków w kształcie łuku okręgu. Naroże łuku powinno mieć zgrubione o 35% poszycie w stosunku do największej wymaganej grubości poszycia w rejonie sąsiednim (rys. 2.8.1).



Rys. 2.8.1

2.8.2 Promień r zaokrąglenia naroża luku (rys. 2.8.1) w pokładzie wytrzymałościowym statku w przypadku konstrukcji z kilkoma lukami położonymi jeden za drugim, nie powinien być mniejszy niż:

$$r = k_1 b \frac{W}{W_r}, \quad [\text{m}] \quad (2.8.2-1)$$

- b – szerokość luków, mierzona między skrajnymi po obu burtach wzdłużnymi zębnicami otworów lukowych, [m];
- W – wskaźnik wytrzymałości kadłuba statku wymagany w danym przekroju kadłuba, określany wg 15.3.1 Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS, [cm^3];
- W_r – faktyczna wartość wskaźnika przekroju poprzecznego kadłuba, obliczona na podstawie jego konstrukcji i wymiarów, według zasad podanych w 15.7.1 Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS, [cm^3];
- k_1 – współczynnik liczbowy
 - $k_1 = 0,025$ dla $c/b \leq 0,04$;
 - $k_1 = 0,050$ dla $c/b \geq 0,2$;
- c – odległość krawędzi poprzecznych sąsiednich luk (szerokość przewiązki), [m].

Dla pośrednich wartości c/b wartość k_1 należy określić poprzez interpolację liniową.

Minimalna wartość r powinna wynosić:

$$r_{\min} = 300 \text{ mm} \quad (2.8.2-2)$$

2.8.3 Promień r zaokrąglenia naroży luków przy wzdłużnych przewiązkach luków może być zmniejszony o 40% w stosunku do wielkości obliczeniowej według wzoru 2.8.2-1, przy czym nie może być mniejszy niż:

$$r_{\min} = 250 \text{ mm} \quad (2.8.3)$$

Obowiązuje przy tym zgrubienie poszycia o wymiarach zgodnych z rys. 2.8.1.

2.8.4 W miejscach połączenia ładunkowej części kadłuba z częściami o konstrukcji zamkniętej (np. przedział siłowni, skrajnik dziobowy) promień zaokrąglenia naroża łuku nie powinien być mniejszy niż:

$$r = 0,07b \frac{W}{W_r}, \quad [\text{m}] \quad (2.8.4)$$

Oznaczenia mają takie samo znaczenie jak dla wzoru 2.8.2-1.

2.8.5 Naroża luków o innej konstrukcji niż na rys. 2.8.1 będą odrębnie rozpatrywane przez PRS.

2.8.6 Zastosowanie naroży luków o innej konstrukcji niż na rys. 2.8.1, mniejszych promieni zaokrąglenia niż wynika to ze wzorów 2.8.2-1 do 2.8.4 lub odstępstwo od wymagań 2.8.1 należy uzasadnić analizą wytrzymałości zmęczeniowej naroży luków, wykonaną w sposób uzgodniony z PRS.

3 ODKSZTAŁCENIA KONSTRUKCJI KADŁUBA – MODEL BELKOWY

3.1 Informacje ogólne

Konstrukcja kadłuba statku z dużymi otworami w pokładach jest przeważnie wiotka. Występują znaczące zmiany kształtu i wymiarów luków ładunkowych, spowodowane skręcaniem kadłuba oraz zginaniem burt ciśnieniami oddziaływania morza. Oszacowanie wielkości wymienionych wyżej odkształceń jest wymagane dla prawidłowego skonstruowania pokryw lukowych i prowadnic kontenerów w ładowniach.

3.2 Odkształcenia konstrukcji kadłuba wywołane skręcaniem

3.2.1 Odkształcenia te wynikają z obrotów przekrojów poprzecznych kadłuba wokół osi przechodzącej przez środki skręcania przekrojów poprzecznych oraz z deplanacji przekrojów poprzecznych.

3.2.2 Położenie środka skręcania należy określić podczas obliczania parametrów I_{ω} , I_{hh} i I_t przekroju poprzecznego, według zasad podanych w 2.6.4. Kąty φ obrotu przekrojów poprzecznych są wyznaczane jako rozwiązanie równania 2.6.2.1, według zasad podanych w 2.6.

3.2.3 Przemieszczenia u punktów przekrojów poprzecznych kadłuba równoległe do osi kadłuba (patrz rys. 2.1.2) należy obliczyć według wzoru:

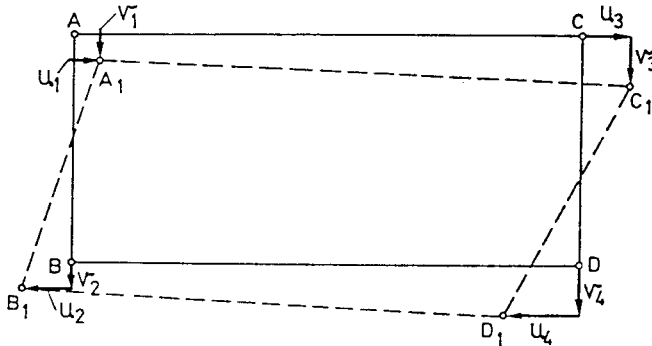
$$u = -\Theta \omega, \quad [\text{m}] \quad (3.2.3)$$

Θ – wynika z rozwiązania $\varphi(x)$ równania 2.6.2.1 i jest obliczane według wzoru 2.6.3.1, $[\text{m}^{-1}]$;

ω – główne pole wycinkowe w rozpatrywanym punkcie przekroju poprzecznego, $[\text{m}^2]$.

Wartości ω w przekroju poprzecznym kadłuba są wyznaczane podczas obliczania parametrów I_{ω} , I_{hh} i I_t , według zasad podanych w 2.6.4.

3.2.4 Zmiany kształtu i wymiarów luku objaśnia rys. 3.2.4.



Rys. 3.2.4

Przemieszczenia wzdłużne u_i , $i = 1, 2, 3, 4$ (rys. 3.2.4) należy wyznaczyć według wzoru 3.2.3.

Przemieszczenia poprzeczne v_i , $i = 1, 2, 3, 4$ oblicza się z następującego wzoru:

$$v = \varphi h, \quad [\text{m}] \quad (3.2.4)$$

φ – kąt obrotu przekroju poprzecznego pręta, [rd];

h – odległość w pionie od rozpatrywanego punktu (od wierzchołka zębownicy) do środka skręcania przekroju kadłuba, [m].

3.2.5 W przypadku konstrukcji z kilkoma rzędami luków, przy określaniu wartości przemieszczeń u , należy dodatkowo uwzględnić zginanie przewiązek pokładowych, na podstawie obliczonych wartości sił Z i Y (rys. 2.6.6.4). Obliczenia te należy wykonać według wymagań określonych w 2.7.

3.2.6 W żadnym z wariantów B, C, D, E zdefiniowanych w 2.2 różnica pomiędzy długościami przekątnych czworokąta $A_1B_1C_1D_1$ i prostokąta $ABCD$ (rys. 3.2.4) nie powinna – w zasadzie – przekroczyć 35 mm.

3.2.7 Przy zmianach długości przekątnych luku większych niż 35 mm, konstrukcja zębnic luków i pokryw luków wymaga specjalnego rozpatrzenia przez PRS.

3.3 Odształcenia kadłuba wskutek zginania pokładu

3.3.1 W przypadku statków z długimi lukami i wąskimi pasami pokładów przy burtach, PRS może zażądać dodatkowo wyznaczenia odształcenia wzdłużnych krawędzi luków wskutek zginania pokładów ciśnieniem oddziaływania morza oraz siłami w przewiązkach i wzdłużnikach pokładowych, wywołanych skręcaniem statku.

Obliczenia takie mogą okazać się niezbędne w celu prawidłowego skonstruowania pokryw lukowych.

3.3.2 Obliczenia ugięć pokładów pomiędzy przewiązkami poprzecznymi można wykonać jednocześnie z obliczeniem naprężeń σ_{bc} , σ_{bw} i σ_{bp} w oparciu o model obliczeniowy wymagany w 2.7.2 i 2.7.3.

4 NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA OBLICZANE METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH (MES) PRZY POMOCY TARCZOWEGO LUB POWŁOKOWEGO MODELU CAŁEGO KADŁUBA

4.1 Informacje wstępne

Niniejszy rozdział zawiera zalecenia i szczegółowe wymagania dotyczące analizy naprężeń i odkształceń kadłuba z uwzględnieniem skręcania, wykonywanej metodą elementów skończonych, zalecaną w 1.2.2 i 1.2.3.

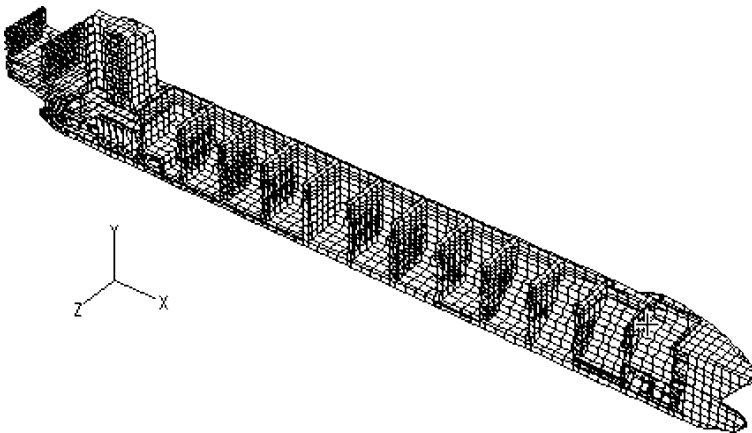
W 4.2 podane są zasady modelowania konstrukcji i obciążeń, a w 4.3 – sposób interpretacji uzyskanych w obliczeniach wartości naprężeń.

4.2 Wymagania dla modeli MES

4.2.1 Obliczenia na podstawie obciążeń przepisowych

4.2.1.1 Cały kadłub statku powinien być podzielony na tarczowe (lub powłokowe) elementy skończone. Zastosowany sposób modelowania powinien zapewnić jak najdokładniejsze przybliżenie kształtu kadłuba oraz sztywności grodzi, poprzecznych konstrukcji przeciwskrętnych (patrz 2.6.5), przewiązek wzdłużnych i poprzecznych, pokładu wytrzymałościowego oraz skrajnych części kadłuba.

Przykład dopuszczalnego modelu MES kadłuba kontenerowca pokazano na rys. 4.2.1.1.



Rys. 4.2.1.1 Model MES kadłuba kontenerowca

4.2.1.2 Maksymalne wymiary tarczowych lub powłokowych elementów skończonych nie powinny w zasadzie być większe od długości krawędzi ściany bocznej kontenera 20-stopowego, tzn. odpowiednio około 6 m i 3,5 m. Usztywnienia lokalne poszycia można uwzględnić poprzez zastosowanie elementów o własnościach ortotropowych, o sztywnościach uwzględniających sztywność osiową usztywnień lub stosując usztywnienia zastępcze o przekrojach równoważnych, umieszczone pomiędzy węzłami siatki MES. Można również stosować specjalne elementy do usztywnionych paneli, spotykanych w okrętownictwie.

4.2.1.3 W celu obliczenia naprężeń σ_{bc} , σ_{bw} i σ_{bp} w rejonach określonych w 2.2.2.1 należy zastosować odpowiednio zagęszczony podział na elementy skończone. Dopuszczalne jest w zasadzie zastosowanie 3 rzędów czterowęzłowych elementów skończonych na szerokości poszycia przewiązki, pasa pokładu przy burcie i na wysokości ciągłej zrębnicy łuku. Dopuszczalne jest także wykonywanie obliczeń w dwóch etapach, stosując naprężenia wyznaczone z rozwiązania zgrubnego modelu MES spełniającego wymagania 4.2.1.1 i 4.2.1.2, jako warunki brzegowe w modelach MES fragmentów kadłuba podzielonych na mniejsze elementy skończone.

4.2.1.4 Wartości falowych momentów skręcających M_{tw1} i M_{tw2} (wzory 2.1.5.2-1 i 2.1.5.2-2) w kadłubie mogą być uzyskane poprzez przyłożenie do modelu obliczeniowego obciążeń skręcających m_{tw1} i m_{tw2} , w kNm/m, przyłożonych wzdłuż osi statku.

Wartości tych obciążeń są następujące :

$$m_{tw1} = 790K_2 C_w B L_0 \left(\delta \cos \frac{2\pi x}{L_0} - 0,75 \cos \frac{3\pi x}{L_0} \right) 10^{-3}, \quad [\text{kNm/m}] \quad (4.2.1.4-1)$$

$$m_{tw2} = \pm 198 C_w B L_0 K_1 \sin \frac{2\pi x}{L_0} 10^{-3}, \quad [\text{kNm/m}] \quad (4.2.1.4-2)$$

Symbole mają identyczne znaczenie jak w 2.1.5.2.

Znak (\pm) we wzorze 4.2.1.4-2 odpowiada znakom M_{tw2} w równaniach 2.1.5.3.

Obciążenia m_{tw1} i m_{tw2} mogą być zadane w formie statycznie równoważnych ciągłych obciążeń pionowych przyłożonych w przeciwnych kierunkach, w rejonie obła do obu burt statku.

4.2.1.5 Wartości momentu skręcającego M_{tc} mogą być uzyskane poprzez zadanie ciągłego obciążenia skręcającego m_{tc} , w kNm/m, przyłożonego wzdłuż osi x statku:

$$m_{tc} = \begin{cases} \frac{2}{L_0} M_{tc} \text{ dla } 0 \leq x \leq \frac{L_0}{2} \\ -\frac{2}{L_0} M_{tc} \text{ dla } \frac{L_0}{2} < x \leq L_0 \end{cases} \quad (4.2.1.5)$$

gdzie:

M_{tc} – moment skręcający obliczony według wzoru 2.1.5.1;

x – odległość od pionu rufowego (rys. 2.1.2), [m].

Obciążenie m_{tc} może być zadane w formie ciągłych obciążeń pionowych, w identyczny sposób jak m_{tw1} i m_{tw2} w 4.2.1.4.

4.2.2 Obliczenia bezpośrednie

4.2.2.1 Obliczenie naprężeń w kadłubie z uwzględnieniem skręcania, które odpowiadają obliczonym bezpośrednio ciśnieniom oddziaływania morza i przyspieszeniom ruchów statku na fali sposobem podanym w 1.2.3, jest celowe w wariantach B i D, zdefiniowanych w 2.2.1. Wytrzymałość kadłuba w wariantach obciążeń A, C i E zaleca się sprawdzać sposobami określonymi w 2.2.1, 2.6 lub 4.2.1.

4.2.2.2 Sposób modelowania konstrukcji powinien umożliwiać zadawanie obciążeń wprost – w formie ciśnień obliczanych sposobem podanym w 1.2.3. Podział konstrukcji kadłuba na elementy skończone powinien spełniać wymagania 4.2.1.1÷4.2.1.3.

4.2.2.3 Fala projektowa (patrz 1.2.3) stosowana w wariantach B obciążenia powinna mieć taką wysokość, aby obliczona maksymalna wartość poziomego falowego momentu zginającego przy kącie kursowym statku względem kierunku ruchu fali równym 120° , była równa $0,59 M_{wh}$. Sposób obliczenia M_{wh} podano w 2.1.4. Długość fali projektowej powinna być równa $0,5 L_0$.

4.2.2.4 Fala projektowa (patrz 1.2.3) stosowana w wariantach D obciążenia powinna mieć taką wysokość, aby obliczona maksymalna wartość pionowego falowego momentu zginającego przy kącie kursowym statku 180° , była równa $0,59 M_w$. Sposób obliczenia M_w podano w 15.5, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS. Długość fali projektowej powinna być równa L_0 .

4.2.2.5 Jeżeli obliczenia bezpośrednie oparte na koncepcji fali projektowej służą do kompleksowej oceny wytrzymałości całego kadłuba statku, tzn. nie tylko rejonu pokładu wytrzymałościowego w warunkach skręcania, to stosowany model MES oraz sposób oceny obliczanych wartości naprężeń powinny spełniać wymagania określone w 5.2.3.

4.3 Analiza naprężeń i odkształceń kadłuba

4.3.1 Naprężenia obliczane dla obciążeń przepisowych

4.3.1.1 Wymiarujące wartości naprężeń w konstrukcji określone są na podstawie naprężeń w poszczególnych elementach skończonych, obliczanych przez stosowane programy komputerowe. Jeżeli stosowane w obliczeniach elementy skończone zapewniają co najmniej liniową interpolację odkształceń w obszarze elementu (np. elementy czworokątne 8-węzłowe), to analizowane wartości naprężeń normal-

nych σ , w kierunku osi x (rys. 2.1.2) w punktach C, D, E (rys. 2.2.2.1) w przekrojach poprzecznych wymienionych w 2.2.2.1, mogą być przyjęte wprost jako naprężenia w odpowiednich punktach elementów skończonych. W przypadku stosowania w obliczeniach elementów zapewniających stałe wartości odkształceń w obszarze elementu, naprężenia σ w punktach C, D, E (rys. 2.2.2.1) powinny być wyznaczane przy zastosowaniu ekstrapolacji liniowej w kierunku tych punktów, na podstawie wartości naprężeń w środkach sąsiednich elementów leżących w płaszczyźnie prostopadłej do osi x (rys. 2.1.2).

4.3.1.2 Przy zastosowaniu modelu MES spełniającego wymagania określone w 4.2.1 obliczane są naprężenia σ_{lc} , σ_{bc} , σ_{wt} i σ_{bw} . Naprężenia σ_s , σ_w i σ_{wh} można obliczyć według wzorów 2.4. i 2.5. Powyższe trzy składowe naprężenia można obliczyć dla wymiarów brutto wiązań kadłuba, tzn. bez odejmowania naddatków korozyjnych.

4.3.1.3 Naprężenia σ_{bp} mogą być obliczone przy zastosowaniu modelu MES spełniającego wymagania określone w 4.2.1.1÷4.2.1.3. Obciążenie modelu stanowią zewnętrzne ciśnienia oddziaływania morza obliczone według 16.2.2, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS. Można założyć nieprzesuwne w kierunku pionowym podparcie burty w rejonie obła. Naprężenia σ_{bp} można alternatywnie obliczyć wykorzystując model części kadłuba stosowany w analizie wytrzymałości strefowej (patrz 5.2) oraz obciążenia opisane wyżej. Obliczenia należy wykonać dla wymiarów netto wiązań kadłuba, tzn. po odjęciu naddatków korozyjnych ustalonych wg 2.5, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

4.3.1.4 Naprężenia σ_{tot} należy wyznaczyć według wymagań określonych w 2.2.2. Obowiązują dopuszczalne wartości naprężeń podane w 2.3.

4.3.1.5 Wartości naprężeń w rejonach naroży luków mogą podlegać dodatkowo ocenie ze względu na spełnienie kryteriów dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej (patrz 2.8).

4.3.2 Naprężenia obliczane bezpośrednio

4.3.2.1 Ocenie podlegają całkowite wartości naprężeń σ w tych samych punktach i przy zastosowaniu takich samych metod ich określenia, jak w 4.3.1.1.

4.3.2.2 Dopuszczalne wartości σ należy przyjąć dla wariantów B i D, według 2.3.

4.3.2.3 Obliczenia mogą być wykonane dla wymiarów brutto wiązań kadłuba, tzn. bez odejmowania naddatków korozyjnych.

4.3.3 Odształcenia kadłuba

4.3.3.1 Zmiany długości przekątnych luków ładunkowych należy obliczyć według zasad podanych w 3.2 dla wartości przemieszczeń u i v (rys. 3.2.4), otrzymanych wprost jako wyniki obliczeń programu komputerowego.

4.3.3.2 Dopuszczalna wartość wydłużeń przekątnych luku podana w 3.2.6 dotyczy także obliczeń wykonanych zgodnie z wymaganiami 4.3.1 i 4.3.2.

5 WYTRZYMAŁOŚĆ STREFOWA KADŁUBA KONTENEROWCA

5.1 Informacje wstępne

5.1.1 W niniejszym rozdziale podane są zasady analizy wytrzymałości wiązarów kadłuba wchodzących w skład dwu- lub trójwymiarowych układów konstrukcyjnych obciążonych siłami ciężkości i bezwładności kontenerów oraz ciśnieniami oddziaływania morza.

Podane są stany obciążeń wymiarujących konstrukcję, wymagania dotyczące modelu konstrukcji przyjmowanego do obliczeń oraz naprężeń dopuszczalnych.

5.1.2 W przypadku analizy naprężeń w kadłubie z uwzględnieniem skręcania, metodą opisaną w 4.2.2, wykonywane jest jednocześnie sprawdzenie wytrzymałości strefowej kadłuba. Sposób modelowania konstrukcji powinien jednak w takiej sytuacji spełniać wymagania podane w 5.2.3.3. Wartości naprężeń dopuszczalnych podane są w 5.4.

5.2 Modelowanie konstrukcji

5.2.1 Zakres analizy

Wymagania niniejszego rozdziału dotyczą środkowej części kadłuba. Na ogół zakłada się, że spełnienie tych wymagań w skrajnych częściach kadłuba jest zapewnione, jeżeli wymiary i konstrukcja układów wiązarów są tam podobne.

W przeciwnym wypadku PRS może wymagać wykonania analizy wytrzymałości strefowej także w skrajnych częściach kadłuba.

5.2.2 Minimalny zasięg analizowanego fragmentu konstrukcji

5.2.2.1 Analizowany fragment konstrukcji powinien obejmować co najmniej fragment konstrukcji od środka ładowni (od grodzi podporowej, jeśli istnieje ona w środkowej części ładowni) do środka ładowni sąsiedniej (do grodzi podporowej), od płaszczyzny symetrii kadłuba do burty.

5.2.2.2 Jeżeli obciążenie lub konstrukcja każdej z dwóch sąsiadujących ze sobą ładowni nie są symetryczne w kierunku wzdłużnym, to do obliczeń należy przyjąć model dwukrotnie dłuższy (na każdym końcu) niż w 5.2.2.1, tzn. obejmujący całą długość ładowni plus połowa sąsiedniej ładowni.

5.2.3 Stosowane elementy skończone

5.2.3.1 Na ogół dopuszczalne jest wykonanie obliczeń przy zastosowaniu modelu ramy przestrzennej obejmującego przedział konstrukcji kadłuba określony w 5.2.2. Przy ustalaniu parametrów przekrojów poprzecznych prętów, położenia prętów i modelowania miejsc skrzyżowań prętów należy spełnić wymagania sformułowane w 2.7.2.1. Zalecane jest jednak wykonanie obliczeń z zastosowaniem modelu konstrukcji opisanego w 5.2.3.3.

5.2.3.2 W analizie wytrzymałości strefowej można wykorzystać wprost model ramy przestrzennej opisany w 2.7, stosowany do obliczania naprężeń od zginania pokładu.

5.2.3.3 Zalecane jest wykonanie analizy wytrzymałości strefowej obszaru konstrukcji zdefiniowanego w 5.2.2 przy zastosowaniu podziału poszycia i środników wiązarów na powłokowe lub tarczowe elementy skończone, spełniającego następujące warunki:

- .1 do obliczeń należy przyjąć grubości netto elementów konstrukcyjnych, tzn. od grubości projektowych należy odjąć naddatki korozyjne określone wg 2.5, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS;
- .2 usztywnienia lokalne poszycia mogą być uwzględnione w formie tzw. ortotropii konstrukcyjnej;
- .3 wymiary stosowanych elementów skończonych powinny być odpowiednio małe w celu prawidłowego odwzorowania zginania wiązarów, nierównomiernego rozkładu naprężeń w poszyciach tworzących mocniki wiązarów oraz naprężeń w zakrzywionych rejonach konstrukcji;
- .4 jeśli stosowane są elementy skończone o stałych z założenia wartościach naprężeń w ich obszarze, to na wysokości środnika wiązara, pokładu w podwójnej burcie, przewiązki pokładowej itp., należy zastosować co najmniej 3 rzędy elementów. W przypadku stosowania dokładniejszych elementów, jak np. elementy czworokątne ośmiowięzłowe, w sytuacjach opisanych wyżej wystarcza na ogół zastosowanie jednego rzędu elementów;
- .5 otwory w środnikach wiązarów mogą być uwzględnione poprzez zastosowanie w ich rejonie średniej wartości grubości poszycia, otrzymanej w wyniku podzielenia powierzchni przekroju poprzecznego materiału środnika płaszczyzną przechodzącą przez średnicę otworu, przez wysokość środnika. Wpływ otworów wzmocnionych na brzegu obramowaniem z płaskownika będzie osobno rozpatrywany przez PRS.

5.2.3.4 Wartości naprężeń obliczone w wyniku zastosowania modelu obliczeniowego opisanego w 5.2.3.3 należy interpretować w następujący sposób:

- .1 jeżeli w obliczeniach stosowane są elementy skończone o stałych wartościach naprężeń w ich obszarze, to naprężenia na krawędziach elementów wyznaczone są poprzez ekstrapolację liniową wykonywaną na podstawie wartości naprężeń w środkach elementów;

- .2 naprężenia styczne w środnikach wiązarów z otworami należy obliczać jako wartości średnie, otrzymane w wyniku podzielenia siły ścinającej przez wartość pola przekroju netto;
- .3 wartości naprężeń w rejonach karbów mogą na ogół przekraczać poziom wartości dopuszczalnych podanych w 5.4. Wartości tych naprężeń podlegają specjalnemu rozpatrzeniu przez PRS. Może być przy tym wymagana ocena wartości tych naprężeń na podstawie kryterium wytrzymałości zmęczeniowej.

5.2.4 Warunki brzegowe

5.2.4.1 Na końcach fragmentu konstrukcji określonego w 5.2.2.1 należy zadać tzw. symetryczne warunki brzegowe. W modelu MES opisanym w 5.2.3.3 należy założyć zerowe wartości przemieszczeń węzłów w kierunku osi x statku.

W modelu ramy przestrzennej (patrz 5.2.3.1) należy założyć zerowe wartości kątów obrotu przekrojów prętów wokół osi y i z (rys. 2.1.2).

5.2.4.2 Dla symetrycznych, względem płaszczyzny symetrii statku, obciążeń należy w tej płaszczyźnie zastosować warunki brzegowe zdefiniowane podobnie jak w 5.2.4.1. Pręty ramy przestrzennej powinny wówczas mieć zerowe kąty obrotu wokół osi x i z statku (rys. 2.1.2). Należy też założyć zerowe wartości przemieszczeń w kierunku osi y .

5.2.4.3 Dla asymetrycznej składowej obciążenia względem płaszczyzny symetrii statku, jak np. w wariancie obciążenia S06 (patrz 5.3.1.8), w modelu ramy przestrzennej należy założyć zerowe przemieszczenia w kierunku y i z oraz możliwości obrotów osi x statku.

5.2.4.4 W modelu MES (patrz 5.2.3.3) należy zastosować warunki brzegowe równoważne do opisanych w 5.2.4.1 do 5.2.4.3.

5.3 Obciążenie

5.3.1 Analizowane warianty obciążenia

5.3.1.1 Analizę wytrzymałości strefowej kontenerowca należy na ogół wykonać w stanach obciążenia S01÷S09, zdefiniowanych w 5.3.1.2÷5.3.1.11. W indywidualnych przypadkach PRS może zgodzić się na zmniejszenie liczby analizowanych stanów obciążenia. Wymagana może być także analiza dodatkowych stanów obciążenia, wskazanych przez PRS.

5.3.1.2 Stan obciążenia S01

Zanurzenie statku na wodzie spokojnej wynosi T . Statek jest w położeniu wyprostowanym (kął przechyłu równy zeru). W ładowniach oraz powyżej pokładu zewnętrznego (na pokrywach lukowych), na długości fragmentu konstrukcji okre-

ślonej w 5.2.2.1 znajduje się maksymalna możliwa masa kontenerów (wg „Instrukcji załadowania statku”). Wartości ciśnień oddziaływania morza na poszycie kadłuba należy ustalić zgodnie z 5.3.1.12, a wartości obciążeń pionowych pochodzących od kontenerów wg 5.3.1.13. Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach wzdłużnych przewiązek pokładowych.

5.3.1.3 Stan obciążenia S01A

Stan załadowania i położenie statku identyczne jak w S01 (patrz 5.3.1.2). Dodatkowo w stosunku do obciążeń w stanie S01 należy uwzględnić wzdłużne siły bezwładności działające na kontenery, o wartościach :

$$F_l = ma_l, \quad [\text{kN}] \quad (5.3.1.3)$$

m – masa kontenera, [t];

a_l – przyspieszenie wzdłużne, [m/s^2].

a_l należy przyjmować równe $0,67 a_L$, gdzie a_L oznacza wypadkowe przyspieszenie wzdłużne, obliczane wg 17.4.3, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach elementów konstrukcji grodzi wodoszczelnych i podporowych.

5.3.1.4 Stan obciążenia S02

Zanurzenie statku na wodzie spokojnej wynosi T . Ciśnienia oddziaływania morza na poszycie statku są identyczne jak w S01. Statek jest w położeniu wyprostowanym. Na pokładzie zewnętrznym, na całej długości analizowanego fragmentu konstrukcji (patrz 5.2.2.1) znajduje się równomiernie rozłożona wzdłuż długości i szerokości statku maksymalna masa kontenerów, określona w „Instrukcji załadowania statku”. Na całej długości ładowni w środkowej części analizowanego fragmentu statku znajduje się minimalna masa kontenerów (kontenery puste), a w sąsiednich ładowniach – maksymalna dopuszczalna masa kontenerów. Ten stan obciążenia może decydować o wymiarach elementów konstrukcji grodzi podporowych – zwłaszcza dla ich pilersów.

5.3.1.5 Stan obciążenia S03

Zanurzenie statku na wodzie spokojnej wynosi T . Ciśnienia oddziaływania morza na poszycie statku i sposób obliczenia sił oddziaływania kontenerów są identyczne jak w S01. W analizowanej ładowni znajduje się minimalna masa ładunku (kontenery puste). Na pokładzie zewnętrznym nie ma kontenerów. Obie sąsiednie ładownie oraz pokłady nad nimi są obciążone maksymalnym dopuszczalnym ciężarem kontenerów, określonym w „Instrukcji załadowania statku”. Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach elementów konstrukcji dna podwójnego i grodzi podporowych.

5.3.1.6 Stan obciążenia S04

Zanurzenie statku na wodzie spokojnej wynosi T . W analizowanej ładowni oraz na pokładzie nad nią znajduje się maksymalna dopuszczalna masa kontenerów, określona w „Instrukcji załadowania statku”. Sąsiednie ładownie i pokłady nad nimi są puste. Statek jest przechylony o kąt $1/2 \Phi_A$, gdzie Φ_A – amplituda kołysań bocznych określona według 17.3.3, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

Należy przyjąć następujący rozkład ciśnień działających na poszycie kadłuba:

- ciśnienie na oble burty wynurzonej:

$$p = 10T - 5B \operatorname{tg}\left(\frac{\Phi_A}{2}\right), \quad [\text{kPa}]; \quad (5.3.1.6-1)$$

- na burcie wynurzonej, w odległości $T - 0,5B \operatorname{tg}\left(\frac{\Phi_A}{2}\right)$ nad płaszczyzną podstawową, $p = 0$

- ciśnienie na oble burty o zwiększonym zanurzeniu:

$$p = 10T + 5B \operatorname{tg}\left(\frac{\Phi_A}{2}\right), \quad [\text{kPa}]; \quad (5.3.1.6-2)$$

- na burcie o zwiększonym zanurzeniu, w odległości $T + 0,33 B \operatorname{tg}\left(\frac{\Phi_A}{2}\right)$ od płaszczyzny podstawowej, $p = 0$;

- pomiędzy wymienionymi wyżej punktami ciśnienie zmienia się liniowo.

Ze względu na powszechnie stosowany sposób mocowania pokryw lukowych w kierunku poprzecznym przy jednej z burt, należy przeanalizować przechył statku o kąt $1/2 \Phi_A$, kolejno na obie burty statku.

Wartości obciążeń pionowych od kontenerów należy określić wg 5.3.1.13. Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach elementów konstrukcji burt i grodzi podporowych. Wymagane jest zastosowanie modelu obliczeniowego obejmującego całą szerokość kadłuba lub podział obciążenia na składową symetryczną i asymetryczną.

5.3.1.7 Stan obciążenia S05

Załadowanie statku jest identyczne jak w S04. Statek jest w pozycji wyprostowanej ale jego zanurzenie na wodzie spokojnej wynosi $0,65T$. Ciśnienia oddziaływania morza należy wyznaczyć dla powyższego zanurzenia, według 5.3.1.12, a pionowe siły oddziaływania kontenerów – wg 5.3.1.13. Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach elementów konstrukcji dna i grodzi podporowych.

5.3.1.8 Stan obciążenia S06

Stan załadowania, zanurzenie statku i ciśnienie zewnętrzne są identyczne jak w S04. Oprócz obciążenia pionowego jak w S04, działają dodatkowo prostopadle

do płaszczyzny symetrii siły bezwładności, w kierunku przechyłu statku, o wartościach:

$$P_t = 0,67a_T m \quad (5.3.1.8)$$

gdzie: a_T – przyspieszenie poprzeczne obliczane wg 17.4.2, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach elementów konstrukcji burt i grodzi podporowych. Wymagane jest zastosowanie modelu obliczeniowego obejmującego fragment kadłuba na całej jego szerokości, albo podział obciążenia na składowe symetryczną i asymetryczną – identycznie jak w 5.3.1.6.

5.3.1.9 Stan obciążenia S07

W stosunku do S01 należy tylko zmienić obciążenie pokładu. Maksymalna dopuszczalna masa kontenerów na pokładzie znajduje się tylko z jednej strony płaszczyzny symetrii kadłuba. Pozostała część pokładu jest pusta.

Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach wzdłużnych przewiązek pokładowych, które są w tym wariancie obciążenia zginane i skręcane.

5.3.1.10 Stan obciążenia S08

W stosunku do S02 należy tylko wprowadzić zmianę polegającą na obciążeniu pokładu – identycznie jak w S07. Ten stan obciążenia może decydować o wymaganych wymiarach wzdłużnych przewiązek luków i pilersów w ładowni.

5.3.1.11 Stan obciążenia S09

Jest to stan awaryjny. Ładownię statku załadowanego jak w S05 należy dodatkowo zalać wodą do poziomu $0,9H$ powyżej płaszczyzny podstawowej. Obciążenie konstrukcji stanowią statyczne siły ciężkości kontenerów, ciężar wody pomiędzy kontenerami działający na dno wewnętrzne, statyczne ciśnienia zewnętrzne odpowiadające zanurzeniu $0,8H$ i ciśnienie statyczne obciążające grodzie poprzeczne. Ten stan może decydować o wymaganych wymiarach elementów konstrukcji grodzi poprzecznych.

5.3.1.12 Ciśnienia działające na poszycie statku

Ciśnienie obciążające z zewnątrz poszycie statku należy wyznaczyć według 16.2.2, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

5.3.1.13 Pionowe obciążenie od kontenerów

Pionowe siły oddziaływania kontenerów na kadłub statku mają wartości:

$$P_v = m(g + 0,5a_v), \quad [\text{kN}] \quad (5.3.1.13)$$

gdzie:

m – masa kontenera, [t]

g – przyspieszenie ziemskie, [m/s^2]

a_v – przyspieszenie pionowe, [m/s²], obliczane wg 17.4.1, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

5.4 Naprężenia dopuszczalne

5.4.1 Interpretacja obliczanych naprężeń

5.4.1.1 Naprężenia nominalne, obliczone poprzez rozwiązanie dla modelu obliczeniowego zdefiniowanego w 5.2.3.1, podlegają bezpośrednio porównaniu z naprężeniami dopuszczalnymi, podanymi w 5.4.1.4÷5.4.1.6.

5.4.1.2 Naprężenia otrzymane w wyniku rozwiązania dla modelu MES opisanego w 5.2.3.3 należy interpretować wg zasad podanych w 5.2.3.4 i otrzymane w ten sposób wartości porównać z wartościami naprężeń dopuszczalnych, podanymi w 5.4.1.4÷5.4.1.6. W przypadku środników wiązarów z dwoma współpracującymi pasami poszycia (np. dennik i wzdłużniki w dnie podwójnym) naprężenia zredukowane nie muszą być porównywane z ich wartościami dopuszczalnymi, jeśli naprężenia normalne i styczne (każde osobno) nie przekraczają podanych w 5.4.1.4÷5.4.1.6 wartości dopuszczalnych.

5.4.1.3 Wyznaczając naprężenia w pokładowych przewiązkach poprzecznych należy zsumować naprężenie będące wynikiem zginania przewiązek w wariantach B i D obciążeń zdefiniowanych w 2.2.1 i naprężeń wyznaczonych w ramach analizy wytrzymałości strefowej.

5.4.1.4 Naprężenia dopuszczalne w wiązarach poprzecznych (tzn. usytuowanych w płaszczyznach wręgowych wynoszą :

- naprężenia normalne: $\sigma = 160k$, [MPa];
- średnie naprężenia styczne w środnikach: $\tau = 90k$, [MPa];
- naprężenia zredukowane: $\sigma_{zr} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 180k$, [MPa].

5.4.1.5 Naprężenia dopuszczalne w wiązarach wzdłużnych wynoszą:

- średnie naprężenia styczne w środnikach: $\tau = 100k$, [MPa];
- suma naprężeń normalnych wyznaczonych w ramach analizy wytrzymałości ogólnej (zginanie ogólne w płaszczyznach pionowej i poziomej oraz skręcanie), i naprężeń normalnych wyznaczonych w analizie wytrzymałości strefowej:
 $\sigma = 190k$, [MPa].

Uwaga: Składową naprężeń wyznaczoną w ramach analizy wytrzymałości ogólnej należy wyznaczyć w wariantach obciążenia B i D, zdefiniowanych w 2.2.1 dla zredukowanych wartości falowych momentów zginających i falowego momentu skręcającego poprzez zastosowanie mnożnika o wartości 0,59 (patrz wzory 2.2.2-1 i 2.2.2-3).

5.4.1.6 Naprężenia dopuszczalne w wiązarach grodzi poprzecznych w stanie obciążenia S09 (patrz 5.3.1.11) wynoszą:

- naprężenia normalne $\sigma = 0,9 R_e$;
- średnie naprężenie styczne w środnikach: $= 0,5R_e$.

6 WYTRZYMAŁOŚĆ KONSTRUKCJI KADŁUBA W REJONIE URZĄDZEŃ DO USTALANIA POŁOŻENIA I MOCOWANIA KONTENERÓW

6.1 Postanowienia ogólne

Wymagania dotyczą niezbędnych wzmocnień konstrukcji kadłuba w rejonie osprzętu (urządzeń do ustalania położenia i mocowania kontenerów) połączonego na stałe z elementami konstrukcyjnymi statku.

Do urządzeń tych należą konstrukcje podpierające, a w szczególności prowadnice kontenerów, gniazda do mocowania kontenerów, fundamenty, podpory i inne niezbędne podparcia.

6.2 Rozmieszczenie

Systemy i urządzenia do mocowania kontenerów powinny spełniać wymagania rozdziału 15 Cz. III – „Wyposażenie kadłubowe” oraz rozdziału 18, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

6.3 Rozwiązania konstrukcyjne

Rozwiązania konstrukcyjne wzmocnień konstrukcji w rejonie osprzętu na stałe połączonego z kadłubem statku powinny spełniać wymagania rozdziału 4 i 18, Cz. II – „Kadłub” Przepisów PRS.

6.4 Obciążenia obliczeniowe

Obciążenia wynikające ze sposobu mocowania i podparcia kontenerów należy wyznaczyć dla najbardziej niekorzystnego, realnego stanu załadowania wraz z największym obciążeniem dynamicznym, obliczonym zgodnie z wymaganiami podanymi w 18.5 Cz. II – „Kadłub” oraz 15.3 Cz. III – „Wyposażenie kadłubowe” Przepisów PRS.

6.5 Modelowanie konstrukcji i wykonywanie obliczeń

Model obliczeniowy powinien wiernie odwzorowywać konstrukcję kadłuba statku w rejonie osprzętu na stałe mocowanego z kadłubem. Do jego przygotowania stosowane powinny być ogólne zasady mechaniki konstrukcji okrętowych.

Model konstrukcji przyjęty do obliczeń w zależności od szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych powinien być jedno-, dwu- lub trójwymiarowy.

Jednowymiarowy model powinien uwzględniać wpływ odkształceń wywołanych zginaniem, ścinaniem, rozciąganiem i ściskaniem oraz skręcaniem.

Dwu- lub trójwymiarowy model konstrukcji powinien być rozwiązany analitycznie lub numerycznie. W przypadku obliczeń numerycznych zalecaną metodą

jest metoda elementów skończonych. Wykorzystane powinny być w zależności od potrzeb elementy tarczowe, prętowe lub płytowe.

Istotnym elementem modelowania jest wpływ przyjętych warunków brzegowych.

Zastosowane do obliczeń metody oraz programy obliczeniowe powinny być z grupy zalecanych przez PRS i przedstawionych w oddzielnych publikacjach.

Przyjęty model konstrukcji oraz wyniki obliczeń każdorazowo wymagają zatwierdzenia PRS.

6.6 Naprężenia dopuszczalne

W konstrukcji otaczającej osprzęt kontenerów na stałe mocowany z kadłubem można przyjąć naprężenia dopuszczalne:

- w przypadku modelu jednowymiarowego
 - naprężenia normalne $\sigma = 210 k$, [MPa];
 - naprężenia styczne $\tau = 120 k$, [MPa];
- w przypadku elementów dwuwymiarowych, naprężenia zredukowane należy obliczyć z zależności:

$$\sigma_{zr} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau_{12}^2} < 235k, \quad [\text{MPa}] \quad (6.6)$$

gdzie:

- σ_1, σ_2 – naprężenia normalne w kierunku dwu wzajemnie prostopadłych osi 1 i 2, [MPa]
 - τ_{12} – naprężenia styczne w płaszczyźnie 12, [MPa].
-