

Polski Rejestr Statków

PRZEPISY

PUBLIKACJA NR 45/P

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
STALOWEGO KADŁUBA STATKU

1998

(Tekst ujednolicony zawierający
Zmiany Nr 1/2005,
stan na 15 grudnia 2005 r.)

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



GDAŃSK

Publikacja Nr 45/P – Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku – 1998, stanowi rozszerzenie wymagań Części II – Kadłub – 1996, Przepisów klasyfikacji i budowy statków morskich.

Publikacja ta, rozpatrzona i pozytywnie zaopiniowana przez Radę Techniczną PRS w dniu 19 października 1998 r., została zatwierdzona przez Dyrektora Naczelnego PRS w dniu 15 lutego 1999 r. i wchodzi w życie z dniem 1 czerwca 1999 r.

© Copyright by Polski Rejestr Statków, 1998

PRS/TW, 03/99

SPIS TREŚCI

str.

1	Postanowienia ogólne	5
1.1	Zakres zastosowania i metody analizy	5
1.2	Oznaczenia i określenia	6
2	Uproszczone obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba	7
2.1	Algorytm obliczeń	7
2.2	Obliczanie zakresu naprężeń	8
2.3	Długoterminowy rozkład zakresów naprężeń	26
2.4	Klasyfikacja elementów konstrukcji. Wykresy Wöhlera	26
2.5	Korekta wykresów Wöhlera	32
2.6	Obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej	33
3	Bezpośrednie obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej	40
3.1	Zasady ogólne	40
3.2	Prognoza krótkoterminowa zakresów naprężeń	41
3.3	Prognoza długoterminowa zakresów naprężeń	42
3.4	Obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej	44
4	Obliczanie naprężeń metodą elementów skończonych	45
4.1	Ogólne zasady obliczania naprężeń	45
4.2	Obliczanie naprężeń geometrycznych	46
4.3	Obliczanie naprężeń z uwzględnieniem wymiarów kształtu spoin	48

1 POSTANOWIENIA OGÓLNE

1.1 Zakres zastosowania i metody analizy

1.1.1 Niniejsza Publikacja stanowi rozszerzenie wymagań Części II – Kadłub, Przepisów klasyfikacji i budowy statków morskich, o wymagania dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji stalowego, spawanego kadłuba statku morskiego.

1.1.2 Standard wytrzymałości zmęczeniowej określony w Publikacji oraz zalecane metody obliczeń pozwalają oszacować, czy proponowane rozwiązania konstrukcyjne kadłuba mają wystarczającą wytrzymałość zmęczeniową dla założonego okresu eksploatacji statku (przeważnie 20 lat) oraz, w razie potrzeby, dokonać korekty proponowanych wstępnie rozwiązań różnych detali konstrukcyjnych.

1.1.3 Niniejsza Publikacja zawiera wymagania dotyczące analizy wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłubów statków, poddanych zmiennym w czasie (pulsującym) naprężeniom, wywołanym przez siły bezwładności ładunku, wyposażenia i konstrukcji statku, generowane w warunkach ruchu statku na fali oraz generowane w tych warunkach ciśnienia dynamiczne wody.

1.1.4 Zmienne naprężenia w elementach konstrukcji kadłubów powstające podczas drgań konstrukcji wymuszanych przez silniki główne i pomocnicze, pędnik, maszyny i urządzenia zainstalowane na statku oraz drgań od obciążeń dynamicznych na fali i naprężenia od obciążeń udarowych w formie slemingu i sloshingu, a także naprężenia spowodowane zmianami temperatury elementów konstrukcji kadłuba nie są uwzględniane w niniejszej Publikacji.

1.1.5 Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej powinny obejmować, zależnie od rodzaju statku, następujące elementy konstrukcji kadłuba wykonane ze stali o podwyższonej wytrzymałości:

- .1** w przypadku zbiornikowców o pojedynczym kadłubie:
 - połączenia wzdłużnych usztywnień burt i grodzi wzdłużnych z ramami lub grodziami poprzecznymi;
 - węzłówki wiązarów wzdłużnych i poprzecznych;
 - krawędzie otworów i wycięć w wiązarach.
- .2** w przypadku zbiornikowców o podwójnym kadłubie:
 - połączenia poszycia pochyłych ścian burt wewnętrznych z poszyciem dna wewnętrznego i pionowych części burt wewnętrznych;
 - połączenia spawane środków wiązarów poprzecznych z poszyciem burty wewnętrznej i dna wewnętrznego, w rejonach załamania płaszczyzn poszycia;
 - połączenia usztywnień wzdłużnych kadłubów zewnętrznego i wewnętrznego z wiązarami lub grodziami poprzecznymi;
 - węzłówki wiązarów wzdłużnych i poprzecznych;
 - krawędzie otworów i wycięć w wiązarach.
- .3** w przypadku kontenerowców i statków innych niż kontenerowce, przystosowanych do przewożenia kontenerów:
 - naroża luków ładunkowych;
 - połączenie mocnicy pokładowej z mocnicą burtową;
 - połączenia wzdłużnych usztywnień poszycia z ramami lub grodziami poprzecznymi.
- .4** w przypadkach masowców:
 - węzłówki wręgów burtowych;
 - połączenia fal grodzi i połączenia poszyc cokołów grodzi z górnymi płytami cokołów;
 - połączenia poszyc cokołów grodzi z poszyciem dna wewnętrznego;
 - połączenia poszycia zbiornika obłowego z poszyciem dna wewnętrznego i z dennikami;
 - naroża luków ładunkowych;
 - węzłówki na końcach wzdłużnych zrębnic luków.

Obliczenia winny wykazać, że wytrzymałość zmęczeniowa tych elementów konstrukcji, wykonanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości, spełnia kryteria zawarte w niniejszej Publikacji.

1.1.6 PRS może także wymagać wykonania obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej innych elementów konstrukcji i innych typów statków niż wymienione w 1.1.5 – w zależności od specyfiki konstrukcji i jej obciążeń dynamicznych oraz wartości granicy plastyczności stosowanej stali.

1.1.7 Metoda obliczania wytrzymałości zmęczeniowej wymagana w niniejszej Publikacji dotyczy tzw. wytrzymałości wysokocyklowej. Wykorzystywana jest hipoteza Palmgrena-Minera oraz krzywe (wykresy) Wöhlera (2.4.3).

PRS może także zaakceptować wyniki obliczeń uzyskane poprzez zastosowanie metod analizy propagacji szczelin pęknięć zmęczeniowych. Do opisu wzrostu szczeliny zalecane jest zastosowanie prawa Parisa.

1.1.8 Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba mogą być wykonane metodą uproszczoną, według wymagań rozdziału 2. Metoda taka może jednak prowadzić do zaniżonych wartości trwałości zmęczeniowej – zwłaszcza w przypadku elementów konstrukcji, w których występuje sumowanie naprężeń od zginania ogólnego lub skręcania kadłuba i od zginania lokalnego – ciśnieniami oddziaływania morza lub ładunku.

1.1.9 Zalecane jest zastosowanie metody obliczeń polegającej na bezpośrednim obliczeniu długoterminowego rozkładu naprężeń z zastosowaniem tzw. analizy widmowej (rozdział 3) oraz obliczenie naprężeń w rejonie karbów – według wymagań 4.2 – zwłaszcza w sytuacjach sprecyzowanych w 3.1.1 i 4.1.1.

1.1.10 Metody obliczania wytrzymałości zmęczeniowej wymagane przez niniejszą Publikację opierają się na założeniu, że jakość wykonania połączeń spawanych oraz tolerancje wykonawcze nie odbiegają od poziomu tradycyjnie uważanego w praktyce produkcyjnej stoczni jako zadowalający.

1.2 Oznaczenia i określenia

1.2.1 Określenia i skróty stosowane w niniejszej Publikacji:

DE N – Department of Energy – brytyjska instytucja zajmująca się między innymi bezpieczeństwem konstrukcji stalowych.

Długoterminowy rozkład zakresów naprężeń – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zakresów naprężeń wyznaczona dla zakładanego okresu eksploatacji statku.

Fala regularna – dwuwymiarowa fala na powierzchni wody o sinusoidalnym kształcie powierzchni, opisywana przy pomocy teorii przepływu potencjalnego cieczy idealnej.

Funkcja przenoszenia (amplitudy) – wartość amplitudy odzewu kadłuba (np. naprężeń w wybranym punkcie konstrukcji) na wymuszenia (obciążenia) w warunkach pływania na fali regularnej o jednostkowej amplitudzie.

IIW – International Institute of Welding – międzynarodowa instytucja zajmująca się problematyką spawania.

MES – metoda elementów skończonych.

Naprężenia geometryczne – wartości naprężeń w rejonie karbu, obliczane metodą elementów skończonych z zastosowaniem specjalnej metody ekstrapolacji wyników, albo z zastosowaniem współczynników koncentracji naprężeń dla naprężeń nominalnych.

Naprężenia nominalne – naprężenia obliczane z zastosowaniem belkowych lub prętowych modeli elementów konstrukcji kadłuba albo zgrubnych modeli MES.

Prognoza krótkoterminowa – rozkład prawdopodobieństwa parametru odzewu kadłuba (np. naprężeń w konstrukcji) w warunkach falowania stacjonarnego o zadanych wartościach znaczącej wysokości fali i charakterystycznego okresu fali.

Przepisy – Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich Polskiego Rejestru Statków.

Trwałość zmęczeniowa – zdolność konstrukcji do przenoszenia obciążeń dynamicznych, mierzona liczbą lat eksploatacji, po której spodziewane są pęknięcia zmęczeniowe.

Stopień (parametr) zużycia zmęczeniowego – bezwymiarowy współczynnik stosowany w hipotezie Palmgren-Minera do oceny (mierzenia) wielkości skumulowanych uszkodzeń zmęczeniowych.

Środkowa część kadłuba – symetryczna względem owręza część statku o długości $0,4 L_0$ (gdzie L_0 – długość obliczeniowa statku, zdefiniowana w Przepisach).

1.2.2 Ważniejsze oznaczenia stosowane w niniejszej Publikacji:

C – współczynnik koncentracji naprężeń;

C_e – współczynnik koncentracji naprężeń wynikający z niedokładności montażu konstrukcji;

C_n – współczynnik koncentracji naprężeń w mocniku usztywnienia (wiązara) o niesymetrycznym przekroju poprzecznym;

C_w – współczynnik koncentracji naprężeń dla połączeń węzłowych wzdłużnych usztywnień poszycia (wiązarów);

D – stopień (parametr) zużycia zmęczeniowego;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie;

$k_{pr} = (0,5)^{1/\xi}$ – bezwymiarowy współczynnik dopasowujący wartości obciążenia do wielkości przekraczanych z prawdopodobieństwem 10^{-4} ;

ξ – współczynnik rozkładu Weibulla, przybliżającego długoterminowy rozkład zakresów naprężeń (obliczany według 2.3.3);

L_0 – długość obliczeniowa statku, [m], (zdefiniowana w Przepisach);

$\text{Min}(a, b)$ – mniejsza wartość liczbowa spośród a, b ;

$\text{Max}(a, b)$ – większa wartość liczbowa spośród a, b ;

R_e – granica plastyczności stali, [MPa];

$\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$ – gęstość wody morskiej;

$\Delta\sigma$ – zakres naprężeń, [MPa];

$\Delta\sigma_g$ – wypadkowy zakres naprężeń globalnych, [MPa];

$\Delta\sigma_l$ – wypadkowy zakres naprężeń lokalnych, [MPa];

$\Delta\sigma_r$ – wypadkowy zakres naprężeń, [MPa], będący wynikiem superpozycji naprężeń globalnych i lokalnych.

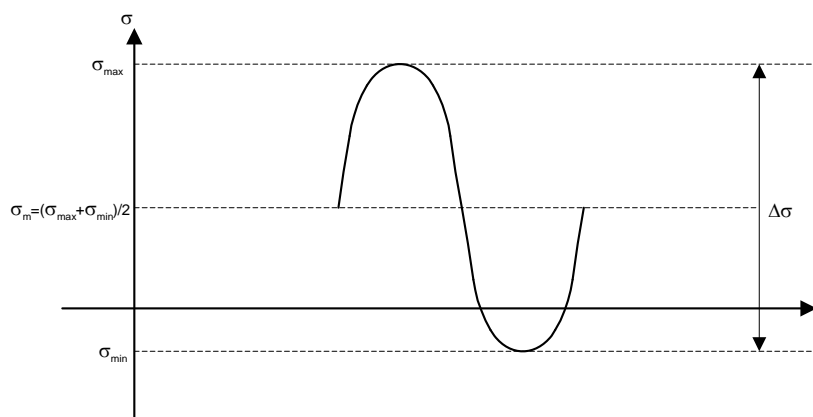
2 UPROSZCZONE OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW KONSTRUKCJI KADŁUBA

2.1 Algorytm obliczeń

2.1.1 Definicja zakresu naprężeń

Pojedynczy cykl pulsujących naprężeń, które mogą być przyczyną pęknięć zmęczeniowych elementów konstrukcji, zdefiniowano na rys. 2.1.1.

Podstawowym parametrem wpływającym na trwałość zmęczeniową elementów konstrukcji są wartości $\Delta\sigma$ zakresu naprężeń nominalnych albo geometrycznych w poszczególnych cyklach naprężeń, czyli różnice pomiędzy wartością maksymalną σ_{\max} i następującą bezpośrednio po niej wartością minimalną σ_{\min} (rys. 2.1.1).



Rys. 2.1.1 Pojedynczy cykl obciążenia

2.1.2 Sposób obliczania wytrzymałości zmęczeniowej

2.1.2.1 Obliczenia uproszczone oparte są na założeniu, że długoterminowy rozkład zakresów naprężeń w analizowanym elemencie konstrukcji ma formę rozkładu Weibulla oraz na zastosowaniu krzywych Wöhlera i hipotezy Palmgren-Minera.

Obliczenia należy wykonać w następującej kolejności:

- obliczyć zakres naprężeń według wymagań 2.2.2÷2.2.9;
- ustalić parametry rozkładu Weibulla według wymagań 2.3;
- dobrać odpowiednią krzywą (wykres) Wöhlera według wymagań 2.4;
- skorygować krzywą Wöhlera według wymagań 2.5;
- sprawdzić spełnienie kryterium wytrzymałości zmęczeniowej – według 2.6.5.

2.1.2.2 W niniejszej Publikacji przyjęto zasadę, że wartości zakresów naprężeń stosowane bezpośrednio w uproszczonych obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba są przekraczane z prawdopodobieństwem 10^{-4} .

2.2 Obliczanie zakresu naprężeń

2.2.1 Zasady ogólne

2.2.1.1 Pęknięcia zmęczeniowe elementów konstrukcji kadłuba najczęściej występują w miejscach lokalnych spiężeń naprężeń we wzdluznych wiązaniach kadłuba, gdzie sumują się chwilowe wartości dynamicznych naprężeń wywołanych przez zginanie ogólne kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej, skręcanie kadłuba oraz zginanie lokalne wskutek oddziaływania ciśnień wody (od zewnątrz kadłuba) oraz ciśnień lub sił bezwładności ładunku lub elementów wyposażenia (od wewnątrz kadłuba).

Przykłady takich miejsc pęknięć zmęczeniowych:

- połączenia spawane wzdluznych usztywnień z wiązarami lub grodziami poprzecznymi;
- nieciągłość (karby) na poszyciu kadłuba lub usztywnieniach (przyspawane nakładki, zakończenia odcinków spoin przerywanych, zmiana grubości poszycia, zmiana szerokości mocnika itp.);
- naroża luków ładunkowych.

2.2.1.2 Pęknięcia zmęczeniowe mogą wystąpić także w poprzecznych wiązaniach kadłuba – np. na krawędziach wycięć w wiązarach lub w rejonach węzłówek.

W wiązaniach poprzecznych występuje z reguły sumowanie się dynamicznych składników naprężeń od ciśnień oddziaływania morza, działających od zewnątrz kadłuba, i od sił bezwładności ładunku, działających od wewnątrz kadłuba.

2.2.1.3 W 2.2.2 ÷ 2.2.7 podano sposób obliczania poszczególnych składników zakresów naprężeń, a w 2.2.9 – sposób obliczania wartości wypadkowego zakresu naprężeń wykorzystywanego bezpośrednio do sprawdzania kryterium wytrzymałości zmęczeniowej – według 2.6.5.

2.2.2 Zakres naprężeń wywołany zginaniem ogólnym kadłuba w płaszczyźnie pionowej

2.2.2.1 Wartość zakresu naprężeń nominalnych w poszyciu, wzdłużnych wiązarach lub usztywnieniach kadłuba, należy obliczać według wzoru:

$$\Delta\sigma_v = k_{pr} \frac{|M_{ww}| + |M_{wu}|}{W_V} k_{wm} \cdot 10^3, \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.2.1)$$

gdzie:

k_{pr} – zdefiniowano w 1.2.2;

M_{ww}, M_{wu} – wartości falowych momentów zginających kadłub w środkowej części statku, w wygięciu i w ugięciu, obliczane według 15.5 Części II – Kadłub, Przepisów, [kNm];

k_{wm} – bezwymiarowy współczynnik określający rozkład momentu falowego wzdłuż statku, określony w 15.5.2.2 Części II – Kadłub, Przepisów;

W_V – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego kadłuba względem poziomej osi obojętnej, $\left(W_V = \frac{I_V}{|z - z_0|} \right)$, [cm³];

I_V – moment bezwładności przekroju poprzecznego kadłuba, [cm⁴];

z_0 – współrzędna osi obojętnej na osi pionowej, [cm];

z – współrzędna punktu w przekroju poprzecznym kadłuba, gdzie obliczane jest $\Delta\sigma_v$, na osi pionowej, [cm].

2.2.2.2 I_V należy obliczać według zasad podanych w 15.7 Części II – Kadłub, Przepisów, dla projektowych grubości elementów konstrukcyjnych, tzn. bez odejmowania naddatków korozyjnych.

2.2.3 Zakres naprężeń wywołany zginaniem ogólnym kadłuba w płaszczyźnie poziomej

2.2.3.1 Wartość zakresu naprężeń nominalnych w poszyciu, wzdłużnych wiązarach lub usztywnieniach poszycia należy obliczać według wzoru:

$$\Delta\sigma_H = 2k_{pr} \frac{M_{wh} k_{wh}}{W_H} \cdot 10^3, \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.3.1)$$

gdzie:

k_{pr} – zdefiniowano w 1.2.2;

M_{wh} – wartości poziomego falowego momentu zginającego w środkowej części statku, obliczane według 15.5.3 Części II – Kadłub, Przepisów, [kNm];

$k_{wh} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{L_0} \right)$ – współczynnik określający rozkład wartości poziomego falowego momentu zginającego wzdłuż kadłuba;

x – współrzędna na osi wzdłużnej statku; $x = 0$ na owręzu, [m];

L_0 – długość obliczeniowa statku, [m];

$W_H = \frac{I_H}{|y|}$ – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego kadłuba względem poziomej osi obojętnej, [cm³];

I_H – moment bezwładności przekroju poprzecznego kadłuba względem pionowej osi obojętnej, [cm⁴];

y – współrzędna punktu w przekroju poprzecznym kadłuba, gdzie obliczane jest $\Delta\sigma_H$, na osi poprzecznej ($y = 0$ w płaszczyźnie symetrii kadłuba), [cm].

2.2.3.2 I_H należy obliczać dla projektowych grubości elementów konstrukcyjnych, tzn. bez odejmowania naddatków korozyjnych. W obliczeniach należy stosować zasady podane w 15.7 Części II – Kadłub, Przepisów.

2.2.4 Obciążenia do obliczania zakresów naprężeń wywołanych zginaniem lokalnym poszycia, usztywnień poszycia lub wiązarów

2.2.4.1 Zasady ogólne

Zginanie lokalne jest skutkiem oddziaływania na poszycie kadłuba ciśnien wody (od zewnątrz) i sił bezwładności ładunku i elementów wyposażenia statku (od wewnątrz).

W 2.2.4 podany jest sposób wyznaczania wartości ciśnien dynamicznych i przyspieszeń kadłuba na fali, wykorzystywanych następnie do obliczenia naprężeń dynamicznych w elementach konstrukcji kadłuba, wywołanych zginaniem lokalnym.

Sposób obliczania wartości naprężeń nominalnych w poszyciu, usztywnieniach i wiązarach, wykorzystywanych następnie wprost lub po zastosowaniu współczynników koncentracji naprężeń (2.2.8) oraz zsumowaniu według zasad podanych w 2.2.9 do oszacowania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji, według wymagań 2.6, podany jest w 2.2.5 ÷ 2.2.7.

2.2.4.2 Zakres dynamicznych ciśnien zewnętrznych

Zakres dynamicznych ciśnien zewnętrznych, definiowanych analogicznie do zakresu naprężeń (2.1.1), obciążających dno kadłuba lub burtę w rejonie dna należy obliczać według wzoru :

$$\Delta p_z = 2 k_{pr} p_{db}, \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.4.2)$$

gdzie:

k_{pr} – zdefiniowano w 1.2.2;

p_{db} – ciśnienie zewnętrzne działające na dno lub burtę statku, obliczane według 16.2.2.1 Części II – Kadłub, Przepisów;

Δp_z na burcie statku, w pobliżu wodnicy pływania, w analizowanym stanie załadowania statku należy obliczać według 2.2.4.3.

2.2.4.3 Zakres dynamicznych ciśnien zewnętrznych na burcie, w pobliżu wodnicy

Burta w rejonie wodnicy pływania jest – wskutek ruchów kadłuba względem powierzchni pofalowanej wody – zwilżana częściowo.

Zakres naprężeń dynamicznych na burcie, w odległości $z > T_1 - T_d$ od płaszczyzny podstawowej (rys. 2.2.4.3), należy obliczać według wzoru:

$$\Delta p_z = 2k_{pr} k_d p_{db}, \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.4.3-1)$$

gdzie:

k_{pr} – zdefiniowano w 1.2.2;

k_d – współczynnik o wartościach pokazanych na rys. 2.2.4.3;

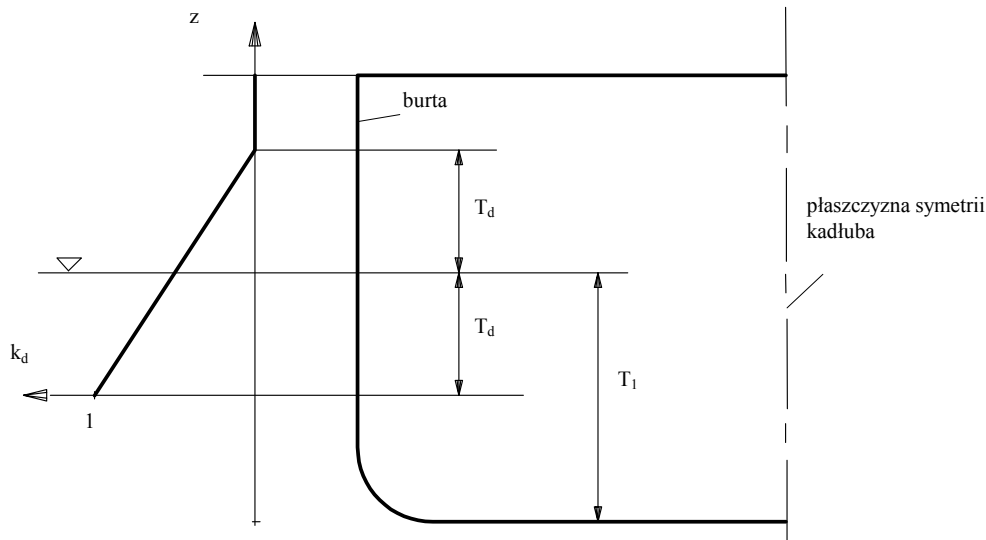
p_{db} – ciśnienie dynamiczne na burcie kadłuba ($z > T_1 - T_d$), obliczane według 16.2.2.1 ÷ 16.2.2.3 Części II – Kadłub, Przepisów, dla aktualnego zanurzenia statku $T = T_1$ w rozpatrywanym stanie załadowania, [kPa].

T_d oznacza wartość amplitudy przemieszczeń dynamicznych poziomu wody względem wodnicy w rozpatrywanym stanie załadowania, przekraczaną z prawdopodobieństwem 10^{-4} . T_d należy obliczać według wzoru :

$$T_d = \frac{k_{pr} p_{db}^*}{\rho g}, \quad [\text{m}] \quad (2.2.4.3-2)$$

k_{pr}, ρ, g – zdefiniowano w 1.2.2;

$p_{db}^* = p_{db}(z = T_1)$ – ciśnienie dynamiczne na poziomie wodnicy, obliczane dla $T = T_1$ według 16.2.2.1 Części II – Kadłub, Przepisów;



Rys. 2.2.4.3 Wartości współczynnika k_d

Poniżej poziomu $z = T_1 - T_d$ (rys. 2.2.4.3) Δp_z należy obliczać według 2.2.4.2.

2.2.4.4 Zakres ciśnień dynamicznych wywołanych oddziaływaniem ładunku płynnego lub balastu

Zakres Δp_w ciśnień dynamicznych działających na ścianę boczną lub dno zbiornika ładunku płynnego lub balastu należy przyjąć jako wielkość maksymalną z następujących trzech wartości:

$$\Delta p_L = 2 k_{pr} \rho a_L l, \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.4.4-1)$$

$$\Delta p_T = 2 k_{pr} \rho a_T b, \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.4.4-2)$$

$$\Delta p_V = 2 k_{pr} \rho a_v h, \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.4.4-3)$$

gdzie:

k_{pr} – zdefiniowano w 1.2.2;

ξ – współczynnik rozkładu Weibulla, obliczany według 2.3.3;

ρ – gęstość ładunku ciekłego lub balastu, $[\text{t/m}^3]$, (dla balastu należy przyjąć $1,025 \text{ t/m}^3$);

a_L, a_T, a_v – przyspieszenia wzdłużne, poprzeczne i pionowe w środku geometrycznym przestrzeni ograniczonej dnem, szczytem, ścianami bocznymi oraz najbliższymi grodziami przelewowymi (poprzecznymi lub wzdłużnymi) albo ścianami zbiornika w przypadku braku grodzi przelewowych, $[\text{m/s}^2]$.

Wartości a_L, a_T, a_v należy obliczać według 17.4 Części II – Kadłub, Przepisów;

l – połowa długości przestrzeni zdefiniowanej wyżej, $[\text{m}]$;

b – połowa szerokości przestrzeni zdefiniowanej wyżej, $[\text{m}]$;

h – odległość w pionie od punktu, gdzie wyznaczone są zakresy ciśnień, do poziomu powierzchni cieczy, $[\text{m}]$.

W sytuacji gdy wyznaczany jest wypadkowy zakres ciśnień na wspólnej ścianie sąsiadujących zbiorników, wielkości Δp_L i Δp_T , wyznaczone osobno dla każdego ze zbiorników, należy zsumować, a wielkość Δp_V – odjąć.

2.2.4.5 Zakres ciśnień dynamicznych wywołanych oddziaływaniem ładunku masowego

Zakres ciśnień dynamicznych wywołanych oddziaływaniem ładunku masowego na dno lub ściany ładowni masowców lub rudowców należy przyjąć w następującej formie:

$$\Delta p_w = 2 k_{pr} \rho a_v h K, \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.4.5)$$

gdzie:

k_{pr} – jak w 2.2.2.1;

ρ – gęstość ładunku masowego, $[\text{t}]$;

a_v – przyspieszenie pionowe, obliczane według 17.4.1 Części II – Kadłub, Przepisów, $[\text{m/s}^2]$;

- h – odległość w pionie do powierzchni ładunku w ładowni, [m]. Można przyjąć, że powierzchnia ładunku jest płaszczyzną równoległą do płaszczyzny podstawowej kadłuba;
 K – współczynnik określany według 16.4.2.1 Części II – Kadłub, Przepisów.

2.2.4.6 Obciążenia dynamiczne wywołane oddziaływaniem jednostkowych sztuk ładunku lub elementów wyposażenia statku

Składowe siły oddziaływania na konstrukcję kadłuba jednostkowych sztuk ładunku lub wyposażenia, służące następnie do wyznaczenia zakresów naprężeń w poszyciu, usztywnieniach lub wiązarach, należy obliczać według wzorów:

- siła pionowa:

$$\Delta P_V = 2 k_{pr} a_v M, \quad [\text{kN}] \quad (2.2.4.6-1)$$

- siła poprzeczna:

$$\Delta P_T = 2 k_{pr} a_T M, \quad [\text{kN}] \quad (2.2.4.6-2)$$

- siła wzdłużna:

$$\Delta P_L = 2 k_{pr} a_L M, \quad [\text{kN}] \quad (2.2.4.6-3)$$

gdzie:

k_{pr} – zdefiniowano w 1.2.2;

a_v, a_T, a_L – przyspieszenia pionowe, poprzeczne i wzdłużne w środku ciężkości sztuki ładunku lub elementu wyposażenia, obliczane według 17.4 Części II – Kadłub, Przepisów, [m/s^2];

M – masa sztuki ładunku lub elementu wyposażenia, [t].

2.2.5 Zakres naprężeń wywołanych zginaniem lokalnym poszycia

2.2.5.1 Wartości zakresów nominalnych naprężeń normalnych w płytach poszycia, w rejonach połączeń spawanych, niezbędne do oceny wytrzymałości zmęczeniowej tych połączeń, należy obliczać według wymagań 2.2.5.2 i 2.2.5.3.

Sposób sumowania tych zakresów naprężeń z innymi składowymi podany jest w 2.2.9.

2.2.5.2 Maksymalne wartości wypadkowych zakresów naprężeń lokalnych w środkach boków prostokątnego konturu płyty o wydłużeniu $l/s > 2$, obciążonej równomiernie na całej powierzchni (l, s – długości dłuższego i krótszego boku płyty, [m]), należy obliczać według wzorów:

- w środku dłuższego boku płyty:

$$\Delta \sigma_l = 500 \Delta p_R \left(\frac{s}{t} \right)^2, \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.5.2-1)$$

- w środku krótszego boku płyty:

$$\Delta \sigma_l = 309 \Delta p_R \left(\frac{s}{t} \right)^2, \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.5.2-2)$$

gdzie:

Δp_R – wypadkowy zakres ciśnień obliczany według 2.2.9.2, [kPa];

t – grubość płyty, [mm]. Jest to projektowa grubość płyty, z wyjątkiem przypadków gdy płyty mogą być poddane bezpośrednio korozyjnemu działaniu wody morskiej – wówczas wartość t należy przyjmować według 2.6.4.

2.2.5.3 W przypadkach gdy $l/s \leq 2$ lub gdy płyta nie może być uznana za utwierdzoną na obwodzie, w miejsce wzorów z 2.2.5.2 należy zastosować wprost rozwiązania wynikające z teorii zginania płyt sztywnych, podawane w literaturze.

2.2.6 Zakres naprężeń wywołanych zginaniem lokalnym usztywnień

2.2.6.1 Zasady ogólne

Wartości zakresów nominalnych naprężeń normalnych w mocnikach usztywnień wywołanych zginaniem lokalnym są niezbędne do oceny trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych usztywnień z wiązarami, grodziami, z innymi usztywnieniami oraz w miejscach zaburzeń ciągłości mocników (np. przyspawana nakładka, zmiana szerokości lub grubości mocnika itp.).

W zależności od typu stosowanego w obliczeniach wykresu Wöhlera oraz konstrukcji samego usztywnienia (profil symetryczny lub asymetryczny) może być wymagane mnożenie wartości naprężeń nominalnych przez wartości współczynników koncentracji naprężeń wyznaczonych według wymagań 2.2.8 lub 4.2, a następnie sumowanie z naprężeniami od zginania ogólnego lub skręcania kadłuba oraz zginania wiązarów – według wymagań 2.2.9.

W obliczeniach zakresów naprężeń według zasad podanych w 2.2.6 stosowany jest belkowy model usztywnienia wraz z pasem współpracującym poszycia.

2.2.6.2 Sposób obliczania naprężeń

W obliczeniach momentu zginającego w usztywnieniach należy uwzględnić współdziałanie analizowanego przęsła z przęsłami sąsiadującymi.

Obliczeniową rozpiętość usztywnień należy ustalić według 3.2.1 Części II – Kadłub, Przepisów.

Szerokość pasa współpracującego, uwzględnianego przy obliczaniu wskaźnika przekroju usztywnienia, należy ustalić według 2.2.6.3.

Wskaźnik przekroju usztywnienia należy obliczać dla projektowych wymiarów przekroju poprzecznego albo wymiarów projektowych pomniejszonych o nadatki korozyjne – według zasad podanych w 2.6.4.

2.2.6.3 Szerokość pasa współpracującego poszycia

W przypadku wzdłużnych usztywnień poszycia obciążonych ciśnieniem oddziaływania wody zaburtowej, ładunku płynnego lub masowego albo balastu wodnego szerokość s_e , [m], pasa współpracującego poszycia należy wyznaczać w następujący sposób:

w środku przęsła:

$$- \text{ dla } \frac{l}{s} < 2,5: \quad \frac{s_e}{s} = 0,27 + 0,23 \frac{l}{s} \quad (2.2.6.3-1)$$

$$- \text{ dla } 2,5 \leq \frac{l}{s} \leq 3,5: \quad \frac{s_e}{s} = 0,73 + 0,05 \frac{l}{s} \quad (2.2.6.3-2)$$

$$- \text{ dla } \frac{l}{s} > 3,5: \quad \frac{s_e}{s} = 0,90 \quad (2.2.6.3-3)$$

na końcach przęsła, tzn. w rejonach połączeń usztywnienia z wiązarami lub grodziami poprzecznymi:

$$- \text{ dla } \frac{l}{s} \leq 2,5: \quad \frac{s_e}{s} = 0,47 + 0,13 \frac{l}{s} \quad (2.2.6.3-4)$$

$$- \text{ dla } \frac{l}{s} > 2,5: \quad \frac{s_e}{s} = 0,80 \quad (2.2.6.3-5)$$

W powyższych wzorach l oznacza rozpiętość usztywnienia, [m], (ustalaną według 3.2.1 Części II – Kadłub, Przepisów), a s – odstęp usztywnień, [m].

W innych przypadkach wartość pasa współpracującego poszycia należy ustalać według 3.2.2 Części II – Kadłub, Przepisów.

2.2.6.4 Zginanie wzdłużnych usztywnień poszycia

Zakres naprężeń nominalnych wywołanych lokalnym zginaniem usztywnienia ciśnieniem wody zaburtowej i ciśnieniem balastu lub ładunku płynnego (od wewnątrz) należy obliczać według 2.2.6.5.

Dla przęseł usztywnień leżących w bezpośrednim sąsiedztwie grodzi poprzecznych do zakresów naprężeń obliczonych według 2.2.6.5 należy dodać algebraicznie zakresy naprężeń wynikające z ugięć wiązarów podpierających te usztywnienia

– według 2.2.6.6.

2.2.6.5 Modelem usztywnienia jest belka pryzmatyczna o długości l , [m], utwierdzona na końcach, obciążona stałym wzdłuż belki ciśnieniem p , [kPa].

Moment zginający w usztywnieniu zmienia się według zależności parabolicznej wzdłuż przęsła, przyjmując następujące wartości:

– na końcach przęsła:

$$M_1 = \frac{psl^2}{12}, \quad [\text{kNm}] \quad (2.2.6.5-1)$$

– w środku przęsła:

$$M_2 = \frac{psl^2}{24}, \quad [\text{kNm}] \quad (2.2.6.5-2)$$

gdzie:

s – odstęp usztywnień, [m].

Zakres naprężeń należy obliczać według wzoru:

$$\Delta\sigma = 10^3 \frac{\Delta M}{W}, \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.6.5-3)$$

gdzie:

ΔM – wartość M_1 albo M_2 obliczona według wzoru 2.2.6.5-1 albo 2.2.6.5-2, podstawiając $p = \Delta p_R$, [kPa];

Δp_R – wypadkowy zakres ciśnień obliczony według 2.2.9.2 dla wartości zakresów ciśnień zewnętrznych i wewnętrznych, obliczonych według 2.2.4.2 ÷ 2.2.4.4, [kPa];

W – wskaźnik przekroju poprzecznego usztywnienia wraz z pasem współpracującym poszycia, [cm³].

2.2.6.6 Momenty zginające w końcowych przekrojach przęsła usztywnienia o rozpiętości l , [m], leżącego w bezpośrednim sąsiedztwie grodzi poprzecznej, wywoływane ugięciem o wartości f , [mm], wiązara podpierającego usztywnienie, przybierają w końcowych przekrojach przęsła wartości o przeciwnych znakach, ale o tej samej wartości bezwzględnej:

$$M = 10^{-8} \frac{6EI}{l^2} f, \quad [\text{kNm}] \quad (2.2.6.6)$$

gdzie:

E – moduł Younga, [MPa];

I – moment bezwładności usztywnienia wraz z pasem współpracującym poszycia, [cm⁴];

l – rozpiętość usztywnienia, [m].

Moment zginający zmienia się wzdłuż przęsła liniowo.

Zakres naprężeń $\Delta\sigma$ należy obliczać według wzoru 2.2.6.5-3 dla ΔM obliczonego ze wzoru 2.2.6.6, gdzie należy podstawić f obliczone dla wypadkowego zakresu ciśnień Δp_R . Δp_R należy wyznaczać według 2.2.9.2 dla wartości zakresów ciśnień zewnętrznych i wewnętrznych obliczonych według 2.2.4.2 ÷ 2.2.4.4.

Obliczając f należy stosować zasady modelowania układów wiązarów kadłuba różnych typów statków, podane w Publikacjach PRS, takich np. jak:

- Publikacja Nr 18/P – Analiza strefowej wytrzymałości kadłuba masowca;
- Publikacja Nr 19/P – Analiza strefowej wytrzymałości kadłuba zbiornikowca;
- Publikacja Nr 24/P – Analiza wytrzymałości kadłuba kontenerowca.

Obciążenie Δp_R traktowane jako ciśnienie obliczeniowe wiązarów powinno być przyłożone od zewnątrz kadłuba, jeśli $\Delta p_z > \Delta p_w$ (patrz 2.2.4.2 ÷ 2.2.4.5), natomiast od wewnątrz kadłuba, jeśli $\Delta p_z < \Delta p_w$.

2.2.7 Zakres naprężeń wywołanych zginaniem wiązarów

2.2.7.1 Zasady ogólne

Wartości zakresów naprężeń wywołanych zginaniem wiązarów są potrzebne do oceny wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych z innymi wiązarami (np. połączenia węzłowe), rejonów karbów na mocnikach (np. zmiana grubości mocnika) oraz krawędzi wycięć w środnikach.

Obliczenia wiązarów dostarczają również wartości zakresów naprężeń w usztywnieniach poszycia usytuowanych równolegle do wiązarów, leżących w obrębie pasa współpracującego.

2.2.7.2 Sposób obliczania naprężeń

Zakresy naprężeń w rejonach zagrożonych pęknięciami zmęczeniowymi można wyznaczać stosując modelowanie układów wiązarów w formie ram przestrzennych lub rusztów według zasad podanych w Publikacjach PRS, dotyczących analizy wytrzymałości kadłubów różnych typów statków (ważniejsze Publikacje wymieniono w 2.2.6). Następnie można wykorzystać współczynniki koncentracji naprężeń podane w 2.2.8 albo wykonać obliczenia trwałości zmęczeniowej na podstawie zakresów naprężeń nominalnych – stosując odpowiedni wykres Wöhlera, dobrany według zasad podanych w 2.4.

2.2.8 Współczynniki koncentracji naprężeń

2.2.8.1 Zasady ogólne

Współczynniki koncentracji naprężeń wyznaczone według wymagań 2.2.8 należy mnożyć przez składowe zakresy naprężeń nominalnych, wyznaczanych według zasad podanych w 2.2.2 ÷ 2.2.7, a następnie zsumować otrzymane wartości według wymagań 2.2.9, aby otrzymać wypadkowy zakres naprężeń geometrycznych. Wyznaczając składowe zakresy naprężeń nominalnych należy uwzględnić wpływ kształtu i wymiarów głównych elementów konstrukcji na naprężenia w elementach konstrukcyjnych podlegających sprawdzeniu według kryteriów wytrzymałości zmęczeniowej. Na przykład należy uwzględnić wpływ stosunkowo dużych otworów w poszyciu burty lub pokładu na naprężenia we wzdlużnych usztywnieniach poszycia leżących w pobliżu tych otworów.

Wypadkowe zakresy naprężeń geometrycznych są stosowane wraz z krzywą Wöhlera typu „D” (p. 2.4) do obliczania wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych – według wymagań 2.6.

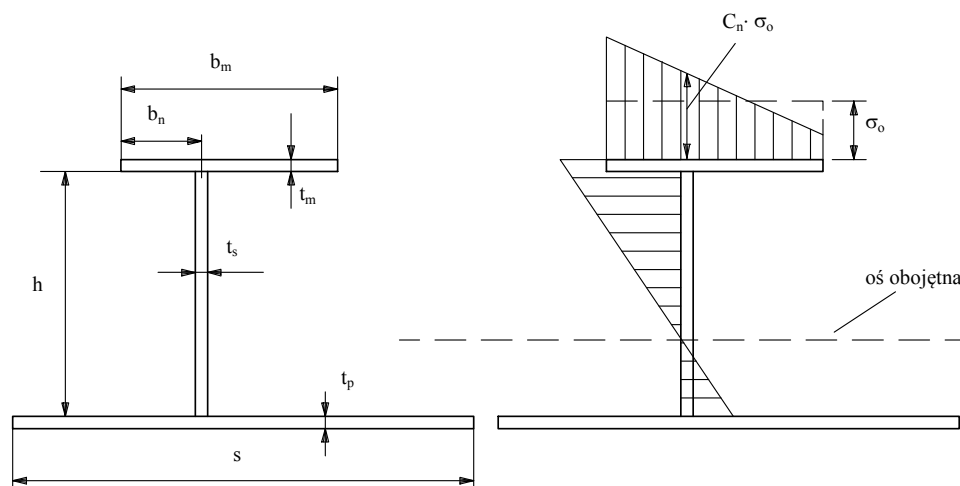
Wytrzymałość zmęczeniowa prostych elementów konstrukcyjnych może być sprawdzana z bezpośrednim zastosowaniem zakresów naprężeń nominalnych – po wybraniu odpowiedniej krzywej Wöhlera, według zasad podanych w 2.4.

W przypadku sprawdzania wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, dla których w 2.2.8.3 i 2.2.8.4 nie podano wartości współczynników koncentracji naprężeń, lub w sytuacji gdy wykonywana jest kompleksowa analiza MES konstrukcji kadłuba, zakresy naprężeń geometrycznych należy obliczać bezpośrednio – według zasad podanych w 4.2.

2.2.8.2 Współczynniki koncentracji naprężeń w mocnikach profili o niesymetrycznym przekroju

Zginanie usztywnień/wiązarów o asymetrycznie względem środka usytuowanym mocniku i z symetrycznym pasem współpracującym poszycia wywołuje nierównomierny rozkład naprężeń normalnych w mocniku (rys. 2.2.8.2).

Efekt ten należy np. uwzględnić w obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych mocników z węzłówkami na końcach przeseł usztywnień/wiązarów, z nakładkami itp.



Rys. 2.2.8.2 Wymiary usztywnienia i rozkład naprężeń normalnych przy zginaniu

Wartości C_n współczynnika koncentracji naprężeń (w płaszczyźnie środka) zdefiniowano na rys. 2.2.8.2, gdzie σ_o wartość naprężeń normalnych w mocniku przy zginaniu, obliczonych dla mocnika usytuowanego symetrycznie.

Przybliżone wartości C_n można obliczać według wzorów :

$$- \text{ dla } 0 \leq \frac{b_n}{b_m} \leq 0,3 : \quad C_n = \left(2,32 - 3,33 \frac{b_n}{b_m} \right) C_k \quad (2.2.8.2-1)$$

$$- \text{ dla } 0,3 < \frac{b_n}{b_m} \leq 0,5 : \quad C_n = \left[1 + 8,5 \left(\frac{b_n}{b_m} - 0,5 \right)^2 \right] C_k \quad (2.2.8.2-2)$$

gdzie:

C_k – współczynnik obliczany według wzoru:

$$C_k = 1 + \ln \left(\frac{b_m t_m}{h t_s} \right) \left(0,5 - \frac{b_n}{b_m} \right)^2 \quad (2.2.8.2-3)$$

Wymiary wielkości występujących we wzorach 2.2.8.2-1 ÷ 2.2.8.2-3 należy przyjmować w milimetrach. Ich znaczenie pokazano na rys. 2.2.8.2.

Współczynniki C_n , obliczane według wzorów 2.2.8.2-1 ÷ 2.2.8.2-3, można stosować w analizie wytrzymałości zmęczeniowej wzdłużnych usztywnień poszycia obciążonych ciśnieniem wody zaburtowej (od zewnątrz kadłuba) lub ciśnieniem ładunku płynnego albo masowego, albo balastu wodnego – od wewnątrz.

W innych sytuacjach wartości C_n należy obliczać bezpośrednio, wykonując obliczenia MES według zasad podanych w 4.2.

Obliczenia MES można także wykonać dla wzdłużnych usztywnień poszycia i tak obliczone C_n zastosować w miejsce obliczanych według wzorów 2.2.8.2-1 ÷ 2.2.8.2-3.

2.2.8.3 Współczynniki koncentracji naprężeń dla połączeń węzłkowych usztywnień i wiązarów

Wartości $\Delta\sigma_n$ zakresów naprężeń nominalnych w mocnikach usztywnień/wiązarów wywoływanych ich zginaniem lokalnym lub rozciąganiem/ściskaniem są mnożone przez wartości C_w współczynników koncentracji naprężeń podane w niniejszym punkcie. Dla usztywnień/wiązarów z niesymetrycznym mocnikiem obowiązuje dodatkowo mnożenie przez współczynnik koncentracji naprężeń $C_n > 1$ wyznaczony według 2.2.8.2 ($C_n = 1$ gdy mocnik jest symetryczny). Jeżeli w rejonie potencjalnych pęknięć zmęczeniowych (patrz tab. 2.2.8.3) występuje dodatkowo przesunięcie poprzeczne, to należy dodatkowo zastosować mnożenie przez współczynnik koncentracji naprężeń C_e , wyznaczony według 2.5.5. $C_e = 1$ gdy nie uwzględniamy przesunięcia poprzecznego elementów.

Całkowity współczynnik koncentracji należy obliczać według wzoru:

$$C = C_n C_w C_e \quad (2.2.8.3-1)$$

Iloczyn $C\Delta\sigma_n$ wyznaczone dla różnych składowych naprężeń, zsumowane według wymagań 2.2.9, stanowią zakres naprężeń geometrycznych stosowanych bezpośrednio w obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej – według 2.6.

Współczynniki C_w mogą przyjmować różne wartości w przypadku zginania i rozciągania. Wartości $\Delta\sigma_n$ należy obliczać w miejscu potencjalnych pęknięć zmęczeniowych, które pokazano w tabeli 2.2.8.3. Wartość $\Delta\sigma_n$ od zginania lokalnego należy obliczać według wzoru:

$$\Delta\sigma_n = \frac{\Delta M}{W} \cdot 10^3, \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.8.3-2)$$

gdzie:

ΔM – zakres momentu zginającego, [kNm];

W – wskaźnik wytrzymałości przekroju usztywnienia względem górnej powierzchni mocnika, obliczany z uwzględnieniem pasa współpracującego poszycia o szerokości obliczanej według wzorów 2.2.6.3-4, 2.2.6.3-5, [cm³].

Zakres momentu zginającego należy obliczać według wzorów:

- dla punktów A pokazanych w tabeli 2.2.8.3:

$$\Delta M = \frac{\Delta p_R s l^2}{12}, \quad [\text{kNm}] \quad (2.2.8.3-3)$$

- dla punktów B pokazanych w tabeli 2.2.8.3:

$$\Delta M = \frac{\Delta p_R s l^2}{12} - \frac{1}{2} \Delta p_R s l u + \frac{1}{2} \Delta p_R s u^2, \quad [\text{kNm}] \quad (2.2.8.3-4)$$

gdzie:

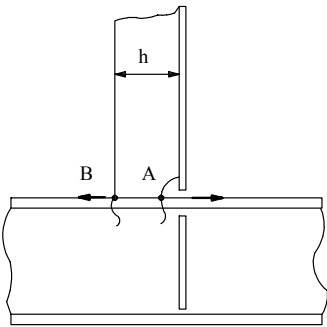
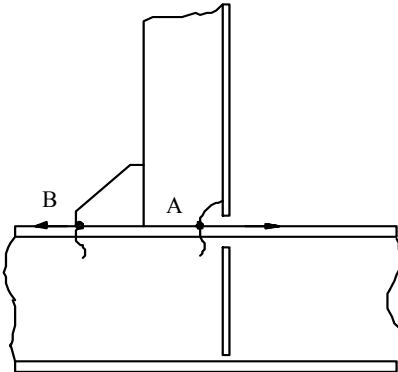
- Δp_R – wypadkowy zakres ciśnienia obciążającego poszycie, [kPa], obliczony według 2.2.9.2;
- s – odstęp usztywnień, [m];
- l – odległość wiązarów poprzecznych podpierających usztywnienie albo odległość wiązara i grodzi, [m];
- u – odległość punktów B (tabela 2.2.8.3) od środka wiązara, [m].

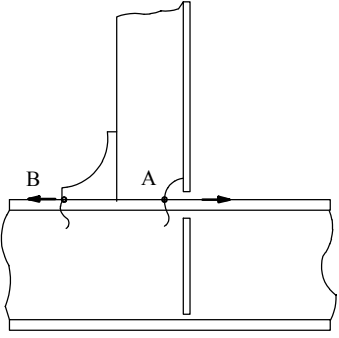
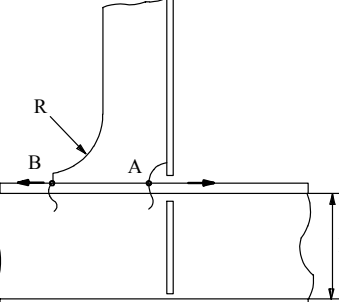
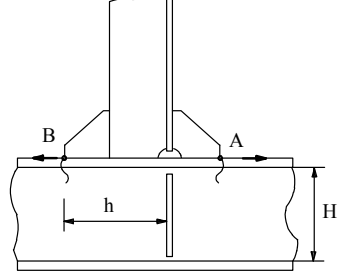
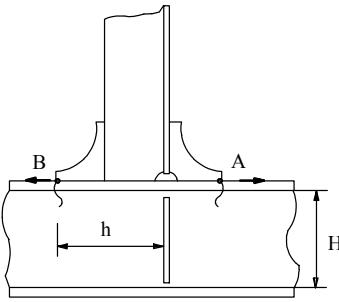
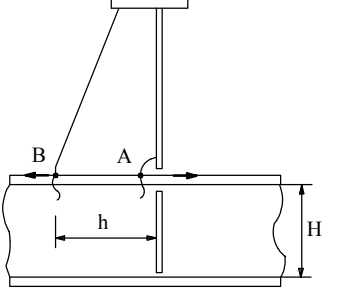
Wartości współczynników C_w podane w tabeli 2.2.8.3 mogą być stosowane do typowych wymiarów i proporcji wymiarowych pasa poszycia, średnika i mocnika usztywnienia (albo wiązara), usztywnienia średnika wiązara poprzecznego lub grodzi poprzecznej oraz węzłówek łączących to usztywnienie z mocnikiem usztywnienia poszycia (albo wiązara).

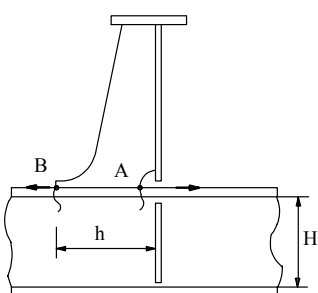
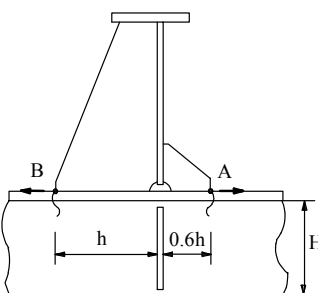
Zalecane jest jednak bezpośrednie obliczanie naprężeń geometrycznych w miejscach potencjalnych pęknięć zmęczeniowych według wymagań 4.2. Zastosowanie takiej metody pozwala bowiem na zaprojektowanie konstrukcji lepszych pod względem wskaźników ekonomicznych.

Wykonanie obliczeń według powyższej metody będzie wymagane przez PRS odnośnie połączeń, których nie ma w tabeli 2.2.8.3 oraz połączeń podobnych do pokazanych w tej tabeli, ale o wymiarach i proporcjach wymiarowych uznanych za nietypowe.

Tabela 2.2.8.3
Wartości współczynników koncentracji naprężeń C_w

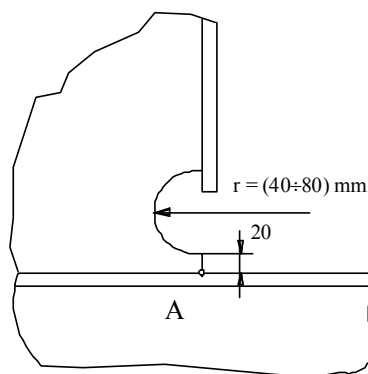
Nr	Rodzaj połączenia	C_w																																
		Rozciąganie (ściskanie)		Uwagi																														
1	2	3		4	5																													
1		<table border="1"> <thead> <tr> <th>h</th> <th colspan="2">C_w</th> </tr> <tr> <th>[mm]</th> <th>p. A</th> <th>p. B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>1,33</td> <td>1,22</td> </tr> <tr> <td>140</td> <td>1,38</td> <td>1,28</td> </tr> <tr> <td>180</td> <td>1,43</td> <td>1,33</td> </tr> <tr> <td>220</td> <td>1,46</td> <td>1,37</td> </tr> </tbody> </table>	h	C_w		[mm]	p. A	p. B	100	1,33	1,22	140	1,38	1,28	180	1,43	1,33	220	1,46	1,37	<table border="1"> <thead> <tr> <th>h</th> <th colspan="2">C_w</th> </tr> <tr> <th>[mm]</th> <th>p. A</th> <th>p. B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>2,07</td> <td>1,04</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>2,18</td> <td>1,36</td> </tr> </tbody> </table>	h	C_w		[mm]	p. A	p. B	100	2,07	1,04	200	2,18	1,36	(1), (2)
h	C_w																																	
[mm]	p. A	p. B																																
100	1,33	1,22																																
140	1,38	1,28																																
180	1,43	1,33																																
220	1,46	1,37																																
h	C_w																																	
[mm]	p. A	p. B																																
100	2,07	1,04																																
200	2,18	1,36																																
2		<p>p. A: $C_w = 1,72$ p. B: $C_w = 1,60$</p>	<p>p. A: $C_w = 2,20$ p. B: $C_w = 1,75$</p>	(1), (2)																														

1	2	3	4	5
3		<p>p. A: $C_W = 1,65$ p. B: $C_W = 1,50$</p>	<p>p. A: $C_W = 2,20$ p. B: $C_W = 1,60$</p>	<p>(1), (2)</p>
4		<p>p. A: $C_W = 1,60$ p. B: $C_W = 1,45$</p>	<p>p. A: $C_W = 2,15$ p. B: $C_W = 1,50$</p>	<p>Wartości C_W obowiązują dla $R \geq 0,5H$</p> <p>(1), (2)</p>
5		<p>p. A: $C_W = 1,78$ p. B: $C_W = 1,78$</p>	<p>p. A: $C_W = 2,75$ p. B: $C_W = 2,65$</p>	<p>Wartości C_W obowiązują dla $0,75 \leq \frac{h}{H} \leq 1,0$</p> <p>(1)</p>
6		<p>p. A: $C_W = 1,52$ p. B: $C_W = 1,52$</p>	<p>p. A: $C_W = 1,50$ p. B: $C_W = 1,75$</p>	<p>Wartości C_W obowiązują dla $0,75 \leq \frac{h}{H} \leq 1,0$</p> <p>(1)</p>
7		<p>p. A: $C_W = 1,67$ p. B: $C_W = 1,61$</p>	<p>p. A: $C_W = 2,20$ p. B: $C_W = 1,66$</p>	<p>Wartości C_W obowiązują dla $0,5 \leq \frac{h}{H} \leq 1,0$</p> <p>(1), (2)</p>

1	2	3	4	5
8		p. A: $C_w = 1,54$ p. B: $C_w = 1,46$	p. A: $C_w = 2,10$ p. B: $C_w = 1,50$	Wartości C_w obowiązują dla $0,5 \leq \frac{h}{H} \leq 1,0$ (1), (2)
9		p. A: $C_w = 1,80$ p. B: $C_w = 1,80$	p. A: $C_w = 2,70$ p. B: $C_w = 2,70$	Wartości C_w obowiązują dla $0,5 \leq \frac{h}{H} \leq 1,0$ (1)

Uwagi do tabeli 2.2.8.3:

- (1) Wartości C_w podane w tabeli są przybliżone i dotyczą typowych wymiarów i proporcji wymiarowych wzdłużnych usztywnień poszycia i ich połączeń z wiązarami poprzecznymi lub grodziami.
- (2) Jeżeli w połączeniach o numerach 1, 2, 3, 4, 7 i 8 w rejonie punktu A zastosowane będzie wycięcie (skalops) o specjalnym kształcie, pokazanym na rys. 2.2.8.3, to podane w tabeli wartości C_w dla rozciągania (ściskania) należy zmienić następująco:
- w rejonie punktu A zmniejszyć o 5%,
 - w rejonie punktu B zmniejszyć o 2%.
- Wartości C_w dla zginania lokalnego pozostają bez zmian.

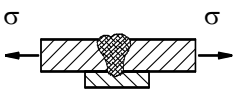
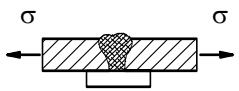
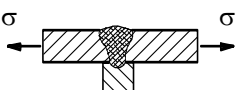
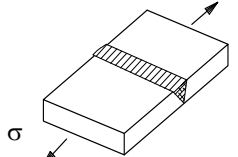
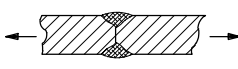
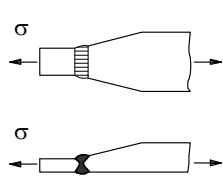
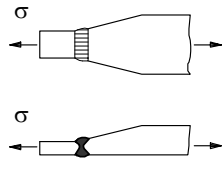
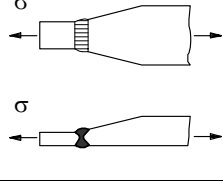
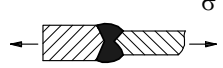


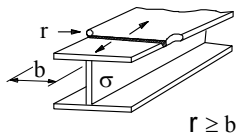
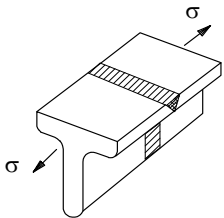
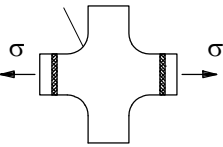
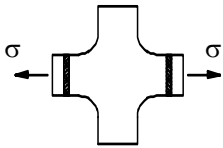
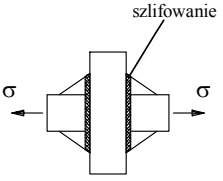
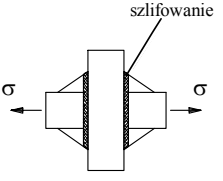
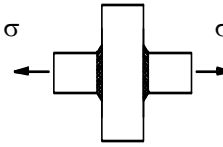
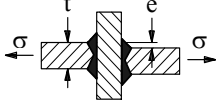
Rys. 2.2.8.3

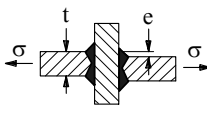
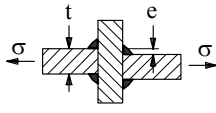
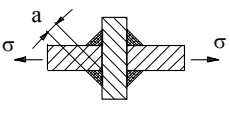
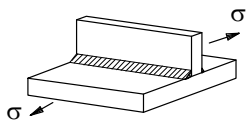
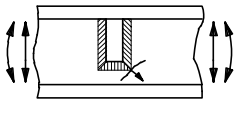
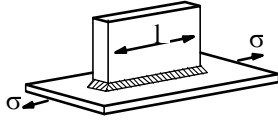
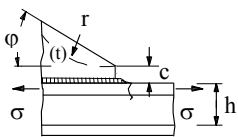
2.2.8.4 Współczynniki koncentracji naprężeń dla typowych elementów spawanych konstrukcji kadłubów okrętowych

W tabeli 2.2.8.4 przedstawiono wartości współczynników koncentracji naprężeń C_d , zaadaptowanych do warunków dynamicznych obciążeń kadłuba statku od morza z opracowań IIW. Wartości zakresów nominalnych naprężeń pokazanych w tabeli 2.2.8.4 należy pomnożyć przez wartości C_d , a następnie dokonać obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej według 2.6. Dla mocników niesymetrycznych usztywnień/wiązarów zginanych należy dodatkowo zastosować mnożenie przez współczynnik C_n , wyznaczony według wymagań 2.2.8.2 (jeżeli σ zostało obliczone jak dla belki o mocniku symetrycznym).

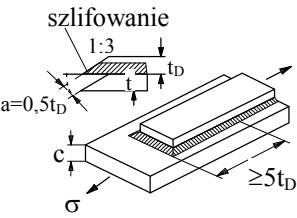
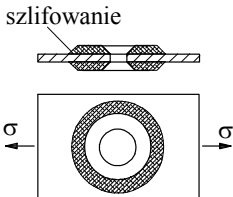
Tabela 2.2.8.4
Współczynniki koncentracji naprężeń typowych elementów spawanych
konstrukcji kadłubów okrętowych

Nr	Element	Opis i uwagi dotyczące naprężeń	C_d
A POŁĄCZENIA DOCZOŁOWE OBCIĄŻONE W KIERUNKU POPRZECZNYM DO SPOIN			
1		Złącze doczołowe na podkładce stalowej nie usuniętej po spawaniu	1,24
2		Złącze doczołowe na podkładce ceramicznej	1,10
3		Połączenie trzech płyt	1,24
4		Złącze doczołowe spawane jednostronnie z pełnym przetopem bez podkładki: – grąń sprawdzana przez NDT ⁽¹⁾ → – bez sprawdzania grani →	1,24 1,95
5		Złącze doczołowe z niepełnym przetopem. Naprężenia należy obliczać dla faktycznego przekroju spoin – bez uwzględniania nadlewów spoin. Uwaga: wynik obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej zaleca się zweryfikować metodami mechaniki pęknięcia.	1,95
6		Złącze doczołowe, nadlewy spoin szlifowane na płasko, spoina sprawdzana przez NDT, zmiana grubości i szerokości z pochyleniem: 1 : 5 → 1 : 3 → 1 : 2 →	0,70 0,88 1,10
7		Złącze doczołowe wykonane na prefabrykacji, w pozycji podłonej, kontrolowany kształt nadlewów spoin, spoina sprawdzana przez NDT, zmiana grubości i szerokości z pochyleniem: 1 : 5 → 1 : 3 → 1 : 2 →	0,88 0,98 1,10
8		Złącze doczołowe, spoina sprawdzana przez NDT. Zmiana grubości i szerokości z pochyleniem: 1 : 5 → 1 : 3 → 1 : 2 →	1,10 1,24 1,39
9		Złącze doczołowe blach o różnych grubościach, ustawionych równolegle, bez przesunięcia osi. Uwaga: w sytuacjach gdy kształt lica spoiny jest równoważny ukosowaniu boków płyty można zastosować odpowiednie C_d według nr 7.	1,24

Nr	Element	Opis i uwagi dotyczące naprężeń	C_d
10		Złącze doczołowe mocnika w belce prefabrykowanej, zeszlifowany nadlew spoiny, wykonany promień przejścia poprzez szlifowanie, spoina sprawdzana przez badania nieniszczące.	0,78
11		Złącze doczołowe kształtownika walcowanego (z wyjątkiem płaskownika), nadlewy spoin zeszlifowane do grubości pręta, spoina sprawdzana przez NDT.	1,10
12	<p>krawędzie szlifowane</p> 	Złącze doczołowe, spoiny zeszlifowane na płasko, zeszlifowane zakończenia spoin i krawędzie płyt. Zastosowano NDT. Płynna zmiana kształtu w formie płyty diamentowej.	0,70
13		Złącze doczołowe wykonane na prefabrykacji w pozycji podolnej, kontrolowany kształt nadlewu spoiny, spoina sprawdzona przez NDT. Płynna zmiana kształtu w formie płyty diamentowej.	0,88
14		Złącze doczołowe, spoiny zeszlifowane na płasko i sprawdzone przez NDT. Zastosowane trójkątne węzłówki na krawędziach mocników, końce spoin węzłówek zeszlifowane. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego spoiny doczołowej.	1,10
15		Złącze doczołowe, spoiny sprawdzone przez NDT. Zastosowano trójkątne węzłówki na krawędziach mocników, końce spoin węzłówek zeszlifowane. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego w spoinie doczołowej.	1,24
16		Złącze doczołowe krzyżujących się mocników. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego w spoinie.	1,75
B POŁĄCZENIA KRZYŻOWE I TEOWE			
17		Złącze krzyżowe albo teowe, spoiny czołowe z pełnym przetopem (typu K), blachy odporne na rozwarstwienie, przesunięcie osi $e < 0,15 t$, powierzchnie spoin zeszlifowane. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni spoiny.	1,10

Nr	Element	Opis i uwagi dotyczące naprężeń	C_d
18		Złącze krzyżowe albo teowe, spoiny czołowe z pełnym przetopem (typu K), blachy odporne na rozwarstwienie, przesunięcie osi $e < 0,15 t$. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni spoiny.	1,24
19		Złącze krzyżowe albo teowe, spoiny pachwinowe, blachy odporne na rozwarstwienie, przesunięcie osi $e < 0,15 t$. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni spoiny.	1,39
20		Złącze krzyżowe albo teowe, spoiny pachwinowe. Wartość C_d dotyczy pęknięcia zmęczeniowego grani spoiny. Uwaga: do obliczania naprężeń nominalnych zastosować grubość „a” spoiny.	1,95
C ELEMENTY NIE OBCIĄŻONE DOŁĄCZONE DO WIĄZAŃ PRZENOSZĄCYCH OBCIĄŻENIA			
21		Płyta poprzeczna nie przenosząca obciążenia, spawana do płyty głównej, cieńsza od płyty głównej. Spoiny i ich obróbka: – czołowa typu K, powierzchnia spoiny szlifowana: – pachwinowa obustronna, powierzchnia spoin szlifowana: – pachwinowe, bez szlifowania: Gdy płyta dostawiana grubsza od płyty głównej:	0,88 0,88 1,10 1,24
22		Płyta poprzeczna spawana do środniczka lub mocnika usztywnienia/wiązara, o grubości mniejszej od ścianek wiązara. Dla pęknięcia w środniczku lub mocniku w rejonie wierzchołka płyty poprzecznej należy zastosować wsp. C_d do wartości naprężenia głównego (większego), wyznaczonego dla wartości σ i τ w tym miejscu, obliczanego wg teorii belek cienkościennych. Wartość C_d w zależności od typu spoiny i jej obróbki – złącze doczołowe typu K, powierzchnia spoin szlifowana – spoina pachwinowa obustronna, powierzchnia spoin szlifowana – spoina pachwinowa, bez obróbki Gdy płyta poprzeczna grubsza od płyty głównej:	0,88 0,88 1,10 1,24
23		Płytką ustawioną wzdłużnie, spawana spoiną pachwinową do płyty głównej. Wartości C_d w zależności od długości l płytki : $l \leq 50$ mm: $l \leq 150$ mm: $l \leq 300$ mm: $l > 300$ mm:	1,10 1,24 1,39 1,75
24		Węzłówka spawana spoiną pachwinową do mocnika belki lub płyty. Węzłówka jest ścięta ukośnie lub ma zaokrągloną krawędź i spełnione są warunki: $c < 2t$, max. 25 mm. Wartości C_d w zależności od r : $r > 0,5 h$: $r < 0,5 h$ albo $\varphi > 20^\circ$:	1,24 1,39

Nr	Element	Opis i uwagi dotyczące naprężeń	C_d
25		Węzłówka spawana spoiną pachwinową, koniec węzłówki zaokrąglony płynnie. Wzmocniony (zgrubiony) i szlifowany koniec spoiny pachwinowej. Spełnione są warunki : $c < 2 t$, max. 25 mm; $r > 150$ mm	0,98
26		Węzłówka spawana do krawędzi płyty lub środka belki, w ich płaszczyźnie. Węzłówka jest ścięta ukośnie lub ma zaokrągloną krawędź i spełnia warunek: $c < 2 t_2$ (max 25 mm).. Wartości C_d w zależności od r i φ : $r > 0,5 h$: $r < 0,5 h$ albo $\varphi < 20^\circ$: Uwaga: gdy $t_2 < 0,7 t_1$ powyższe wartości C_d można zmniejszyć o 7 %.	1,75 1,95
27		Płytką spawana wzdłuż krawędzi płyty lub mocnika belki, w ich płaszczyźnie. Wartości C_d w zależności od długości l boku płytki: $l \leq 150$ mm: $l \leq 300$ mm: $l > 300$ mm:	1,75 1,95 2,19
28		Płytką spawana do krawędzi płyty lub mocnika belki, w ich płaszczyźnie. Płynne (zaokrąglone) zakończenia płytki szlifowane. Wartości C_d w zależności od r i w : $r > 150$ mm albo $r/w > 1/3$: $1/6 < r/w < 1/3$: $r/w < 1/6$:	0,98 1,24 1,75
D POŁĄCZENIA ZAKŁADKOWE I NAKŁADKOWE			
29		Złącze zakładkowe, spawanie spoinami pachwinowymi, usytuowanymi poprzecznie do obciążenia. Pęknięcie zmęczeniowe materiału rodzimego: Pęknięcie spoiny:	1,39 1,95
30		Nakładka przyspawana spoinami pachwinowymi, równoległymi do kierunku obciążenia. Pęknięcie zmęczeniowe materiału rodzimego: Pęknięcie zmęczeniowe spoiny (zakładając, że długości spoin są 40-krotnie większe od ich grubości):	1,75 1,75
31		Węzłówka ścięta ukośnie ($\varphi < 20^\circ$) lub z okrągłą krawędzią, spełniająca warunki: $c < 2 t$, max 25 mm, spawana nakładkowo do: – płaskownika: – płaskownika łebkowego: – kątownika:	1,39 1,57 1,75
32		Zakończenie spawane dłuższej płyty nakładkowej na mocniku belki (bazując na naprężeniach w mocniku, przy krawędzi spoiny). Wartości C_d w zależności od t/t_D : $t_D < 0,8 t$: $0,8 t \leq t_D < 1,5 t$: $t_D \geq 1,5 t$:	1,57 1,75 1,95

Nr	Element	Opis i uwagi dotyczące naprężeń	C_d
33		<p>Zakończenie długiej płyty nakładkowej spawanej do mocnika belki. Spoiny na końcach nakładki wzmocnione i szlifowane (bazując na wartościach naprężeń w mocniku, przy krawędzi spoiny).</p> <p>Wartości C_d w zależności od t/t_D:</p> <p>$t_D < 0,8 t$: 1,24</p> <p>$0,8 t \leq t_D < 1,5 t$: 1,39</p> <p>$t_D \geq 1,5 t$: 1,57</p>	1,24 1,39 1,57
34		<p>Wzmocnienia spawane spoinami pachwinowymi do powierzchni płyty:</p> <ul style="list-style-type: none"> – gdy szlifowane krawędzie spoiny: – spoiny bez obróbki : <p>Uwaga: dla większych otworów zalecane jest bezpośrednie obliczanie naprężeń geometrycznych.</p>	1,10 1,24

⁽¹⁾ DT – badania nieniszczące całej grubości spoiny.

2.2.9 Obliczanie wypadkowego zakresu naprężeń

2.2.9.1 Zasady ogólne

W niniejszym p. 2.2.9 podany jest sposób obliczania wypadkowych zakresów naprężeń we wzdłużnych wiązaniach kadłuba, w których zachodzi superpozycja chwilowych wartości naprężeń globalnych, czyli wywołanych zginaniem ogólnym kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej oraz deplanacją przekrojów poprzecznych kadłuba przy skręcaniu, i naprężeń lokalnych – wywołanych zginaniem poszycia, usztywnień poszycia oraz wiązarów wskutek oddziaływania ciśnień wody zaburtowej, balastu lub ładunku płynnego, sił bezwładności ładunku itp.

Podano także sposób wyznaczania wypadkowego zakresu ciśnień wywołanych jednocześnie działającymi wartościami ciśnień dynamicznych z zewnątrz i od wewnątrz kadłuba.

Wartości wypadkowych zakresów naprężeń i ciśnień są przekraczane z prawdopodobieństwem 10^{-4} .

Wartość wypadkowego zakresu naprężeń wyznacza bezpośrednio długoterminowy rozkład zakresów naprężeń (p. 2.3) i jest bezpośrednio wykorzystywana do obliczania wytrzymałości zmęczeniowej analizowanego elementu konstrukcji – według 2.6.

2.2.9.2 Wypadkowy zakres ciśnień

W sytuacji gdy obliczany jest bezpośrednio wypadkowy zakres naprężeń lokalnych, który jest skutkiem jednoczesnego oddziaływania ciśnień zewnętrznych i wewnętrznych (np. w 2.2.6.5), wypadkowy zakres ciśnień należy obliczać według wzoru:

$$\Delta p_R = \text{Max} (\Delta p_z, \Delta p_w) + 0,4 \text{ Min} (\Delta p_z, \Delta p_w), \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.9.2)$$

gdzie:

Δp_z – zakres ciśnień zewnętrznych, obliczany według 2.2.4.2 lub 2.2.4.3, [kPa];

Δp_w – zakres ciśnień wewnętrznych, obliczany wg 2.2.4.4 lub 2.2.4.5, [kPa].

Należy pamiętać, aby wartości Δp_z i Δp_w przyjąć jako liczby nieujemne (wartości bezwzględne).

2.2.9.3 Wypadkowy zakres naprężeń globalnych

Wypadkowy zakres naprężeń globalnych, $\Delta \sigma_g$, będący wynikiem jednoczesnego zginania ogólnego kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej, należy obliczać według wzoru:

$$\Delta \sigma_g = \text{Max} (C \Delta \sigma_V, C \Delta \sigma_H) + 0,3 \text{ Min} (C \Delta \sigma_V, C \Delta \sigma_H), \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.9.3)$$

gdzie:

C – współczynnik koncentracji naprężeń, ustalany według 2.2.8.3 i 2.2.8.4. W przypadku wykonywania obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej bezpośrednio na podstawie zakresów naprężeń nominalnych, z odpowiednio dobranym wykresem Wöhlera (2.4), należy przyjąć $C = 1,0$;

$\Delta\sigma_V, \Delta\sigma_H$ – zakresy naprężeń od zginania ogólnego kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej, obliczane według 2.2.2 i 2.2.3, [MPa].

Gdy w analizie wytrzymałości kadłuba uwzględnia się także skręcanie kadłuba, to $\Delta\sigma_H$ powyżej oznacza zakres naprężeń pochodzących od jednoczesnego zginania w płaszczyźnie poziomej i od deplacji przekroju poprzecznego przy skręceniu. Obliczając $\Delta\sigma_H$ należy wówczas zsumować algebraicznie naprężenia od skręcania i zginania przekraczane z prawdopodobieństwem 10^{-8} (obliczane według Publikacji PRS 24/P „Analiza wytrzymałości kadłuba kontenerowca”), a otrzymany wynik pomnożyć przez $2(0,5)^{1/\xi}$ (ξ – współczynnik rozkładu Weibulla, obliczany według 2.3.3).

Wartość $\Delta\sigma_g$ służy do wyznaczenia wypadkowego zakresu naprężeń $\Delta\sigma_r$ – według 2.2.9.5.

2.2.9.4 Wypadkowy zakres naprężeń lokalnych

W niniejszym punkcie podano sposób wyznaczenia wypadkowego zakresu naprężeń lokalnych $\Delta\sigma_l$ w sytuacji gdy zakresy naprężeń pochodzących od dynamicznych ciśnień zewnętrznych (ciśnienia oddziaływania morza) i dynamicznych obciążeń od wewnątrz kadłuba (ciśnienia balastu, ładunku płynnego, ładunku masowego, siły oddziaływania jednostkowych sztuk ładunku itp.) wyznaczone są osobno – według wymagań 2.2.4.

$\Delta\sigma_l$ należy obliczać według wzoru:

$$\Delta\sigma_l = \text{Max}(C\Delta\sigma_z, C\Delta\sigma_w) + 0,4 \text{Min}(C\Delta\sigma_z, C\Delta\sigma_w), \quad [\text{kPa}] \quad (2.2.9.4)$$

gdzie:

C – współczynnik koncentracji naprężeń (obowiązuje komentarz z 2.2.9.3);

$\Delta\sigma_z$ – zakres naprężeń od ciśnień zewnętrznych, ustalony wg wymagań 2.2.5 ÷ 2.2.7, [MPa];

$\Delta\sigma_w$ – zakres naprężeń od obciążeń wewnętrznych, ustalany jw., [MPa].

$\Delta\sigma_z$ lub $\Delta\sigma_w$ mogą być wynikiem sumowania kilku rodzajów naprężeń – np. w usztywnieniu wzdłużnym leżącym w pasie współpracującym poszycia wiązara wzdłużnego będą one wynikiem sumowania algebraicznego naprężeń normalnych wywołanych zginaniem lokalnym usztywnienia (opartego na wiązarach poprzecznych) i zginania wiązara.

W pewnych sytuacjach jeden ze składników $\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_w$ (lub nawet oba) może mieć wartość zerową. Wartości $\Delta\sigma_z$ i $\Delta\sigma_w$ stosowane we wzorze 2.2.9.4 zawsze należy przyjmować jako liczby nieujemne (wartości bezwzględne).

W przypadku poprzecznych wiązań kadłuba wartość $\Delta\sigma_l$ może służyć wprost do obliczania wytrzymałości zmęczeniowej elementu konstrukcji – według 2.6.

W przypadku wiązań wzdłużnych do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej służy wypadkowy zakres naprężeń $\Delta\sigma_r$, obliczany z uwzględnieniem $\Delta\sigma_l$ – według 2.2.9.5.

2.2.9.5 Wypadkowy zakres naprężeń

Wypadkowy zakres naprężeń $\Delta\sigma_r$ we wzdłużnych wiązaniach kadłuba, stosowany wprost do obliczania wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji, według 2.6, należy wyznaczać na podstawie wartości $\Delta\sigma_g$ (2.2.9.3) i $\Delta\sigma_l$ (2.2.9.4) według wzoru:

$$\Delta\sigma_r = \text{Max}(\Delta\sigma_g, \Delta\sigma_l) + K_{gl} \text{Min}(\Delta\sigma_g, \Delta\sigma_l), \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.9.5-1)$$

K_{gl} oznacza współczynnik jednoczesności obciążeń (bezwymiarowy). Jego wartość należy wyznaczać następująco:

– dla elementów konstrukcji na poziomie płaszczyzny podstawowej kadłuba:

$$K_{gl} = 0,7 \quad (2.2.9.5-2)$$

– dla elementów konstrukcji położonych powyżej aktualnie rozpatrywanej wodnicy pływania:

$$K_{gl} = 0,6 \quad (2.2.9.5-3)$$

– dla elementów konstrukcji położonych pomiędzy poziomem płaszczyzny podstawowej a poziomem aktualnej wodnicy (zanurzenie T_1 , [m]):

$$K_{gl} = 0,7 - 0,1 \frac{z}{T_1} \quad (2.2.9.5-4)$$

z – odległość elementu od płaszczyzny podstawowej, [m].

2.3 Długoterminowy rozkład zakresów naprężeń

2.3.1 Zasady ogólne

Długoterminowy rozkład wypadkowych zakresów naprężeń (a także poszczególnych składowych) przybliżany jest rozkładem Weibulla, w formie wzorów 2.3.2-1 i 2.3.2-2.

Wzór 2.3.2-2 jest następnie wykorzystywany wprost do obliczania trwałości zmęczeniowej – według wymagań 2.6.

2.3.2 Rozkład Weibulla

Prawdopodobieństwo zdarzenia, że w ciągu całego okresu eksploatacji statku zakres naprężeń $\Delta\sigma$ nie będzie mniejszy niż założona wartość $\Delta\sigma_0$ określa wzór:

$$\Pr(\Delta\sigma \geq \Delta\sigma_0) = e^{-\left(\frac{\Delta\sigma_0}{a}\right)^\xi} \quad (2.3.2-1)$$

gdzie:

ξ – współczynnik liczbowy o wartościach ustalanych według 2.3.3;

$$a = \frac{\Delta\sigma_R}{\left(\ln N_R\right)^{\frac{1}{\xi}}};$$

$\Delta\sigma_R$ – wartość zakresu naprężeń przekraczana z prawdopodobieństwem $\frac{1}{N_R}$.

Uwaga: W niniejszej Publikacji przyjęto $\frac{1}{N_R} = 10^{-4}$, tzn. $N_R = 10000$.

Gęstość prawdopodobieństwa $p(\Delta\sigma_0)$ odpowiadająca wzorowi 2.3.2-1 określana jest wzorem:

$$p(\Delta\sigma_0) = \frac{\xi}{a} \left(\frac{\Delta\sigma_0}{a}\right)^{\xi-1} e^{-\left(\frac{\Delta\sigma_0}{a}\right)^\xi} \quad (2.3.2-2)$$

2.3.3 Wartości współczynnika ξ

W środkowej części kadłuba wartości ξ do wyznaczania rozkładów $\Delta\sigma$ poszczególnych składników zakresów naprężeń oraz wypadkowego zakresu naprężeń należy przyjmować w następujący sposób, zależnie od typu statku:

masowce i zbiornikowce:

$$\xi = 1,0 \text{ gdy } L_0 = 150 \text{ m}; \quad (2.3.3-1)$$

$$\xi = 0,9 \text{ gdy } L_0 = 350 \text{ m};$$

dla pośrednich wartości długości L_0 należy stosować interpolację liniową;

kontenerowce:

$$\xi = 1,10 \text{ gdy } L_0 = 150 \text{ m}; \quad (2.3.3-2)$$

$$\xi = 0,95 \text{ gdy } L_0 = 250 \text{ m};$$

dla pośrednich wartości długości L_0 stosować interpolację liniową.

W przypadku pozostałych typów statków w części środkowej oraz wszelkich typów statków poza częścią środkową należy przyjmować:

$$\xi = 1,1 - 0,35 \frac{L_0 - 100}{300} \quad (2.3.3-3)$$

2.4 Klasyfikacja elementów konstrukcji. Wykresy Wöhlera

2.4.1 Zasady ogólne

W 2.4.2 podane jest przyporządkowanie kilkunastu typowych elementów stalowych konstrukcji spawanych do kilku podstawowych wykresów Wöhlera opracowanych przez DEN.

Wykonując obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej według wymagań 2.6, z zastosowaniem zakresów naprężeń nominalnych, należy kolejno:


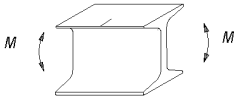
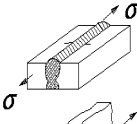
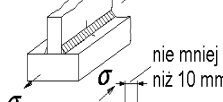
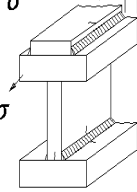
- zakwalifikować analizowany element konstrukcji do jednego z wariantów przedstawionych w tabeli 2.4.2;
- parametry wykresu Wöhlera wynikające z zakwalifikowania elementu (tabela 2.4.2) ustalić wg 2.4.3;
- dokonać korekty parametrów wykresu Wöhlera według wymagań 2.5;
- wykonać obliczenia trwałości zmęczeniowej elementu według 2.6.

Jeżeli w obliczeniach trwałości zmęczeniowej wykorzystywane są wartości współczynników koncentracji naprężeń podane w 2.2.8 lub zakresy naprężeń geometrycznych obliczone bezpośrednio MES (4.2), to w obliczeniach według 2.6 należy zastosować krzywą (wykres) typu „D” (patrz 2.4.3), w razie potrzeby skorygowaną według wymagań 2.5.

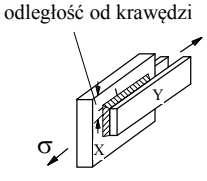
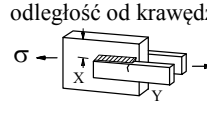
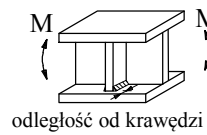
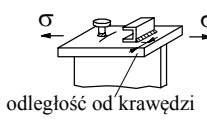
2.4.2 Klasyfikacja elementów konstrukcji

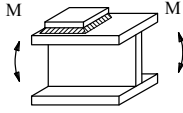
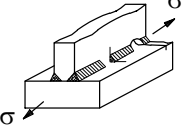
W tabeli 2.4.2 przedstawiono szkice typowych elementów konstrukcji, typ wykresu Wöhlera, który należy stosować dla danego elementu, opis elementów oraz dodatkowe objaśnienia. Pokazano także (na rysunkach i w opisie) miejsca potencjalnych pęknięć zmęczeniowych oraz naprężenia (nominalne), z którymi należy stosować wykresy Wöhlera.

Tabela 2.4.2
Klasyfikacja typowych elementów konstrukcji

Lp.	Rysunek	Wykres Wöhlera	Opis elementu i uwagi na temat sposobu pęknięcia	Objaśnienia dodatkowe
I. Materiał rodzimy, czyli stal bez spoin – patrz uwaga 1) poniżej tabeli				
1a		B	Materiał walcowany lub z oszlifowaną powierzchnią. Brzezi nie są wynikiem cięcia gazowego.	Jeżeli w czasie eksploatacji konstrukcji możliwe jest wystąpienie wżerów korozyjnych na powierzchni, to należy stosować wykres Wöhlera typu C.
1b		B	Jak 1a, gdy element ma brzezi cięte gazowo, ale następnie oszlifowane.	Wszelkie uskoki krawędzi cięcia gazowego powinny być zaokrąglone promieniem nie mniejszym niż grubość materiału.
1c		C	Jak 1a, gdy element ma brzezi cięte gazowo (maszynowo). Sprawdzono, że krawędzie cięte nie zawierają pęknięć.	Jeśli występują uskoki krawędzi cięcia, to należy zastosować zakres naprężeń nominalnych pomnożony przez odpowiednią wartość współczynnika koncentracji naprężeń.
II. Spoiny ciągłe doczołowe lub pachwinowe, równoległe do kierunku naprężeń – patrz uwaga 2) poniżej tabeli				
2a		B	Spoiny czołowe, z pełnym przetopem, nadlewy spoiny zeszlifowane do poziomu powierzchni elementów, w kierunku naprężeń. Jakość spoin sprawdzona badaniami nieniszczącymi.	Wielkość dopuszczalnych minimalnych wymiarów defektów spoin należy określać metodami mechaniki pęknięcia. Zastosowana metoda badań nieniszczących musi wykrywać defekty o wymiarach jak wyżej.
2b		C	Spoiny czołowe lub pachwinowe, wykonane automatycznie z płytkami wybiegowymi.	Jeżeli przy wykonaniu połączenia wystąpi przypadkowe przerwanie spawania, należy zapewnić podobną jakość i kształt spoiny jak przy spawaniu ciągłym.
2c		D	Jak 2b, gdy w procesie spawania występują przerwy.	Dla zakończeń płyt nakładkowych na mocnikach obowiązuje wariant 12.

Lp.	Rysunek	Wykres Wöhlera	Opis elementu i uwagi na temat sposobu pęknięcia	Objaśnienia dodatkowe
III. Drobne elementy spawane do powierzchni lub krawędzi elementów (płyty) obciążonych – patrz uwaga 3) poniżej tabeli				
3			Pęka materiał rodzimy płyty obciążonej, w sąsiedztwie spoiny, niezależnie od usytuowania spoiny względem kierunku naprężeń i od typu spoin (ciągła albo przerywana).	Złącza wykonywane z pełnym przetopem lub częściowym przetopem powinny mieć kształt powierzchni zewnętrznej spoiny podobny do spoiny pachwinowej.
3a		F	Długość elementu przyspawanego równoległego do kierunku naprężeń nie większa niż 150 mm, a odległość od brzegu płyty większa niż 10 mm.	
3b		F2	Długość elementu przyspawanego równoległego do kierunku naprężeń większa niż 150 mm, a odległość od brzegu spoiny > 10 mm.	
4		G	Pęka materiał rodzimy płyty obciążonej, w sąsiedztwie brzegów lub końców spoin usytuowanych w odległości ≤ 10 mm od krawędzi płyty niezależnie od kształtu przyspawanego elementu.	Wykres G jest stosowany niezależnie od wymiarów przyspawanego elementu.
5			Pęka materiał płyty obciążonej w rejonie połączenia spawanego na pełny przetop, łączącego obciążoną płytę z przewleczonym przez nią elementem.	Niniejsza klasyfikacja nie dotyczy połączeń spoiną pachwinową. Nie zależy natomiast od kierunku obciążenia („L” albo „T”).
5a		F	Gdy wymiar (w kierunku naprężeń w płycie) przewleczzonego elementu ≤ 150 mm, a odległość od brzegu płyty > 10 mm.	
5b		F2	Gdy wymiar elementu (jak wyżej) > 150 mm, a odległość od brzegu > 10 mm.	
5c		G	Gdy odległość od brzegu ≤ 10 mm.	
IV. Spoiny pachwinowe i czołowe przenoszące obciążenia prostopadłe do kierunku spoin – patrz uwaga 4) poniżej tabeli				
6			Pęka materiał rodzimy w sąsiedztwie połączenia krzyżowego lub teowego (element X na rysunkach).	Obowiązują takie same ograniczenia dotyczące odległości spoiny od krawędzi jak w wariantach 3a i 3b.
6a		F	Spoiny czołowe z pełnym przetopem. Krawędzie spoiny szlifowane (usunięte podtopienia).	
6b		F2	Spoiny czołowe z niepełnym przetopem lub spoiny pachwinowe. Krawędzie spoin szlifowane (usunięte podtopienia).	
			Pęknięcie może wystąpić w spoinie – jeśli grubość spoiny nie jest wystarczająco duża.	

Lp.	Rysunek	Wykres Wöhlera	Opis elementu i uwagi na temat sposobu pęknięcia	Objaśnienia dodatkowe
7			Pęka materiał rodzimy w sąsiedztwie odcinków spoin usytuowanych poprzecznie w stosunku do kierunku naprężeń (element X na rysunku).	<p>Naprężenia w elemencie X należy obliczać dla prostokątnego przekroju poprzecznego o wymiarach równych grubości elementu X i szerokości elementu Y.</p> <p>Wykres F2 należy stosować także do połączeń wykonanych tylko w formie spoin równoległych do kierunku naprężeń.</p>
7a		F2	Odległość spoin od krawędzi ≥ 10 mm.	
7b		G	Odległość spoin od krawędzi < 10 mm.	
8		G	Pęka materiał rodzimy w rejonie końców spoin pachwinowych przenoszących obciążenie, równoległych do kierunku przyłożonych naprężeń (element Y na rysunku).	
9		W	Pęknięcia spoin przenoszących obciążenia (spoiny pachwinowe lub z niepełnym przetopem). Spoiny usytuowane poprzecznie lub równolegle w stosunku do kierunku obciążenia. Uwaga: wytrzymałość zmęczeniową obliczać dla $\Delta\sigma$, które są równe nominalnym naprężeniom stycznym obliczanym dla minimalnej grubości spoiny.	
V. Elementy spawane wiązarów i usztywnień – patrz uwaga 5) poniżej tabeli				
10			Pęka materiał rodzimy w sąsiedztwie spoiny łączącej spawany element z mocnikiem wiązara/ usztywnienia.	
10a		F	Odległość od krawędzi ≥ 10 mm.	
10b		G	Odległość od krawędzi < 10 mm.	
11			Pęka materiał rodzimy wiązara/ usztywnienia w sąsiedztwie spoiny.	
11a		F	Gdy odległość od krawędzi ≥ 10 mm.	
11b		G	Gdy odległość od krawędzi < 10 mm.	

Lp.	Rysunek	Wykres Wöhlera	Opis elementu i uwagi na temat sposobu pęknięcia	Objaśnienia dodatkowe
12		G	Pęka rodzimy materiał w rejonie końca płyty nakładkowej – niezależnie od tego czy płyta nakładkowa jest na końcu ukosowana, czy nie i czy zastosowano poprzeczną w stosunku do obciążenia spoinę łączącą koniec płyty nakładkowej z mocnikiem.	Wykres G należy stosować także do płyt nakładkowych szerszych niż mocnik.
13a		E	Pęka materiał rodzimy w rejonie zakończeń odcinków spoin albo pękają spoiny – jeżeli spawanie poszczególnych odcinków było wykonywane z przerwami.	Nie należy uwzględniać koncentracji naprężeń wskutek zastosowania wycięć.
13b		F	Gdy zastosowano wycięcia w środku. Pęknięcia występują wówczas w rejonach wycięć.	

Uwagi do tabeli 2.4.2:

- 1) W materiale rodzimym, tzn. bez spoin, inicjacja pęknięć zmęczeniowych występuje zwykle na powierzchni elementów – najczęściej w rejonie wszelkiego typu zaburzeń kształtu powierzchni lub w narożach przekroju poprzecznego belek. W konstrukcji spawanej pęknięcia zmęczeniowe powstają natomiast zazwyczaj bezpośrednio w pobliżu spoin lub w samych spoinach. Wykresy Wöhlera zalecane dla wariantów 1a, 1b i 1c należy stosować także do zakrzywionych elementów konstrukcji ze stali (bez spoin) – jak np. naroża luków ładunkowych. Wówczas $\Delta\sigma$ należy określać jako zakres naprężeń głównych, działających równoległe do krawędzi elementu (patrz także p. 4.2).
- 2) Gdy nadlewy spoin są szlifowane (do poziomu powierzchni materiału rodzimego), inicjacja pęknięć zmęczeniowych występuje w miejscach lokalnych defektów spoin.

W przypadku spoin nie obrabianych pęknięcia mogą być inicjowane w miejscach, gdzie przerywano proces spawania lub na powierzchni spoin (w łusce spoiny).

Jeżeli w procesie spawania stosowane są podkładowki technologiczne, to należy:

 - a) stosować podkładowki ciągłe;
 - b) ocenić wytrzymałość zmęczeniową spoin podkładek pozostających w konstrukcji.

Kryterium odległości spoin od brzegów płyt jest stosowane w celu wyeliminowania lokalnych koncentracji naprężeń na brzegach płyt, powstających wskutek np. podtopienia płyt, rozprysku przy spawaniu albo nieregularnego kształtu spoin wykonywanych ręcznie.
- 3) W spoinach usytuowanych równoległe do kierunku obciążenia pęknięcia zmęczeniowe są inicjowane w rejonach końców spoin. W spoinach usytuowanych poprzecznie pęknięcia są inicjowane w materiale rodzimym, w sąsiedztwie brzegu spoiny lub w samej spoinie.

W sytuacjach gdy spoiny znajdują się na brzegach obciążonych płyt lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie, koncentracja naprężeń jest większa, a wytrzymałość zmęczeniowa maleje. Dlatego elementy są klasyfikowane w zależności od wartości odległości od brzegu płyty.
- 4) Pęknięcia zmęczeniowe w połączeniach krzyżowych lub teowych najczęściej są inicjowane przy krawędzi spoiny. W połączeniach wykonanych spoinami pachwinowymi lub spoinami z niepełnym przetopem pęknięcia są inicjowane na brzegu spoiny i powiększają się w kierunku materiału rodzimego, albo pęknięcia inicjują się w samej spoinie.

W spoinach usytuowanych równoległe do kierunku naprężeń pęknięcia spoin występują rzadko. Pęknięcia są z reguły inicjowane na końcu spoiny i powiększają się w kierunku poprzecznym w stosunku do kierunku naprężeń.

Gdy koniec spoin jest usytuowany na brzegu płyty lub blisko brzegu wzrasta koncentracja naprężeń, a wytrzymałość zmęczeniowa maleje.
- 5) Pęknięcia zmęczeniowe są z reguły inicjowane na brzegach spoin, co jest związane z lokalną koncentracją naprężeń, krótkimi odcinkami i zmianami kierunku spoin.

Koncentracja naprężeń wzrasta gdy powyższe nieciągłości występują blisko krawędzi płyt.

Większość wariantów typu V pokrywa się z wariantami typu III. Dokonano powtórzenia w celu pokazania wprost zastosowania wariantu III do typowych węzłów usztywnień i wiązarów kadłuba statku.

2.4.3 Krzywe (wykresy) Wöhlera

Krzywe (wykresy) Wöhlera mają następującą postać analityczną:

$$N = \frac{K}{(\Delta\sigma)^m} \quad (2.4.3)$$

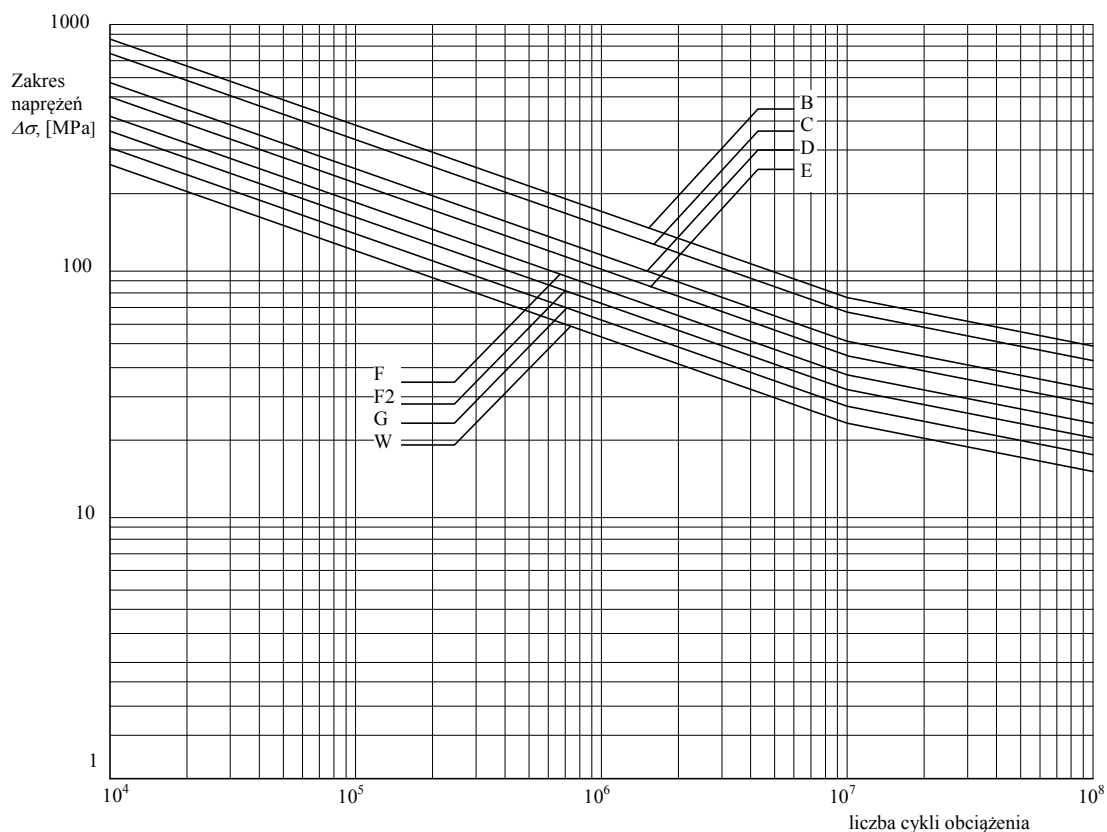
N – liczba cykli, przy której następuje zniszczenie elementu (całkowite przełamanie lub rozerwanie), przy stałej wartości $\Delta\sigma$ zakresu naprężeń, [MPa];

K, m – parametry zależne od typu krzywej Wöhlera, podane w tabeli 2.4.3-1.

Uwaga: Parametry K, m nie zależą od wartości granicy plastyczności stali.

Krzywe Wöhlera w formie wykreślnej pokazano na rys. 2.4.3.

Krzywe Wöhlera w formie wzoru 2.4.3 podlegają na ogół dodatkowej korekcie – według wymagań 2.5.



Rys. 2.4.3 Krzywe (wykresy) Wöhlera

Tabela 2.4.3-1
Parametry K i m krzywych Wöhlera

Typ krzywej	$N \leq 10^7$		$N > 10^7$	
	m	K	m	K
B	3	$5,800 \cdot 10^{12}$	5	$4,034 \cdot 10^{16}$
C	3	$3,464 \cdot 10^{12}$	5	$1,708 \cdot 10^{16}$
D	3	$1,520 \cdot 10^{12}$	5	$4,329 \cdot 10^{15}$
E	3	$1,026 \cdot 10^{12}$	5	$2,249 \cdot 10^{15}$
F	3	$6,319 \cdot 10^{11}$	5	$1,002 \cdot 10^{15}$
F2	3	$4,330 \cdot 10^{11}$	5	$5,339 \cdot 10^{14}$
G	3	$2,481 \cdot 10^{11}$	5	$2,110 \cdot 10^{14}$
W	3	$9,279 \cdot 10^{10}$	5	$4,097 \cdot 10^{13}$

Zamiast wykonywać obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej dla parametrów K , m danej krzywej Wöhlera, można zastosować parametry K i m dla krzywej „D” oraz dodatkowo zastosować zmienioną wartość $\Delta\sigma$, mnożąc zakres naprężeń nominalnych przez współczynnik redukcyjny o wartości przyjętej według tabeli 2.4.3-2.

Tabela 2.4.3-2
Współczynniki redukcyjne krzywych Wöhlera

Typ krzywej	B	C	D	E	F	F2	G	W
Współcz. redukcyjny	0,64	0,76	1	1,14	1,34	1,52	1,83	2,13

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.

2.5 Korekta wykresów Wöhlera

2.5.1 Zasady ogólne

Wykresy Wöhlera dobrane do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej według wymagań 2.4 należy skorygować ze względu na wartość naprężeń ściskających w cyklu obciążenia (2.5.2), grubość elementów (2.5.3) oraz korozyjne oddziaływanie wody morskiej lub ładunku (2.5.4).

Może być także wymagane uwzględnienie niedokładności montażu konstrukcji – według wymagań 2.5.5.

2.5.2 Wpływ naprężeń ściskających

Jeżeli w pojedynczym cyklu obciążenia (rys. 2.1.1) $\sigma_{\min} < 0$, to w obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej stosuje się zastępczy zakres naprężeń $\Delta\sigma = \Delta\sigma_1$, obliczany według wzoru:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_t + 0,6 \sigma_c \quad (2.5.2)$$

gdzie:

$$\sigma_t = \text{Max}(\sigma_{\max}, 0);$$

$$\sigma_c = \sigma = \text{Min}(|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|, |\sigma_{\min}|).$$

Parametr zużycia zmęczeniowego należy wówczas obliczać według wzoru 2.6.5-1.

Jeżeli $\Delta\sigma_{\min} \geq 0$, to $\Delta\sigma$ należy przyjmować według definicji podanej w 2.1.1.

2.5.3 Wpływ grubości elementów

Gdy grubość płyty w połączeniu spawanym przekracza wartość $t_B = 25$ mm i sprawdzana jest wytrzymałość zmęczeniowa oraz, gdy spodziewane pęknięcie propaguje się od brzegu spoiny w głąb płyty, to zakres naprężeń $\Delta\sigma = \Delta\sigma_1$ obliczony według 2.5.2 należy dodatkowo skorygować, stosując w obliczeniach wartość $\Delta\sigma = \Delta\sigma_2$:

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

Dla $t \leq t_B$ nie należy stosować korekty według powyższego wzoru.

2.5.4 Korozyjne oddziaływanie wody morskiej lub ładunku

W przypadku elementów konstrukcji skutecznie zabezpieczonych przed korozją (zastosowany system ochrony katodowej lub szczelna powłoka malarska) w obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej należy stosować wykresy Wöhlera o parametrach podanych w tabeli 2.4.3-1.

W przypadku elementów konstrukcji, które w ogóle nie są zabezpieczone przed korozją lub powłoka malarska przestaje być skuteczna (po upływie odpowiednio długiego czasu od malowania), należy zmodyfikować podane w tabeli 2.4.3-1 parametry w następujący sposób:

- wartość K dla $N \leq 10^7$ należy podzielić przez 2;
- dla $N \geq 10^7$ należy zastosować wartość K jak wyżej oraz $m = 3$ w miejsce $m = 5$.

2.5.5 Dokładność montażu konstrukcji

W szczególnych przypadkach, gdy dokładność montażu nie spełnia zadowalających standardów produkcyjnych, wymagane jest uwzględnienie zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji – poprzez zastosowanie w obliczeniach dodatkowych wartości współczynników koncentracji naprężeń (patrz 2.2.8).

Jeżeli występuje przesunięcie równoległe o wartości e dwóch łączonych doczołowo blach, to wartość dodatkowego współczynnika koncentracji naprężeń stosowanego do naprężeń osiowych w blachach wynosi:

$$C_e = 1 + \frac{3e}{t} \quad (2.5.5)$$

2.6 Obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej

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.

2.6.2 Stany załadowania statku

W obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej należy uwzględnić reprezentatywne dla danego statku stany załadowania, wyszczególnione w „Informacji o stateczności”.

Dopuszczalne jest wykonanie obliczeń z uwzględnieniem jedynie następujących dwóch stanów załadowania:

- najczęściej stosowany stan pełnego załadowania,
- najczęściej stosowany stan balastowy.

Względny czas eksploatacji statku w powyższych dwóch stanach załadowania, który należy stosować w obliczeniach dla najbardziej popularnych typów statków, podano w tabeli 2.6.2.

Tabela 2.6.2
Współczynniki względnego czasu eksploatacji statku w stanie pełnego załadowania i w stanie balastowym

Typ statku	α	β
	Stan pełnego załadowania	Stan balastowy
Zbiornikowce, gazowce	0,5	0,5
Masowce	0,6	0,4
Drobnicowce, kontenerowce	0,75	0,25

2.6.3 Czas oddziaływania środowiska korozyjnego

W przypadku elementów konstrukcji położonych wewnątrz zbiorników balastowych i zbiorników ładunkowych zbiornikowców olejowych oraz w ładowniach masowców, w których nie zastosowano systemu ochrony katodowej przed korozją, należy założyć, że w ciągu połowy okresu eksploatacji statku powłoka malarska jest skuteczna i w obliczeniach stosować wykresy Wöhlera o parametrach podanych w 2.4.3.

W pozostałym okresie eksploatacji należy zastosować skorygowane wykresy Wöhlera o parametrach określanych według wymagań 2.5.4.

2.6.4 Wymiary elementów konstrukcyjnych stosowane w obliczeniach

Zakresy naprężeń globalnych, tzn. wywołanych zginaniem ogólnym kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej oraz ewentualnie skręcaniem (patrz 2.2.2 i 2.2.3) należy obliczać dla projektowych wartości grubości elementów konstrukcji kadłuba, tzn. bez odejmowania naddatków korozyjnych.

W sytuacjach gdy Przepisy, część II – Kadłub, wymagają zastosowania naddatków korozyjnych (tzn. w zbiornikach lub w ładowniach masowców), a elementy konstrukcji nie są skutecznie chronione przed korozją, to w drugiej połowie założonego okresu eksploatacji statku przy obliczaniu zakresów naprężeń lokalnych wywołanych zginaniem lokalnym poszycia, usztywnień i wiązarów (patrz 2.2.5 ÷ 2.2.7) należy stosować wartości netto grubości elementów konstrukcji, tzn. po zmniejszeniu grubości projektowych o wymagane wartości naddatków korozyjnych.

W pozostałych przypadkach wartości zakresów naprężeń lokalnych można obliczać dla projektowych wartości grubości elementów konstrukcji.

2.6.5 Kryterium wytrzymałości zmęczeniowej

Sprawdzając wytrzymałość zmęczeniową elementów konstrukcji kadłuba należy wyznaczyć według wzoru 2.6.5-1 stopień zużycia zmęczeniowego przy założeniu, że statek pływa w tym samym stanie załadowania w ciągu całego okresu eksploatacji (najczęściej 20 lat):

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

I_p – liczba podprzedziałów, na które został podzielony przedział zakresów naprężeń $< 0, 2R_e >$.
Liczba I_p nie powinna być mniejsza niż 50.

$$n_i = p (\Delta\sigma_i) \Delta\sigma_i N_L;$$

$$\Delta\sigma_i = \frac{2R_e}{I_p};$$

$$\Delta\sigma_i = (i - 0,5) \Delta\sigma_i;$$

$p(\Delta\sigma_i)$ – wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa, obliczana według wzoru 2.3.2-2, gdzie należy podstawić $\Delta\sigma_o = \Delta\sigma_i$, albo obliczana bezpośrednio według rozdziału 3 ($\Delta\sigma_i$ oznacza wartość zakresu naprężeń przed jej skorygowaniem według 2.5);

N_L – liczba cykli obciążenia w ciągu okresu eksploatacji statku, przyjmowana według 2.6.6;

N_i – liczba cykli obliczana według równania 2.4.3 stosowanego wykresu Wöhlera, dla $\Delta\sigma = \Delta\sigma_i'$. $\Delta\sigma_i'$ oznacza skorygowaną wartość zakresu naprężeń – według wymagań 2.5.

Uwaga: Dopuszczalne jest także wykonanie obliczeń według wzoru 2.6.5-1, przyjmując niejednakowe długości poszczególnych podprzedziałów. Należy jednak zapewnić nie mniejszą dokładność obliczeń od uzyskiwanej z zastosowaniem algorytmu obliczeń opisanego wyżej.

Odnosnie elementów konstrukcji skutecznie chronionych przed korozją w ciągu całego okresu eksploatacji statku należy spełnić warunek:

$$D = \alpha D_0 + \beta D_0' \leq 1 \quad (2.6.5-2)$$

α, β – współczynniki względnego czasu eksploatacji statku w stanie pełnego załadowania i w stanie balastowym, przyjmowane według tabeli 2.6.2 lub na podstawie wiarygodnych danych statystycznych;

D_0 – wielkość obliczana według wzoru 2.6.5-1 dla zakresów naprężeń wyznaczonych dla stanu pełnego załadowania statku;

D_0' – jak wyżej, dla stanu balastowego.

Jeżeli elementy konstrukcji nie są skutecznie chronione przed korozją, to należy spełnić warunek:

$$\frac{1}{2}(D' + D_k') \leq 1 \quad (2.6.5-3)$$

D' – wartość D obliczana według wzoru 2.6.5-2 dla oryginalnego wykresu Wöhlera dobranego według 2.4 oraz projektowych grubości elementów konstrukcji;

D_k' – wartość D obliczana według wzoru 2.6.5-2 dla wykresu Wöhlera skorygowanego według wymagań 2.5.4 oraz wymiarów elementów konstrukcyjnych ustalonych według 2.6.4 – dla końcowego okresu eksploatacji statku.

Trwałość zmęczeniową L_t elementu konstrukcji, mierzoną w latach, można obliczać według wzoru:

$$L_t = \frac{L_e}{D} \quad (2.6.5-4)$$

L_e – założona w obliczeniach liczba lat eksploatacji statku (nie mniej niż 20 lat), dla której obliczono D ;

D – stopień zużycia zmęczeniowego, obliczany według wzoru 2.6.5-2.

2.6.6 Liczba cykli obciążenia w ciągu okresu eksploatacji statku

Liczba N_L cykli obciążenia w ciągu 20 lat eksploatacji statku, uwzględniająca założenie, że statek spędza średnio 85% czasu w morzu, wynosi:

$$N_L = \left(5 + \frac{150 - L_0}{200}\right) \cdot 10^7 \quad (2.6.6)$$

L_0 – długość obliczeniowa statku, [m].

Dla innej założonej wartości okresu eksploatacji statku wartość N_L należy przyjmować wprost proporcjonalnie do określonej według wzoru 2.6.6, tzn. dla 20 lat.

2.6.7 Wzór do obliczania stopnia zużycia zmęczeniowego

Jeżeli wartości wypadkowych zakresów naprężeń są korygowane ze względu na wpływ naprężeń ścisających (według 2.5.2) albo długoterminowy rozkład zakresów naprężeń jest obliczany według rozdziału 3, to D_0 należy obliczać według wzoru 2.6.5-1.

W pozostałych przypadkach D_0 można obliczać wprost, według następujących wzorów:

$$D_0 = \frac{N_L}{K} \frac{(\Delta\sigma_R)^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \quad (2.6.7-1)$$

gdzie:

$$\mu = 1 - \left\{ \gamma \left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu \right) - \nu^{-\frac{\Delta m}{\xi}} \gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu \right) \right\} / \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right)$$

- N_L – liczba cykli obciążenia, obliczana według 2.6.6;
 $m = 3,0$ – parametr krzywej Wöhlera (2.4.3);
 K – parametr krzywej Wöhlera dla $N \leq 10^7$ podany w tabeli 2.4.3-1;
 $\Delta\sigma_R$ – wypadkowy zakres naprężeń (zredukowany według 2.5.3 ze względu na grubość elementu jeżeli jest to konieczne), przekraczany z prawdopodobieństwem $\frac{1}{N_R} = 10^{-4}$ ($N_R = 10^4$);
 ξ – wartość współczynnika rozkładu Weibulla (2.3.2 i 2.3.3);
 Γ – funkcja gamma, o wartościach podanych w tabeli 2.6.7-1;
 $\nu = \left(\frac{\Delta\sigma_q}{\Delta\sigma_R} \right)^\xi \ln N_R$;
 $\Delta\sigma_q$ – wartość zakresu naprężeń obliczana według równania 2.4.3 krzywej (wykresu) Wöhlera dla $N = N_q = 10^7$;
 $\Delta m = 2$ – gdy krzywa Wöhlera nie jest korygowana ze względu na korozyjne oddziaływanie wody morskiej lub ładunku (p.2.5.4);
 $\Delta m = 0$ – gdy krzywa Wöhlera jest korygowana ze względu jak wyżej;
 γ – niepełna funkcja gamma o wartościach określanych według tabeli 2.6.7-2.
 Jeżeli $\Delta m = 0$, to D_0 można obliczać według wzoru:

$$D_0 = \frac{N_L}{K} \frac{(\Delta\sigma_R)^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right) \quad (2.6.7-2)$$

Znaczenie użytych symboli jest identyczne jak we wzorze 2.6.7-1.

Tabela 2.6.7-1
Wartości funkcji gamma (Γ)

n	$\Gamma(n+1)$	$\log\Gamma(n+1)$	n	$\Gamma(n+1)$	$\log\Gamma(n+1)$
0,10	0,9514	-0,02166	5,10	142,5	2,154
0,20	0,9187	-0,03708	5,20	169,4	2,229
0,30	0,8975	-0,04698	5,30	201,8	2,305
0,40	0,8873	-0,05195	5,40	240,8	2,382
0,50	0,8862	-0,05246	5,50	287,9	2,459
0,60	0,8935	-0,04890	5,60	344,7	2,537
0,70	0,9086	-0,04161	5,70	413,4	2,616
0,80	0,9314	-0,03087	5,80	496,6	2,696
0,90	0,9618	-0,01693	5,90	597,5	2,776
1,00	0,9999	0,00000	6,00	719,9	2,857
1,10	1,0465	0,01973	6,10	869,0	2,939
1,20	1,1018	0,04210	6,20	1050,3	3,021
1,30	1,1667	0,06696	6,30	1271,4	3,104
1,40	1,2422	0,09418	6,40	1541,3	3,188
1,50	1,3293	0,12364	6,50	1871,3	3,272
1,60	1,4296	0,15522	6,60	2275,0	3,357
1,70	1,5447	0,18884	6,70	2769,8	3,442
1,80	1,6765	0,22440	6,80	3376,9	3,529
1,90	1,8274	0,26182	6,90	4122,7	3,615
2,00	1,9999	0,30103	7,00	5039,9	3,702
2,10	2,1976	0,34195	7,10	6169,6	3,790
2,20	2,4240	0,38453	7,20	7562,3	3,879

n	$\Gamma(n+1)$	$\log\Gamma(n+1)$
2,30	2,6834	0,42869
2,40	2,9812	0,47439
2,50	3,3234	0,52158
2,60	3,7170	0,57020
2,70	4,1707	0,62020
2,80	4,6944	0,67156
2,90	5,2993	0,72422
3,00	5,9999	0,77815
3,10	6,813	0,8333
3,20	7,757	0,8897
3,30	8,855	0,9472
3,40	10,136	1,0059
3,50	11,632	1,0656
3,60	13,381	1,1265
3,70	15,431	1,1884
3,80	17,838	1,2513
3,90	20,667	1,3153
4,00	23,999	1,3802
4,10	27,932	1,4461
4,20	32,578	1,5129
4,30	38,078	1,5807
4,40	44,599	1,6493
4,50	53,343	1,7189
4,60	61,554	1,7893
4,70	72,528	1,8605
4,80	85,622	1,9326
4,90	101,270	2,0054
5,00	119,999	2,0792

n	$\Gamma(n+1)$	$\log\Gamma(n+1)$
7,30	9281,4	3,968
7,40	11405,9	4,057
7,50	14034,4	4,147
7,60	17290,2	4,238
7,70	21337,7	4,329
7,80	26334,0	4,421
7,90	32569,4	4,513
8,00	40319,9	4,606
8,10	49974	4,699
8,20	63011	4,792
8,30	77036	4,887
8,40	95809	4,981
8,50	119292	5,077
8,60	148696	5,172
8,70	185550	5,268
8,80	231792	5,365
8,90	289868	5,462
9,00	362880	5,560
9,10	454761	5,658
9,20	570499	5,756
9,30	716431	5,855
9,40	900609	5,955
9,50	1133278	6,054
9,60	1427482	6,155
9,70	1799844	6,255
9,80	2271560	6,356
9,90	2869690	6,458
10,00	3628799	6,560

Tabela 2.6.7-2
Wartość niepełnej funkcji gamma (γ)

x	$\gamma(x+1,3)$	$\gamma(x+1,4)$	$\gamma(x+1,5)$	$\gamma(x+1,6)$
0,0	0,0498	0,01832	0,00674	0,00248
0,1	0,0571	0,02148	0,00805	0,00301
0,2	0,0654	0,02520	0,00962	0,00365
0,3	0,0750	0,02958	0,01150	0,00444
0,4	0,0861	0,03472	0,01376	0,00539
0,5	0,0989	0,04078	0,01645	0,00654
0,6	0,1136	0,04790	0,01968	0,00795
0,7	0,1306	0,05630	0,02356	0,00966
0,8	0,1503	0,06618	0,02820	0,01174
0,9	0,1729	0,07784	0,03376	0,01427
1,0	0,1991	0,09158	0,04043	0,01735
1,1	0,2295	0,1078	0,04843	0,02110
1,2	0,2646	0,1269	0,05803	0,02567
1,3	0,3052	0,1495	0,06956	0,03122
1,4	0,3524	0,1762	0,08339	0,03799
1,5	0,4071	0,2077	0,10001	0,04624
1,6	0,4706	0,2450	0,11998	0,05630
1,7	0,5444	0,2890	0,14398	0,06855
1,8	0,6302	0,3412	0,17284	0,08349
1,9	0,7300	0,4030	0,20755	0,10171
2,0	0,8464	0,4762	0,24930	0,12394
2,1	0,9820	0,5630	0,29956	0,15106
2,2	1,1402	0,6659	0,36008	0,18416

x	$\gamma(x+1,3)$	$\gamma(x+1,4)$	$\gamma(x+1,5)$	$\gamma(x+1,6)$
2,3	1,3251	0,7880	0,43298	0,22457
2,4	1,5411	0,9330	0,52081	0,27391
2,5	1,7938	1,105	0,62670	0,33419
2,6	2,0897	1,310	0,75439	0,40785
2,7	2,4366	1,554	0,90845	0,49787
2,8	2,8436	1,844	1,094	0,60794
2,9	3,3215	2,189	1,319	0,74255
3,0	3,8834	2,601	1,590	0,90722
3,1	4,5446	3,092	1,918	1,109
3,2	5,3234	3,678	2,314	1,355
3,3	6,2417	4,377	2,794	1,658
3,4	7,3257	5,213	3,374	2,028
3,5	8,6065	6,213	4,077	2,481
3,6	10,122	7,410	4,928	3,037
3,7	11,916	8,842	5,960	3,719
3,8	14,043	10,56	7,211	4,555
3,9	16,567	12,62	8,729	5,581
4,0	19,566	15,09	10,57	6,841
4,1	23,134	18,06	12,81	8,389
4,2	27,382	21,63	15,53	10,29
4,3	32,446	25,93	18,84	12,66
4,4	38,491	31,10	22,86	15,50
4,5	45,714	37,34	27,76	19,03
4,6	54,356	44,86	33,73	23,38
4,7	64,706	53,93	41,00	28,74
4,8	77,118	64,90	49,87	35,33
4,9	92,019	78,16	60,70	43,46
5,0	109,93	94,22	73,92	53,48
5,1	131,49	113,7	90,07	65,84
5,2	157,46	137,24	109,81	81,09
5,3	188,79	165,85	133,97	99,91
5,4	226,63	200,6	163,5	123,2
5,5	272,38	242,9	199,8	151,9
5,6	327,78	294,3	244,2	187,4
5,7	394,93	356,9	298,7	231,4
5,8	476,42	433,3	365,6	285,6
5,9	575,43	526,5	447,7	353,1
6,0	695,87	640,3	548,8	436,5
6,1	842,57	779,5	673,1	540,0
6,2	1021,4	949,9	826,1	668,2
6,3	1239,3	1158,6	1014,6	827,4
6,4	1506,7	1414,5	1247,1	1025,1
6,5	1833,4	1729,6	1533,9	1270,6
6,6	2233,5	2114,6	1888,2	1575,9
6,7	2724,3	2589,3	2326,0	1955,6
6,8	3327,0	3173,7	2867,4	2428,1
6,9	4068,0	3893,9	3537,6	3016,5
7,0	4980,0	4782,3	4367,8	3749,7
7,1	6103,8	5879,2	5397,1	4663,8
7,2	7490,0	7235,0	6674,1	5804,3
7,3	9202,1	8912,4	8259,8	7228,0
7,4	11319	10990	10231	9006,5
7,5	13939	13565	12682	11230
7,6	17185	16760	15733	14010
7,7	21212	20730	19534	17490
7,8	26213	25665	24273	21848

x	$\gamma(x+1,3)$	$\gamma(x+1,4)$	$\gamma(x+1,5)$	$\gamma(x+1,6)$
7,9	32430	31807	30188	27311
8,0	40167	39459	37575	34161
8,1	49805	49000	46808	42757
8,2	61825	60911	58359	53553
8,3	76832	75792	72822	67119
8,4	95585	94404	90947	84179
8,5	119045	117702	113679	105648
8,6	148424	146897	142215	132685
8,7	185251	183516	178065	166755
8,8	231462	229489	223144	209722
8,9	289505	287261	279875	263946
9,0	362480	359929	351330	332426
9,1	454320	451419	441409	418972
9,2	570013	566715	555060	528430
9,3	715895	712144	698575	666967
9,4	900019	895752	879953	842437
9,5	$1,133 \cdot 10^6$	$1,128 \cdot 10^6$	$1,109 \cdot 10^6$	$1,065 \cdot 10^6$
9,6	$1,427 \cdot 10^6$	$1,421 \cdot 10^6$	$1,340 \cdot 10^6$	$1,347 \cdot 10^6$
9,7	$1,799 \cdot 10^6$	$1,793 \cdot 10^6$	$1,768 \cdot 10^6$	$1,705 \cdot 10^6$
9,8	$2,270 \cdot 10^6$	$2,264 \cdot 10^6$	$2,235 \cdot 10^6$	$2,160 \cdot 10^6$
9,9	$2,869 \cdot 10^6$	$2,861 \cdot 10^6$	$2,827 \cdot 10^6$	$2,738 \cdot 10^6$
10,0	$3,628 \cdot 10^6$	$3,619 \cdot 10^6$	$3,579 \cdot 10^6$	$3,474 \cdot 10^6$

2.6.8 Szacunkowe sprawdzanie kryterium wytrzymałości zmęczeniowej

2.6.8.1 Informacje wstępne

Niniejszy p. 2.6.8 pozwala na efektywne wykonanie oszacowania, czy analizowany element połączenia spawanego spełnia kryteria wytrzymałości zmęczeniowej podane w formie wzoru 2.6.5-2 albo 2.6.5-3.

W tym celu można wykorzystać podane w tabeli 2.6.8.2 wartości dopuszczalnych zakresów naprężeń stosowanych z krzywą Wöhlera typu „D” oraz współczynniki z tabeli 2.6.8.3 – dla innych typów krzywych.

Obliczenie można wykonać według zaleceń podanych w 2.6.8.4.

2.6.8.2 Dopuszczalne zakresy naprężeń dla krzywej (wykresu)Wöhlera typu „D”

W tabeli 2.6.8.2 podane są wartości $\Delta\sigma_R$ zakresów naprężeń (zwanymi dalej dopuszczalnymi) stosowanych z krzywą Wöhlera typu „D” albo z odpowiadającą jej krzywą skorygowaną według wymagań 2.5.4 (w celu uwzględnienia korozyjnego oddziaływania środowiska), które sprawiają że stopień zużycia zmęczeniowego $D = 1$ dla zadanych liczb cykli obciążenia $N_L = 4 \cdot 10^7$ albo $N_L = 5 \cdot 10^7$.

Powyższe wartości N_L są typowe dla 20-letniego okresu eksploatacji statku.

Podane w tabeli 2.6.8.2 wartości $\Delta\sigma_R$ zakresów naprężeń są przekraczane z prawdopodobieństwem równym 10^{-4} . Zależą one od współczynnika ξ rozkładu Weibulla. $\Delta\sigma_R$ i ξ określają jednoznacznie rozkład Weibulla w formie wzoru 2.3.2-1 lub 2.3.2-2.

Tabela 2.6.8.2
Wartości zakresów naprężeń $\Delta\sigma_R$, dla których $D = 1$

ξ [-]	$\Delta\sigma_R$, [MPa]			
	Krzywa typu „D”		Krzywa typu „D” skorygowana ze względu na korozję	
	$N_L = 4 \cdot 10^7$	$N_L = 5 \cdot 10^7$	$N_L = 4 \cdot 10^7$	$N_L = 5 \cdot 10^7$
1	2	3	4	5
0,85	207,1	193,6	158,3	147,0
0,86	205,0	191,6	156,5	145,3
0,87	202,8	189,6	154,8	143,7
0,88	200,7	187,6	153,1	142,1

1	2	3	4	5
0,89	198,7	185,7	151,4	140,6
0,90	196,7	183,9	149,8	139,0
0,91	194,7	182,1	148,2	137,6
0,92	192,7	180,3	146,6	136,2
0,93	190,8	178,5	145,1	134,7
0,94	188,0	176,8	143,6	133,3
0,95	187,2	175,1	142,1	131,9
0,96	185,4	173,5	140,7	130,6
0,97	183,7	171,9	139,3	129,3
0,98	182,0	170,3	137,9	128,0
0,99	180,3	168,8	136,6	126,8
1,00	178,7	167,3	135,3	125,6
1,01	177,1	165,8	134,0	124,4
1,02	175,5	164,4	132,7	123,2
1,03	174,0	163,0	131,5	122,0
1,04	172,5	161,6	130,2	120,9
1,05	171,0	160,2	129,1	119,8
1,06	169,5	158,9	127,9	118,7
1,07	168,1	157,6	126,8	117,7
1,08	166,7	156,3	125,7	116,6
1,09	165,2	155,0	124,6	115,6
1,10	164,0	153,8	123,5	114,6

2.6.8.3 Dopuszczalne zakresy naprężeń dla krzywych (wykresów) Wöhlera różnych od typu „D”

Jeżeli szacunkowe sprawdzanie wytrzymałości zmęczeniowej jest wykonywane na podstawie wartości zakresów naprężeń nominalnych, to dopuszczalne wartości $\Delta\sigma_R$ zakresów naprężeń można wyznaczyć dzieląc wartości podane w tabeli 2.6.8.2 przez współczynniki o wartościach podanych w tabeli 2.6.8.3

Tabela 2.6.8.3

Współczynniki do określania dopuszczalnych wartości zakresów naprężeń nominalnych

Typ krzywej Wöhlera	B	C	D	E	F	F2	G	W
Współczynnik	0,64	0,76	1,00	1,14	1,34	1,52	1,83	2,54

2.6.8.4 Sposób wykonania obliczeń

Spełnienie kryteriów w formie wzoru 2.6.5-2 lub 2.6.5-3 można oszacować w następujący sposób:

- przybliżone wartości parametrów D_0 , D_0' , D_k' (2.6.5) dla wartości $\Delta\sigma$ zakresów naprężeń różnych niż podano w tabeli 2.6.8.2 można obliczać zakładając, że stopień D zużycia zmęczeniowego jest wprost proporcjonalny do $\Delta\sigma^3$. Dla wartości $\Delta\sigma = \Delta\sigma_R$ z tabeli 2.6.8.2 $D = 1$;
- wartości stopnia zużycia zmęczeniowego D są wprost proporcjonalne do liczby N_L cykli obciążenia.

3 BEZPOŚREDNIE OBLICZANIE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

3.1 Zasady ogólne

3.1.1 Zastosowanie metody obliczeń sformułowanej w rozdziale 3 Publikacji zalecane jest w przypadkach sprawdzania wytrzymałości zmęczeniowej kadłubów dużych statków budowanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości i kadłubów jednostek o nietypowych proporcjach wymiarowych i podziale przetrzynnym kadłuba.

3.1.2 Bezpośrednie obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba polega na zastąpieniu przybliżonej formy długoterminowego rozkładu zakresów naprężeń przyjmowanej jako rozkład Weibulla (p. 2.3) przez rozkład wyznaczony w wyniku analizy numerycznej obciążeń kadłuba na fali.

3.1.3 W obliczeniach rozwiązywane są liniowe równania ruchu statku o nieodkształcalnym kadłubie na fali regularnej, przy wykorzystaniu teorii przepływu potencjalnego cieczy idealnej i uznanych przez PRS programów komputerowych, a następnie obliczane są przyspieszenia kadłuba i ciśnienia dynamiczne oddziaływania wody (z zewnątrz) oraz tzw. funkcje przenoszenia zakresów naprężeń dynamicznych – z zastosowaniem MES (4.1 i 4.2) albo z zastosowaniem zakresów naprężeń nominalnych i współczynników koncentracji naprężeń, według zasad podanych w 2.2.

W następnym etapie obliczeń wykonywana jest krótkoterminowa prognoza zakresów naprężeń przy zastosowaniu metody analizy widmowej i rozkładu Rayleigha przybliżającego funkcję gęstości prawdopodobieństwa zakresów naprężeń (3.2).

Końcowym etapem obliczeń jest wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa długoterminowego rozkładu zakresów naprężeń i liczby cykli naprężeń w ciągu okresu eksploatacji statku (3.3) oraz trwałości zmęczeniowej analizowanego elementu konstrukcji – według zasad podanych w 3.4.

Krzywe (wykresy) Wöhlera należy przy tym dobrać według zasad podanych w 2.4 i dokonać ich korekty według wymagań 2.5.

3.1.4 W obliczeniach należy uwzględnić najczęściej stosowane stany załadowania statku i średnie czasy ich występowania. Obliczenia według 3.1.2 należy wykonać dla projektowej wartości prędkości statku. W przypadku masowców i zbiornikowców wystarczy rozpatrzyć tylko stan pełnego załadowania i stan balastowy. Należy założyć, że statek w ciągu 15% okresu eksploatacji przebywa w portach i w stocznjach remontowych, gdzie wartości naprężeń dynamicznych w konstrukcji są z założenia zerowe.

3.1.5 W przypadku analizy wytrzymałości zmęczeniowej identycznych elementów konstrukcji wzdłużnych wiązań kadłuba należy obliczyć parametr zużycia zmęczeniowego w przekroju owręża i przekrojach wręgowych odległych o $0,2 L_0$ od przekroju owręża (w stronę dziobu i rufy).

Ocenę wytrzymałości zmęczeniowej, której wyniki obowiązują z założenia w całej środkowej części statku, należy wykonać na podstawie obliczonej największej wartości parametru D zużycia zmęczeniowego.

3.2 Prognoza krótkoterminowa zakresów naprężeń

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.

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 kątownej 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).

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].

3.2.4 Prawdopodobieństwo zdarzenia, że w warunkach falowania określonych parametrami H_s i T_1 (patrz 3.2.2) i przy kącie kursowym μ statku względem kierunku falowania zakres naprężeń $\Delta\sigma$ przekroczy poziom $\Delta\sigma_0$, określone jest rozkładem Rayleigha:

$$\Pr(\Delta\sigma \geq \Delta\sigma_0) = \exp\left(-\frac{\Delta\sigma_0^2}{2m_0}\right) \quad (3.2.4-1)$$

gdzie:

m_0 – moment rzędu zerowego funkcji gęstości widmowej zakresów naprężeń, obliczany według wzoru 3.2.1-1.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa $f(\Delta\sigma)$ zakresów naprężeń, odpowiadająca wzorowi 3.2.4-1, dana jest wzorem:

$$f(\Delta\sigma) = \frac{\Delta\sigma}{m_0} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma^2}{m_0}\right) \quad (3.2.4-2)$$

gdzie:

m_0 – patrz 3.2.1.

3.3 Prognoza długoterminowa zakresów naprężeń

3.3.1 Prognozę długoterminową dla wartości zakresów naprężeń $\Delta\sigma$ należy wykonać w celu wyznaczenia funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f_i(\Delta\sigma)$ zakresów naprężeń w całym okresie eksploatacji statku.

Funkcję $f_i(\Delta\sigma)$ można wyznaczyć z następującego wzoru przybliżonego:

$$f_i(\Delta\sigma) = \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_K} \sum_{l=1}^{N_L} W_{ijkl} \frac{\Delta\sigma}{m_{0ijkl}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma^2}{m_{0ijkl}}\right) P_{ij} P_k P_l \quad (3.3.1-1)$$

gdzie:

N_H – liczba uwzględnianych wartości znaczącej wysokości fali H_s ;

N_T – liczba uwzględnianych wartości charakterystycznego okresu fali T_0 ;

N_K – liczba uwzględnianych wartości kątów kursowych statku względem kierunku fal;

N_L – liczba uwzględnianych stanów załadowania statku;

P_{ij} – prawdopodobieństwo wystąpienia warunków falowania określonych wartością H_{si} znaczącej wysokości fali i wartością T_{0j} charakterystycznego okresu;

P_k – prawdopodobieństwo wystąpienia kąta kursowego μ_k ;

P_l – prawdopodobieństwo wystąpienia stanu załadowania statku numer ‘1’.

m_{0ijkl} – wartość m_0 odpowiadająca i -tej wartości H_s itd., obliczana według wzoru 3.2.1-1.

W_{ijkl} – współczynnik uwzględniający różne wartości uśrednionych prędkości zmian $\Delta\sigma$ odpowiadających poszczególnym stanom morza, przy danym kącie kursowym i w określonym stanie załadowania statku, obliczany ze wzoru:

$$W_{ijkl} = \frac{a_{ijkl}}{a_0} \quad (3.3.1-2)$$

gdzie:

$$a_{ijkl} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2ijkl}}{m_{0ijkl}}}, \quad [1/s] \quad (3.3.1-3)$$

$$a_0 = \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_K} \sum_{l=1}^{N_L} a_{ijkl} P_{ij} P_k P_l, \quad [1/s] \quad (3.3.1-4)$$

m_{2ijkl} – wartość m_2 odpowiadająca i -tej wartości H_s itd., obliczana według wzoru 3.2.1-1;

a_{ijkl} – oznacza średnią wartość liczby cykli $\Delta\sigma$ w jednostce czasu (w 1 sekundzie).

Wartości N_H , N_T i P_{ij} należy ustalać według 3.3.2, wartości N_k i P_k – według 3.3.4, a wartość N_l – według wymagań 3.1.4 i 2.6.2.

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]	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5
H_s [m]										
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]	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	SUMA
H_s [m]									
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.

3.3.3 Jeżeli klasyfikowany statek ma z założenia pływać na ściśle określonej trasie żeglugowej, to PRS może zaakceptować konstrukcję kadłuba spełniającą kryterium wytrzymałości zmęczeniowej sformułowane w 2.6.5, gdzie stopień zużycia zmęczeniowego D został wyznaczony przy zastosowaniu tabeli o strukturze jak tabela 3.3.2, ale z wartościami dla założonej trasy statku.

Wartości P_{ij} powinny opierać się na dostępnych wiarygodnych danych statystycznych i należy przedstawić je PRS do zaakceptowania.

3.3.4 Prognozy krótkoterminowe należy wykonać dla wartości kątów kursowych μ zmieniających się z krokiem nie większym niż $\frac{\pi}{6}$ rd. Można więc wykonać obliczenia dla $\mu = 0, \frac{\pi}{6}, \frac{2\pi}{6}, \frac{3\pi}{6}, \dots, \frac{11\pi}{6}$ rd,

a we wzorze 3.3.1-1 przyjąć $P_k = \text{const} = \frac{1}{12}$, $N_k = 12$, tzn. wszystkie wartości kątów kursowych μ traktować jako jednakowo prawdopodobne.

3.4 Obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej

3.4.1 W przypadku wyznaczania funkcji $Y(\omega)$ przenoszenia zakresów naprężeń $\Delta\sigma$ dla wzdłużnych wiązań kadłuba należy zsumować zakresy naprężeń wywołanych zginaniem ogólnym kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej, skręcaniem (dla statków z szerokimi otworami lukowymi) oraz zginaniem lokalnym na skutek działania ciśnień wody (z zewnątrz) i ładunku (od wewnątrz).

W obliczeniach należy uwzględnić przesunięcia fazowe pomiędzy wymienionymi wyżej składnikami zakresów naprężeń.

Należy pamiętać, że funkcje $Y(\omega)$ to wartości zakresów naprężeń nominalnych albo geometrycznych (zależnie od stosowanego wykresu Wöhlera) występujących na fali o jednostkowej wartości amplitudy fali (amplituda jest połową wysokości fali).

3.4.2 Obliczenia $Y(\omega_E, \mu)$ należy wykonać dla co najmniej 15 wartości częstości kołowej ω fali regularnej, regularnie rozłożonych w przedziale od 0,1 1/s do 1,2 1/s.

3.4.3 Zakresy naprężeń $\Delta\sigma$ (funkcje $Y(\omega_E, \mu)$) w elementach konstrukcji należy wyznaczać stosując metodę obliczania naprężeń według 4.1, a następnie zastosować współczynniki koncentracji naprężeń według 2.2.8 (jeżeli nie są wprost wykorzystywane zakresy naprężeń nominalnych z odpowiednimi wykresami Wöhlera) albo bezpośrednio obliczać naprężenia geometryczne według wymagań 4.3.

3.4.4 Obliczając ciśnienia dynamiczne w rejonie wodnicy pływania należy stosować metodę analogiczną do sformułowanej w 2.2.4.3, tzn. zredukować wartości zakresów ciśnień na burcie przy pomocy współczynnika k_d .

Wartości T_d (rys. 2.2.4.3) należy obliczać według wzoru (2.2.4.3-2), podstawiając tam $k_{pr} = 1$ oraz bezpośrednio obliczone p_{db}^* (po wykonaniu prognozy długoterminowej) na poziomie wodnicy pływania, o wartości przekraczanej z prawdopodobieństwem 10^{-4} .

3.4.5 Obliczając ciśnienia dynamiczne w zbiornikach ładunkowych lub balastowych należy zastosować wzory 2.2.4.4, podstawiając tam $k_{pr} = 1$ oraz bezpośrednio obliczane na fali regularnej wartości amplitud przyspieszeń a_L, a_T, a_V . W miejsce zakresu ciśnienia dynamicznego należy przyjąć największą spośród wartości $\Delta p_L, \Delta p_T, \Delta p_V$.

3.4.6 Należy spełnić następujące kryterium wytrzymałości zmęczeniowej:

$$D = \sum_{i=1}^{I_p} \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (3.4.5-1)$$

gdzie:

$$n_i = f_i(\Delta\sigma_i) N_L \Delta\sigma_i;$$

f_i – funkcja gęstości prawdopodobieństwa długoterminowego rozkładu zakresów naprężeń, obliczana według 3.3.1;

$I_p, \Delta\sigma_i, \Delta\sigma_i$ – jak w 2.6.5;

N_L – liczba cykli w ciągu okresu eksploatacji statku, obliczana ze wzoru:

$$N_L = 0,85 a_0 N_S \quad (3.4.5-2)$$

a_0 – parametr obliczony według wzoru 3.3.1-4;

N_S – liczba sekund w ciągu założonego okresu eksploatacji statku (co najmniej 20 lat).

N_i we wzorze 3.4.5-1 oznacza liczbę cykli obciążenia obliczaną według równania 2.4.3 stosowanego wykresu Wöhlera dla wartości zakresu naprężeń odpowiadającej skorygowanej wartości $\Delta\sigma_i$, według wymagań 2.5.

W obliczeniach należy stosować zasady wyboru wykresów Wöhlera według wymagań 2.4 oraz zasady ich korygowania sformułowane w 2.5.

W przypadku elementów konstrukcji, które nie są skutecznie chronione przed korozją, należy spełnić warunek w formie równania 2.6.5-3, obliczając D' i D_K' według wzoru 3.4.5-1.

4 OBLICZANIE NAPRĘŻEŃ METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

4.1 Ogólne zasady obliczania naprężeń

4.1.1 Cel obliczeń

Zastosowanie bezpośrednich obliczeń naprężeń w kadłubie statku metodą elementów skończonych jest konieczne, bądź celowe w następujących sytuacjach:

- analizowanego elementu konstrukcji nie ma w tabeli 2.4.2 podającej klasyfikację elementów konstrukcji spawanych, albo w 2.2.8 nie podano odpowiedniej wartości współczynnika koncentracji naprężeń;
- wykonywane są bezpośrednie obliczenia długoterminowych rozkładów obciążeń konstrukcji według zasad podanych w rozdziale 3.

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 linio-wo-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.

4.1.3 Szczegółowe wymagania dla modelu MES do obliczania naprężeń nominalnych

4.1.3.1 Podział konstrukcji kadłuba (albo fragmentu kadłuba) na elementy skończone powinien zapewniać wystarczająco dokładne wyznaczenie naprężeń nominalnych, z uwzględnieniem następujących efektów:

- zginania i ścinania ogólnego kadłuba w płaszczyznach poziomej i pionowej;
- skręcania kadłuba (w przypadku statków z szerokimi otworami lukowymi);
- zginania i ścinania wiązarów kadłuba.

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.

4.1.3.2 Model MES powinien obejmować przynajmniej połowy dwóch sąsiednich ładowni. Zalecane jest jednak modelowanie konstrukcji w obrębie trzech kolejnych ładowni.

4.1.3.3 W przypadku takich statków jak kontenerowce, rorowce, statki pasażerskie i katamarany oraz inne obiekty pływające o specyficznym podziale wewnętrznym zalecane jest zastosowanie modelu MES całego kadłuba.

4.1.3.4 Konstrukcję należy modelować przy pomocy tarczowych lub powłokowych elementów skończonych.

Usztywnione panele należy modelować przy pomocy elementów o własnościach ortotropowych.

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

Usztywnienia mogą być także modelowane w formie elementów belkowych. Dopuszczalne jest modelowanie mocników wiązarów przy pomocy elementów prętowych.

4.1.3.5 Obciążenia przykładane do modelu MES powinny być jak najdokładniej zrównoważone.

Na końcach modelu opisanego w 4.1.3.2 należy przyłożyć naprężenia normalne i styczne statycznie równoważne momentom zginającym i siłom poprzecznym (oraz ewentualnie momentom skręcającym) wyznaczanym w ramach analizy wytrzymałości ogólnej kadłuba.

4.1.3.6 Przy modelowaniu konstrukcji kadłuba do obliczeń MES i interpretacji otrzymanych wyników obliczeń należy stosować wymagania podane w Publikacjach PRS typu „P” dotyczących analizy wytrzymałości kadłubów poszczególnych typów statków (ważniejsze Publikacje wymieniono w 2.2.6.6).

4.2 Obliczanie naprężeń geometrycznych

4.2.1 Cel i zakres obliczeń

Precyzyjne modele MES należy stosować do fragmentów konstrukcji kadłuba zawierających elementy konstrukcji zagrożone powstawaniem pęknięć zmęczeniowych (w rejonach karbów).

W szczególności obliczenia z zastosowaniem takich modeli dotyczą węzłkowych połączeń spawanych usztywnień lub wiązarów, skrzyżowań usztywnień z wiązarami lub grodziami, wycięć w środnikach wiązarów, naroży luków itp.

4.2.2 Obciążenie modelu

Zalecane jest zastosowanie precyzyjnego modelu MES fragmentu konstrukcji jako superelementu w modelu zgrubnym (4.1.3). Wówczas przy obliczaniu naprężeń w drugim etapie obliczeń (4.1.2) na brzegu modelu można wymusić wartości przemieszczeń węzłów otrzymane w wyniku rozwiązania modelu zgrubnego.

Jeżeli precyzyjny model MES jest tworzony niezależnie od modelu zgrubnego, to na brzegu modelu należy zadać wartości obciążeń statycznie równoważnych wartościom naprężeń obliczanym w wyniku rozwiązania modelu zgrubnego.

Zasięg precyzyjnego modelu MES (jego wymiary) powinien być przy tym odpowiednio duży, aby zminimalizować wpływ przybliżonych obciążeń na brzegu na wartości naprężeń w analizowanym elemencie konstrukcji, położonym z reguły w środkowym rejonie modelu.

4.2.3 Uwagi ogólne dotyczące obliczania naprężeń geometrycznych

Większość skłonnych do pęknięć zmęczeniowych elementów w konstrukcji kadłuba statku charakteryzuje się gwałtownymi zmianami kształtu – głównie w miejscach połączeń wzajemnie prostopadłych płyt. Obliczanie naprężeń w takich miejscach z zastosowaniem MES prowadzi do otrzymania ich nieskończenie dużych wartości, jeżeli wymiary stosowanych elementów skończonych dążą do zera.

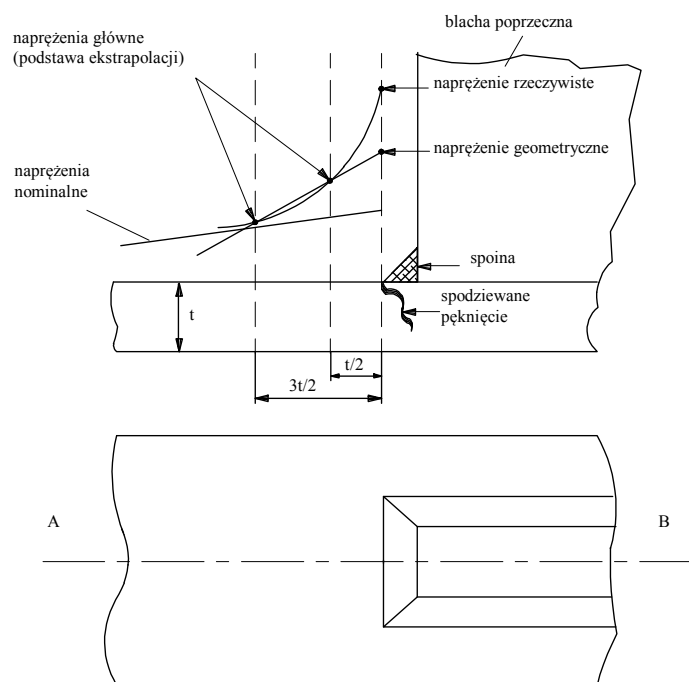
Aby prawidłowo zinterpretować wyniki obliczeń MES oraz zastosować je do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie jednego tylko wykresu Wöhlera (w niniejszej Publikacji dla połączeń spawanych jest to wykres DEN typu „D”) niezależnie od cech konstrukcji analizowanego elementu, należy stosować ściśle określony sposób podziału na elementy skończone oraz specjalną procedurę zamiany (ekstrapolacji) obliczanych naprężeń w elementach skończonych na naprężenia geometryczne, sformułowaną w 4.2.4.

4.2.4 Opis procedury obliczania naprężeń geometrycznych

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 wyznaczane poprzez interpolację liniową wartości naprężeń głównych na powierzchni blachy, w węzłach poszczególnych elementów skończonych leżących na linii AB.

4.2.4.2 Wartości zakresów naprężeń geometrycznych obliczane według algorytmu podanego w 4.2.4.1 należy pomnożyć przez współczynnik liczbowy $C_g = 1,05$ i tak otrzymaną wartość stosować do obliczania wytrzymałości zmęczeniowej, stosując wykres Wöhlera typu „D” (2.4.3).



Rys. 4.2.4.1 Definicja naprężeń geometrycznych

4.2.4.3 Jeżeli dokładność wykonania konstrukcji odstąpi znacznie od przyjętej jako standardowa to wartość naprężeń geometrycznych należy obliczać dla geometrii rzeczywistej.

4.2.4.4 Jeżeli obliczane są naprężenia na krawędziach blach (wycięcia w środnikach wiązarów, otwory w poszyciu, naroża luków itp.), to wymiary boków stosowanych elementów skończonych nie powinny być większe od grubości blachy dla elementów 4-węzłowych i od podwójnej grubości blachy – dla elementów 8-węzłowych.

Wartości naprężeń głównych na krawędzi blachy można przyjąć wprost jako naprężenia obliczane przez program komputerowy w elementach prętowych o pomijalnie małej sztywności, umieszczonych wzdłuż krawędzi blachy.

Wyznaczone w ten sposób wartości naprężeń należy stosować wprost do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej, stosując wykres Wöhlera typu „B” lub „C”, w zależności od sposobu obróbki i stanu krawędzi blachy (tab. 2.4.2).

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.

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.