

# PODSTAWY KONSTRUKCJI OKRĘTÓW

Materiały do wykładu  
WOiO PG, studia I stopnia, sem.3

Opracował: dr inż. Marian Bogdaniuk

Gdańsk 2008

## Spis treści

- Literatura
- I. WSTĘP
- II. KONWENCJE MIĘDZYNARODOWE I TOWARZYSTWA  
KLASYFIKACYJNE
- III. DEFINICJE I OKREŚLENIA. PODSTAWOWE CECHY KONSTRUKCJI  
KADŁUBA STATKU
- IV. PODZIAŁ PRZESTRZENNY KADŁUBA STATKU. POULARNE TYPY  
STATKÓW
- V. OBCIĄŻENIA KADŁUBA STATKU
- VI. NAPRĘŻENIA W ELEMENTACH KONSTRUKCJI KADŁUBA. KRYTERIUM  
NAPRĘŻEŃ DOPUSZCZALNYCH
- VII. WYBOCZENIE ELEMENTÓW KONSTRUKCJI
- VIII. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA ELEMENTÓW KONSTRUKCJI  
KADŁUBA STATKU
- IX. KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE ( PODSUMOWANIE )
- X. OCHRONA PRZED KOROZJĄ. NADDATKI KOROZYJNE
- XI. MATERIAŁY NA KADŁUBY STATKÓW
- XII. POŁĄCZENIA SPAWANE ELEMENTÓW KONSTRUKCJI
- XIII. KONSTRUKCJA POSZCZEGÓLNYCH REJONÓW KADŁUBA STATKU
  - A. WSTĘP
  - B. DNO PODWÓJNE
  - C. DNO POJEDYNCZE
  - D. POKŁADY
  - E. BURTY
  - F. GRODZIE I PRZEGRODY
  - G. POSZYCIE KADŁUBA. POSZYCIE POKŁADÓW
  - H. SKRAJNE CZĘŚCI KADŁUBA
  - I. NIEKTÓRE ISTOTNE ( POZOSTAŁE ) ELEMENTY KONSTRUKCJI  
KADŁUBA STATKU
- XIV KADŁUBY STATKÓW ŚRÓDLĄDOWYCH
- XV DOKI PŁYWAJĄCE
- XVI OBIEKTY OCEANOTECHNICZNE

## Literatura

1. Polski Rejestr Statków, *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich, Cz.II – Kadłub*, Gdańsk, 2007.
2. Robert Taggart(Editor), *Ship Design and Construction*, The soc. Of Nav. Arch. And Marine Eng., New York,1980.
3. S.Wewiórski, K.Wituszyński, *Konstrukcja stalowego kadłuba okrętowego*, Wyd. Morskie Gdańsk, 1977.
4. W.Więckiewicz, *Budowa kadłubów statków morskich*, Dział wyd. WSM w Gdyni, 1999.
5. L.Grzybowski, B.Łączyński, A.Narodzonek, J.Puchalski, *Kontenery w transporcie morskim*, TRADEMAR, Gdynia, 1977.
6. K.Pałucha, J.Puchalski, A.Śliwiński, *Statki poziomego ładowania*, TRADEMAR, Gdynia, 1996.
7. Polski Rejestr Statków, Publikacja Nr 45/P, *Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku*, Gdańsk, 1998.
8. S.P.Timoshenko, J.M.Gere, *Teoria stateczności sprężystej*, Wyd. „Arkady”, 1961.
9. J. Więckowski, *Mechanika konstrukcji okrętowych*, skrypt Politechniki Gdańskiej, 1985.
10. Biuro Projektowo Konstrukcyjne Stoczni Gdańskiej, Katalog K-72 typowych elementów kadłuba.
11. Polski Rejestr Statków, *Przepisy klasyfikacji i budowy statków śródlądowych, Cz.II – Kadłub*, Gdańsk, 2005.
12. Polski Rejestr Statków, *Przepisy klasyfikacji i budowy doków pływających, Cz.II – Kadłub i wyposażenie kadłubowe*, Gdańsk, 2007.
13. Doc. Dr inż. Stanisław Karlic, *Zarys górnictwa morskiego*, Wydawnictwo „Śląsk”, 1983.
14. Det Norske Veritas, *Rulet for Classification of Mobile Offshore Units, Part 3, Charter 1, Structural Design, General*, July 1996.
15. Polski Rejestr Statków, Publikacja Nr 18/P, *Analiza strefowej wytrzymałości kadłuba masowca*, Gdańsk, 1995.
16. Det Norske Veritas, Classification Notes No. 31.1, *Strength Analysis of Hull Structures in Bulk Carriers*, June 1999.

## I. WSTĘP

Niniejsze opracowanie stanowi materiał pomocniczy do wykładu PODSTAWY KONSTRUKCJI OKRĘTÓW. Wykład jest adresowany do studentów studiów I stopnia na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, semestr 3. W opracowaniu omówiono podstawowe zagadnienia związane z konstrukcją kadłubów statków morskich, statków śródlądowych, doków pływających i pływających obiektów oceanotechnicznych.

Pod pojęciem **konstrukcja** należy rozumieć rozmieszczenie i wymiary elementów tworzących pewien obiekt, materiał z którego zostały wykonane poszczególne elementy oraz sposób połączeń poszczególnych elementów.

Pod pojęciem **konstruowanie** należy natomiast rozumieć działania doprowadzające do ustalenia parametrów wymienionych w definicji konstrukcji.

## II. KONWENCJE MIĘDZYNARODOWE I TOWARZYSTWA KLASYFIKACYJNE

Statki uprawiające żeglugę międzypaństwową muszą spełniać pewne wymagania (ograniczenia) zawarte w konwencjach międzynarodowych i przepisach klasyfikacji i budowy statków, publikowanych przez towarzystwa klasyfikacyjne.

### **KONWENCJE MIĘDZYNARODOWE**

Konwencje międzynarodowe dotyczące bezpieczeństwa żeglugi są opracowywane przez **IMO** (Inter- Governmental Maritime Organization; Międzynarodowa Organizacja Morska). IMO jest specjalistyczną agendą ONZ (Organizacja Narodów Zjednoczonych). Celem działalności IMO jest kooperacja pomiędzy rządami państw członkowskich w zagadnieniach dotyczących bezpieczeństwa żeglugi i ustalanie zasad żeglugi zapewniających pewien minimalny standard bezpieczeństwa (bezpieczeństwo załóg statków, pasażerów, transportowanych ładunków, statków i ochrona akwenów przed zanieczyszczeniami). Poziom bezpieczeństwa uważany za wystarczający jest wymuszany dzięki zapisom kilku międzynarodowych konwencji, kodów i rezolucji. Zagadnienia te są omówione pobieżnie w niniejszym rozdziale.

Zakres działalności IMO jest dość szeroki. Szczegółowymi zagadnieniami dotyczącymi bezpieczeństwa żeglugi zajmuje się organ IMO o nazwie **MSC** (Maritime Safety Committee; Komitet Bezpieczeństwa). Członkowie MSC są wybierani na 2-letnie kadencje. MSC dzieli się na podkomitety zajmujące się różnymi szczegółowymi zagadnieniami takimi jak np. pomiar tonażu statków, niezatapialność, ochrona przeciwpożarowa, itp.

Konwencje międzynarodowe są opracowywane przez MSC. Po zatwierdzeniu przez Zgromadzenie Ogólne ONZ i ratyfikacji przez poszczególne państwa członkowskie ONZ stanowią prawo dotyczące żeglugi międzypaństwowej.

Niżej wymieniono kilka najważniejszych konwencji i opisano krótko ich wpływ na konstrukcję kadłubów statków.

### **MIĘDZYNARODOWA KONWENCJA O POMIERZANIU STATKÓW** (INTERNATIONAL CONVENTION ON TONNAGE MEASUREMENT, 1969 r.)

W konwencji podano ujednolicony sposób mierzenia objętości ładowni i innych pomieszczeń użytkowych statków. Miarą tych objętości jest tzw. tonaż brutto statku (BRT). Wielkość BRT decyduje np. o wielkości opłat portowych pobieranych od statków. 1 BRT to objętość 100 stóp sześciennych czyli 2,83 m<sup>3</sup>.

### **MIĘDZYNARODOWA KONWENCJA O LINIACH ŁADUNKOWYCH**

( INTERNATIONAL CONVENTION ON LOAD LINES OF SHIPS – ILLC, 1966 R.)

Zapisy w konwencji dotyczą głównie zagadnień stateczności i wartości tzw. wolnej burty. Wymuszają więc odpowiednio duże wartości ilorazu szerokości statku do długości i wysokości bocznej do zanurzenia. W sposób oczywisty decydują więc pośrednio o obciążeniach, które działają na kadłub statku i o wymaganych wymiarach wiązań statku.

### **MIĘDZYNARODOWA KONWENCJA O BEZPIECZEŃSTWIE ŻYCIA NA MORZU**

( INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE SAFETY OF LIFE AT SEA ; SOLAS , 1974 r.)

Konwencja ta dotyczy szerokiego zakresu zagadnień związanych z bezpieczeństwem żeglugi. Świadczy o tym umieszczony niżej spis rozdziałów w jej tekście :

- I. Postanowienia ogólne
- II. Budowa – konstrukcja, niezatapialność i stateczność, urządzenia maszynowe i instalacje elektryczne; ochrona pożarowa, wykrywanie i gaszenie pożarów
- III. Środki i urządzenia ratunkowe
- IV. Radiokomunikacja
- V. Bezpieczeństwo żeglugi
- VI. Przewóz ładunku
- VII. Przewóz towarów niebezpiecznych
- VIII. Statki z napędem jądrowym
- IX. Zarządzanie bezpieczną eksploatacją statków
- X. Środki bezpieczeństwa dla jednostek szybkich
- XI. Środki specjalne dla podniesienia bezpieczeństwa na morzu
- XII. Dodatkowe środki bezpieczeństwa dla masowców

### **MIĘDZYNARODOWA KONWENCJA O ZAPOBIEGANIU ZANIECZYSZCZENIOM MÓRZ PRZEZ STATKI ( MARPOL 73/78)**

Konwencja dotyczy przede wszystkim statków transportujących ropę naftową, produkty przerobu ropy i chemikalia. Zapisy w konwencji ograniczają wielkość poszczególnych zbiorników ładunkowych, wymuszają zastosowanie na tych statkach dna podwójnego i podwójnej burty, itp. Wpływ tej konwencji na konstrukcję kadłubów statków jest bardzo istotny.

Mniej ważne konwencje z punktu widzenia konstrukcji kadłubów statków to:

- CORLEGS 1972 ( CONVENTION – REGULATION FOR PREVENTING COLLISIONS AT SEA)
- 1995 AMENDMENTS TO THE 1978 INTERNATIONAL CONVENTION ON STANDARDS OF TRAINING, CERTIFICATION AND WATCHKEEPING.

IMO opracowuje także tzw. **KODY i REZOLUCJE**, które są szczegółowymi uzupełnieniami lub interpretacjami Konwencji.

Przykładowe kody dotyczą np. takich kwestii jak:

- przewóz ziarna;
- przewóz drewna na pokładzie zewnętrznym;



- bezpieczny transport ładunków masowych;
- transport chemikaliów luzem.

Wymagania konwencji dotyczą przede wszystkim takich kwestii jak :

- stateczność;
- ochrona przeciwpożarowa;
- środki ratownicze na statkach;
- wyposażenie statku w środki sygnałowe i radiowo- komunikacyjne;
- ochrona mórz przed zanieczyszczeniami.

Wiele standardów bezpieczeństwa żeglugi pozostaje w gestii **towarzystw klasyfikacyjnych**, omawianych w dalszej części niniejszego rozdziału. Standardy te dotyczą np. tak istotnych zagadnień jak:

- konstrukcja i wytrzymałość kadłuba statku;
- instalacje napędowe, elektryczne, chłodnicze, itp.

Istnienie towarzystw klasyfikacyjnych umożliwia i uzasadnia pewne zapisy w konwencjach. W konwencjach ILLC lub SOLAS są np. zapisy, że kadłuby statków budowane zgodnie ze standardami podanymi w Przepisach klasyfikacji i budowy statków publikowanych przez uznane przez IMO towarzystwa klasyfikacyjne, są uważane za wystarczająco bezpieczne.

Istotnym elementem systemu bezpieczeństwa żeglugi są instytucje kontrolne, uprawnione między innymi do sprawdzania statków wpływających na wody terytorialne poszczególnych państw na zgodność z wymaganiami konwencji IMO. W Polsce są to **Urzędy Morskie** z siedzibami w Gdyni, Słupsku i Szczecinie.

Instytucje te są uprawnione do kontrolowania statków. Zakres kontroli może dotyczyć np. takich zagadnień jak:

- stan techniczny statku;
- wyposażenie statku w środki ratunkowe, łączności, ochrony przeciwpożarowej, itp;
- skład i kwalifikacje załogi;
- prowadzenie ćwiczeń alarmowych i zapisów w dzienniku okrętowym.

### **TOWARZYSTWA KLASYFIKACYJNE**

Towarzystwa klasyfikacyjne to niezależne instytucje formułujące pewne standardy dotyczące budownictwa okrętowego i sprawujące nad nim nadzór techniczny. Istnienie towarzystw klasyfikacyjnych uzasadnia ich ogromne doświadczenie zgromadzone w ciągu nieprzerwanego funkcjonowania przez wiele lat ( w wielu przypadkach ponad 100 lat) i znaczny potencjał badawczy.

Działalność towarzystw klasyfikacyjnych sprowadza się przede wszystkim do takich czynności jak:

- nadawanie klasy statkom i obiektom oceanotechnicznym;
- prowadzenie ksiąg rejestru;
- opracowywanie i regularna modyfikacja Przepisów klasyfikacji i budowy statków;
- zatwierdzanie dokumentacji technicznej statków;
- nadzór nad budową a następnie eksploatacją statków.

Klasa statku oznacza przyporządkowanie statku do pewnej grupy posiadającej wspólne cechy. Świadcstwo klasy jest natomiast rodzajem certyfikatu bezpieczeństwa.

Księga rejestru stanowi spis obiektów posiadających klasę danego towarzystwa klasyfikacyjnego. Stanowi ona swego rodzaju bazę danych zawierającą informacje o

aktualnym stanie technicznym statków. Jest to cenne źródło informacji dla firm ubezpieczeniowych.

Opracowywanie i aktualizacja Przepisów klasyfikacji i budowy statków ( lub obiektów oceanotechnicznych) to podstawowy obszar aktywności towarzystw klasyfikacyjnych. W Przepisach sformułowane są standardy bezpieczeństwa, które muszą spełnić statki aby otrzymać „klasę”. Przepisy są tworzone lub modyfikowane na podstawie gromadzonej przez towarzystwo klasyfikacyjne wiedzy i doświadczenia wynikającego z przeglądów statków, ich awarii, itp. Prowadzone są także badania naukowe na rzecz rozwoju Przepisów.

Zatwierdzanie dokumentacji technicznej projektowanych statków daje możliwość skorygowania projektu – aby spełnić wymagania Przepisów.

Nadzór nad budową a następnie stanem technicznym eksploatowanych statków pozwala uniknąć błędów w trakcie budowy a następnie zapewnić bezpieczeństwo statków eksploatowanych.

### **IACS** (*International Association of Classification Societies*)

Towarzystwa klasyfikacyjne utrzymują się z opłat pobieranych od armatorów za nadzór techniczny nad statkami. Aby uniknąć zaniżania standardów bezpieczeństwa wskutek konkurencji między poszczególnymi towarzystwami klasyfikacyjnymi, najważniejsze z nich postanowiły nawiązać sformalizowaną współpracę i w 1968 roku powołano IACS. Współpraca polega na stosowaniu wielu szczegółowych wspólnych wymagań w Przepisach poszczególnych towarzystw ( są to tzw. *Unfied Requirements* ) lub nawet wspólnych Przepisów ( *Common Rules* – CR ). Opracowano np. i wdrożono w 2006 r. CR dla tankowców i masowców. W ramach IACS stosowane są także jednolite standardy budowy i napraw statków oraz jednolite procedury nadzoru nad statkami.

Do IACS należą następujące towarzystwa klasyfikacyjne ( przy niektórych z nich podano rok założenia):

1. Lloyd's Register of Shipping ( LR; brytyjskie; 1760 r.)
2. American Bureau of Shipping ( ABS; 1867 r.)
3. Nippon Kaiji Kyokai ( NKK; japońskie; 1899 r.)
4. Det Norske Veritas ( DnV; norweskie; 1864 r.)
5. Bureau Veritas ( BV; francuskie; 1828 r.)
6. Germanischer Lloyd ( niemieckie)
7. Chinese Classification Society ( CCS; chińskie)
8. Morskoj Register Sudov ( MRS; rosyjskie)
9. Korean Register ( KR; koreańskie)
10. Registro Italiano Navale ( RINA; włoskie).

Największe z powyższych towarzystw klasyfikacyjnych ( 4 pierwsze pozycje na liście) mają w księgach rejestru po 4 do 8 tysięcy statków o tonażu powyżej 100 BRT; klasyfikowany przez każde z nich tonaż statków to około 100 milionów BRT.

### **Polski Rejestr Statków** ( PRS; 1936 r.)

Wiele mniejszych towarzystw klasyfikacyjnych funkcjonuje poza strukturami IACS. Wśród nich jest PRS, klasyfikujący statki o łącznym tonażu ok. 2 miliony BRT ( stan w r. 2008).

### Umiejscowienie towarzystw klasyfikacyjnych w systemie bezpieczeństwa żeglugi

System bezpieczeństwa tworzą następujące elementy:

1. Armatorzy ( statki)

2. IMO (konwencje międzynarodowe)
3. Towarzystwa klasyfikacyjne (Przepisy; nadzór techniczny)
4. Instytucje ubezpieczeniowe.

Pomiędzy elementami powyższego systemu występują sprzężenia.

Towarzystwa klasyfikacyjne w swych przepisach umieszczają pewne zapisy z konwencji i odwrotnie – pewne wymagania konwencji zostały opracowane i zaproponowane do wdrożenia w zapisach konwencji przez towarzystwa klasyfikacyjne.

Instytucje ubezpieczeniowe zasięgają oficjalnej opinii o stanie technicznym statków w towarzystwach klasyfikacyjnych.

Elementy systemu o pozycjach 2 do 3 wpływają na „kształt” techniczny statku i na jego koszt budowy i eksploatacji.

### ***Przepisy budowy i klasyfikacji statków***

Wymagania Przepisów dotyczą całego statku, tzn. kadłuba, instalacji napędowej, wszelkich urządzeń i wyposażenia, materiałów, procesu technologicznego budowy, itp. Przykładowo, Przepisy PRS składają się z następujących części:

Cz. I - Zasady klasyfikacji

Cz. II – Kadłub

Cz. III – Wyposażenie kadłubowe

Cz. IV – Stateczność i niezatapialność

Cz. V – Ochrona przeciwpożarowa

Cz. VI – Urządzenia maszynowe i urządzenia chłodnicze

Cz. VII – Silniki, mechanizmy, kotły i zbiorniki ciśnieniowe

Cz. VIII – Urządzenia elektryczne i automatyka

Cz. IX – Materiały i spawanie

Dodatkowo PRS publikuje tzw. Publikacje typu „P” (mają one rangę Przepisów) dotyczące różnych szczegółowych zagadnień oraz publikacje typu „I” – o charakterze informacyjnym.

Przykłady wybrane spośród kilkudziesięciu Publikacji:

- Publikacja 18/P – Analiza wytrzymałości strefowej masowca
- Publikacja 45/P - Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku.

### ***Struktura Przepisów***

W ramach niniejszego przedmiotu najbardziej interesują nas przepisy dotyczące konstrukcji kadłuba statku. W przypadku przepisów PRS jest to cytowana wyżej Cz.II-Kadłub. Najważniejsze wymagania tych przepisów mogą być zgrupowane w następujące 4 elementy:

1. Wymagania ogólne dotyczące rozmieszczenia elementów konstrukcji i ich wymiary minimalne
2. Szczegóły konstrukcyjne (np. konstrukcja połączeń elementów, zaokrąglenia wycięć w elementach konstrukcji, itp.)
3. Obciążenia obliczeniowe
4. Kryteria wymiarujące:
  - naprężenia dopuszczalne;
  - stateczność;
  - trwałość zmęczeniowa;
  - nośność graniczna;
  - sztywność.

Powyższe elementy przepisów decydują o konstrukcji kadłuba, tzn. o rozmieszczeniu elementów konstrukcji, ich wymiarach, połączeniach między nimi, itp.

### ***Dokumentacja klasyfikacyjna statku***

Aby projektowany statek mógł być sklasyfikowany należy przedłożyć towarzystwu klasyfikacyjnemu do zatwierdzenia odpowiednią dokumentację techniczną. W przypadku projektu kadłuba statku dokumentacja powinna zawierać:

- zład poprzeczny ( rysunek – przekrój poprzeczny w rejonie owręża);
- zład wzdłużny ( rysunek – przekrój kadłuba płaszczyzną symetrii);
- rysunki pokładów;
- rysunki dna ( podwójnego lub pojedynczego);
- rozwinięcie poszycia ( rysunek – pokazuje arkusze blach poszycia na tle wewnętrznej konstrukcji dna i burty);
- rysunki grodzi poprzecznych i wzdłużnych;
- rysunki skrajnych części kadłuba;
- rysunki fundamentów silników głównych, pomocniczych, mechanizmów, kotłów, itp.;
- opis procesu technologicznego budowy statku;
- raport z obliczeń wytrzymałościowych.

### ***Klasa statku***

Spełnienie wymagań Przepisów potwierdzone jest dokumentami klasyfikacyjnymi takimi jak:

- świadectwo klasy statku ( podstawowy dokument klasyfikacyjny );
- świadectwa klasy maszyn i urządzeń statku;
- zaświadczenia i metryki dla użytych materiałów, potwierdzenie odbycia prób, itp.

W świadectwie klasy stosowany jest tzw. symbol klasy. Jest to pewien ciąg znaków, który w formie skrótowej zawiera podstawowe informacje o cechach i parametrach statku.

Przykład symbolu klasy PRS:

**\* KM BULK CARRIER L3 AUT \*PRM CG LAL**

Klasa została nadana tzw. statkowi wielozadaniowemu o nośności 1950 ton i długości całkowitej 76 m. Statek ma jedną ładownię, podwójną burtę i podwójne dno i jest przystosowany do transportu ładunków drobnicowych ( w tym wielkogabarytowych) i ładunków masowych luzem.

Znaczenie symboli jest następujące:

**\*** - statek zbudowany pod nadzorem PRS

**KM** – statek ma własny napęd mechaniczny

**BULK CARRIER** – statek może transportować stałe ładunki masowe luzem ( węgiel, zboża, itp.)

**L3** – kadłub ma wzmocnienia lodowe kategorii „L3”

**AUT** – maszynownia może pracować przynajmniej przez 8 godzin bez nadzoru

**\*PRM** – silniki i kotły zbudowane pod nadzorem PRS

**CG** – konstrukcja kadłuba wzmocniona aby przy rozładunku stosować chwytaki

**LAL** – statek może osiadać na dnie akwenu ( w czasie odpływu wody).

W przypadku innych statków w symbolu klasy mogą jeszcze wystąpić znaki dotyczące konkretnego typu statku, niezatapialności statku, ograniczenia rejonu żeglugi, wzmocnień pokładów dla ładunków tocznych, itp.

### III. DEFINICJE I OKREŚLENIA. PODSTAWOWE CECHY KONSTRUKCJI KADŁUBA STATKU

**Kadłub statku** należy rozpatrywać jako powłokę wzmocnioną przegrodami i wiązaniami wewnętrznymi.

**Powłoka** to poszycie dna, burt i pokładu górnego.

**Przegrody** to grodzie poprzeczne i wzdłużne, pokłady (poniżej pokładu górnego), dno wewnętrzne, platformy, itp. Zapewniają one funkcjonalny podział wewnętrzny kadłuba, niezatapialność (wymaganą dla niektórych typów statków) oraz pozytywnie wpływają na wytrzymałość kadłuba.

**Wiązania wewnętrzne** to:

- usztywnienia (wręgi, pokładniki, usztywnienia grodzi, itp.);
- wiązary (denniki, wzdłużniki dna, wręgi ramowe, pokładniki ramowe, itp.).

Usztywnienia podpierają poszycie a wiązary podpierają usztywnienia.

Definicje różnych elementów kadłuba (patrz rys. III.1)

**Pokład górny** - najwyższy nieprzerwany pokład rozciągający się na całej długości kadłuba.

**Pokład wytrzymałościowy** – pokład, który stanowi najwyższą część wytrzymałościowego przekroju poprzecznego kadłuba; może to być pokład górny lub pokład długiej nadbudówki.

**Pokład nadbudówki** – pokład nakrywający nadbudówkę.

**Międzypokład** – pokład poniżej pokładu górnego, rozciągający się na części długości kadłuba.

**Pokład grodziowy** – pokład do którego sięgają grodzie wodoszczelne; najczęściej jest to pokład górny; położenie pokładu grodziowego musi zapewniać minimalną wartość wolnej burty statku.

**Pokłady dolne** – pokłady położone poniżej pokładu górnego.

**Platforma** – pokład dolny na części długości kadłuba (zazwyczaj na długości jednego przedziału między grodziami poprzecznymi).

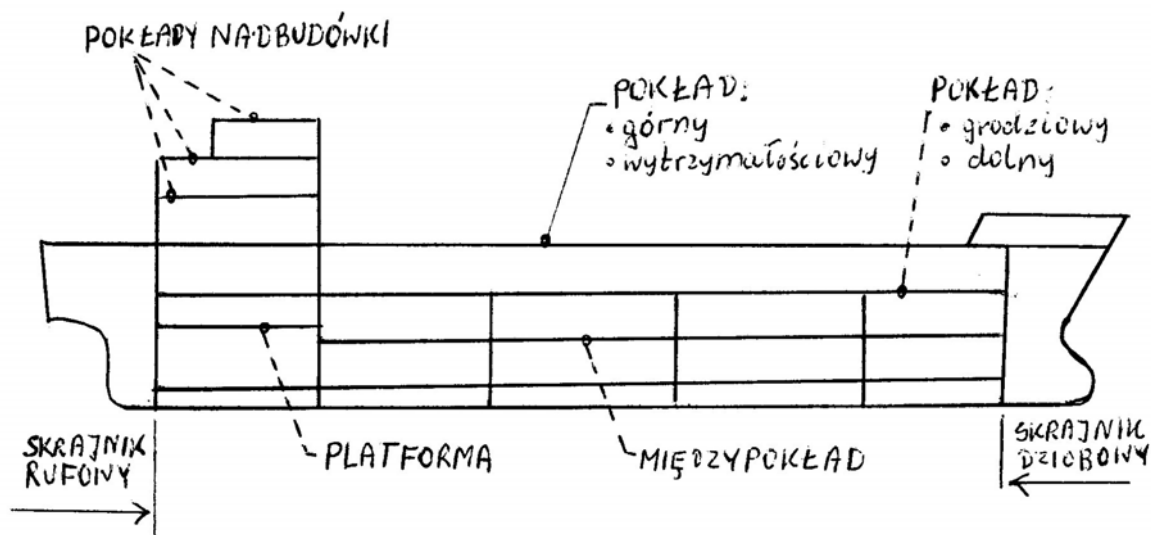
**Nadbudówka / pokładówka** – budowla na pokładzie górnym; przynależność do jednej z tych kategorii zależy od wymiaru „e” (patrz rys. III.2) :

$e \leq 0,04 B$  – nadbudówka;

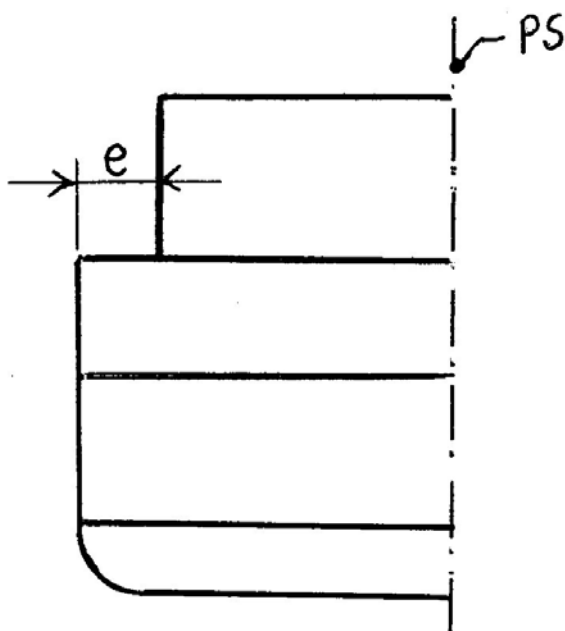
$e > 0,04 B$  – pokładówka.

**Skrajnik dziobowy** – część kadłuba przed grodzią zderzeniową.

**Skrajnik rufowy** – część kadłuba za grodzią rufową.



Rys. III.1 Różne elementy kadłuba



Rys. III.2 Nadbudówka lub pokładówka

Kadłub statku zazwyczaj zawiera wiele otworów niezbędnych ze względu na zapewnienie funkcjonalności statku.

Najważniejsze **otwory w kadłubie**, to :

- otwory lukowe;
- wrota dziobowe, rufowe i burtowe;
- otwory oświetleniowe i wentylacyjne.

Otwory istotnie wpływają na konstrukcję kadłuba statku.

#### Definicje podstawowych wymiarów ( parametrów ) kadłuba

Niżej podano definicje stosowane w *Przepisach PRS, Cz.II, Kadłub*.

$L_c$  - długość całkowita; jest to największa długość mierzona w płaszczyźnie symetrii, na rzucie poziomym, w kierunku równoległym do płaszczyzny podstawowej.

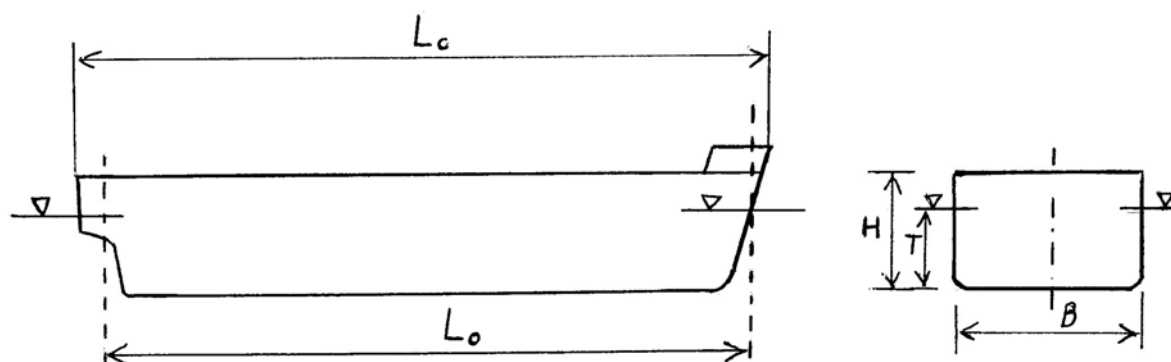
$L_0$  – długość obliczeniowa statku; jest to odległość mierzona w płaszczyźnie letniej wodnicy ładunkowej od przedniej krawędzi dziobnicy do osi trzonu sterowego. Przyjęta wartość powinna być nie mniejsza od 96% długości całkowitej kadłuba mierzonej w płaszczyźnie letniej wodnicy ładunkowej, lecz może nie przekraczać 97% tej wartości.

$L_{PP}$  – długość między pionami - odległość między pionem rufowym i dziobowym.

$B$  – szerokość statku - największa szerokość statku mierzona pomiędzy zewnętrznymi krawędziami wręgów.

$H$  – wysokość boczna - pionowa odległość od płaszczyzny podstawowej do górnej krawędzi pokładnika najwyższego ciągłego pokładu, mierzona w płaszczyźnie owręza przy burcie.

$T$  – zanurzenie – pionowa odległość od płaszczyzny podstawowej do letniej wodnicy ładunkowej mierzona w płaszczyźnie owręza.



Rys. III.3 Wymiary statku

### Typowe fragmenty konstrukcji okrętowych

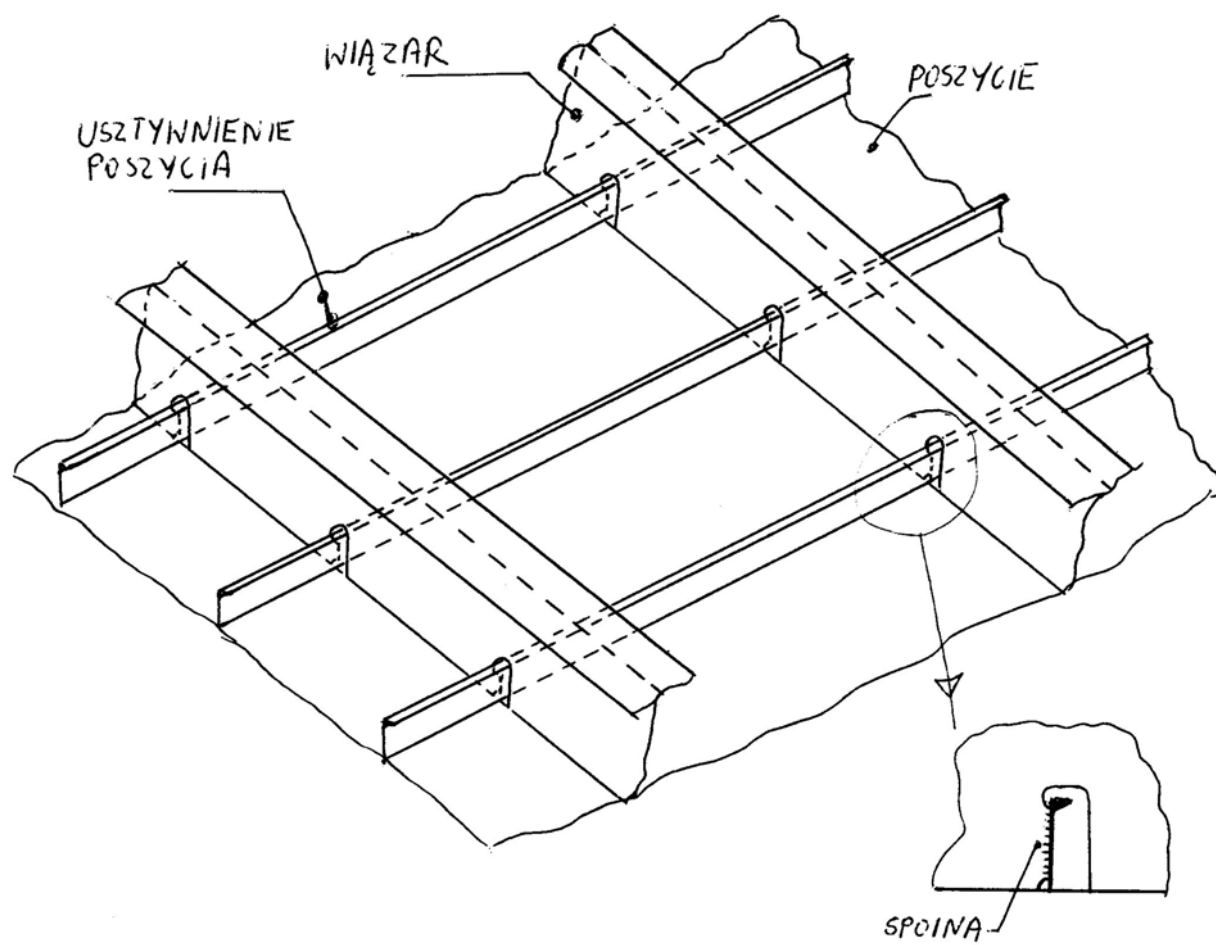
Poszczególne rejony konstrukcji kadłuba statku mają zazwyczaj formę usztywnionych płyt poszycia. Fragment takiego płyta pokazano na rys. III.4.

Ciśnienie od wody zaburtowej, od cieczy w zbiornikach statku lub od ładunku w formie stałej jest bezpośrednio przejmowane przez poszycie. Poszycie zachowuje odpowiednią sztywność i wytrzymałość dzięki temu, że jest podpierane przez usztywnienia. Wytrzymałość usztywnień jest z kolei zapewniana dzięki temu, że opierają się one na znacznie od nich sztywniejszych i mocniejszych wiązarach. Zagadnienia wytrzymałości konstrukcji kadłuba będą bardziej szczegółowo dyskutowane w dalszej części wykładu.

Usztywnienia są zazwyczaj równomiernie rozmieszczone w odległościach rzędu 500 mm do 1000 mm. Im większy statek tym większy odstęp usztywnień. Odstęp wiązarów jest natomiast rzędu dwóch do sześciu odstępów usztywnień.

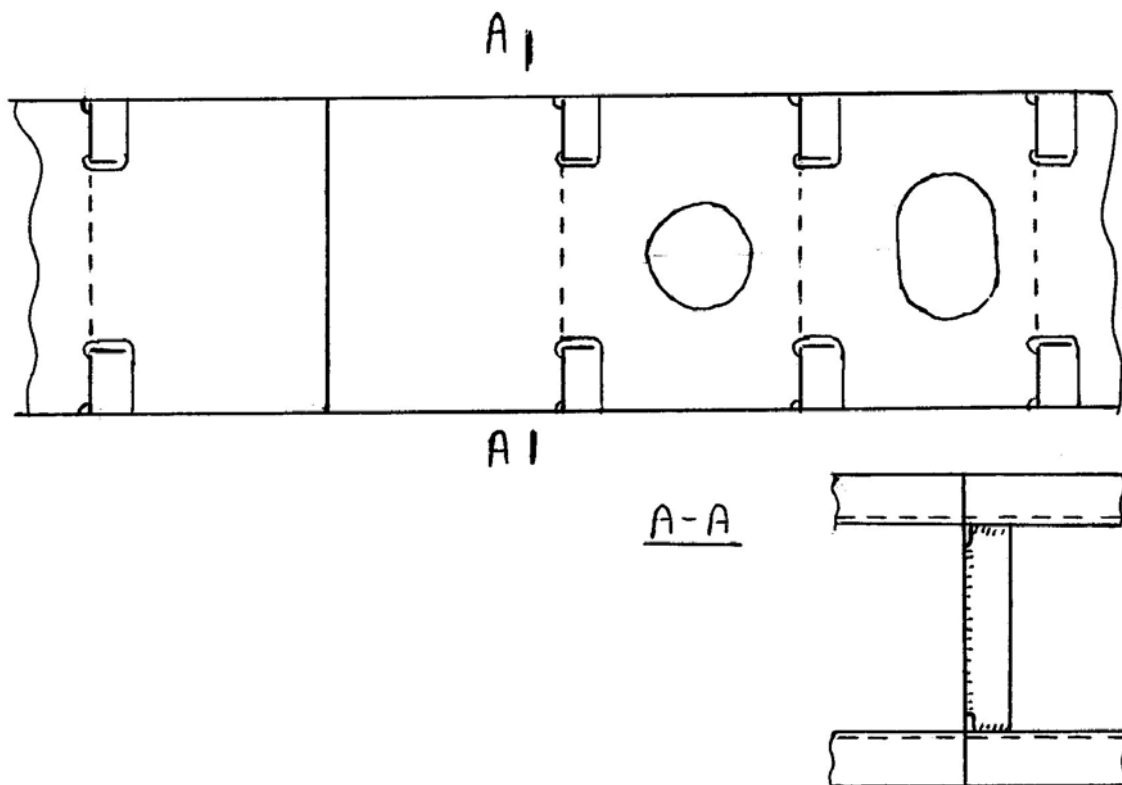
Na rys. III.4 pokazano płyt konstrukcji 1 – poszyciowej. W kadłubach statków często stosowane są fragmenty konstrukcji 2 – poszyciowych ( np. dno podwójne, burta podwójna ). Fragment takiej konstrukcji pokazano na rys. III.5. Rysunek ten pokazuje przekrój poprzeczny konstrukcji w płaszczyźnie wiązara, który w tym przypadku ma formę ścianki łączącej oba poszycia.

Usztywnienia i wiązary poszczególnych rejonów konstrukcji kadłuba ( dna, burt, pokładów, grodzi ) są ze sobą połączone i tworzą ramy płaskie w płaszczyznach wręgowych lub płaszczyznach wzdłużnych.



Rys. III.4 Fragment usztywnionego płata poszycia





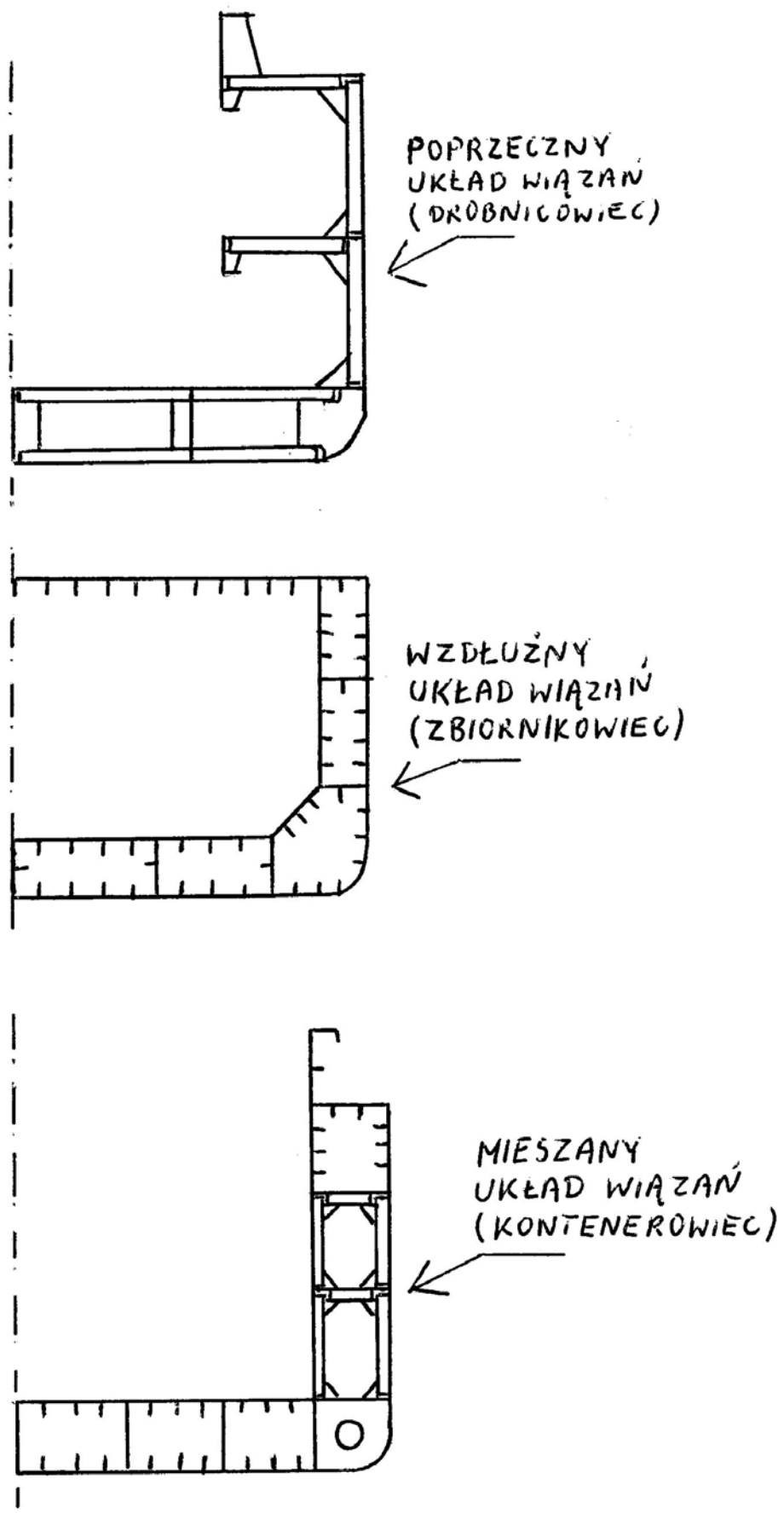
Rys. III.5 Konstrukcja 2 – poszyciowa

Kadłub statku może być zbudowany w układzie wiązań poprzecznym, wzdłużnym lub mieszanym (rys. III.6).

Poprzeczny układ wiązań jest zazwyczaj stosowany na małych statkach. Usztywnienia dna, burty i pokładów są rozmieszczone w płaszczyznach wręgowych, tzn. poprzecznie w stosunku do osi kadłuba. Zaletą takiego układu jest łatwość montażu konstrukcji.

Układ wzdłużny jest typowy dla dużych statków, z podwójną burtą (np. dla tankowców, kontenerowców). Usztywnienia dna, burt i pokładów przebiegają wzdłuż osi kadłuba. Jego zaletą jest pozytywny wpływ na tzw. wytrzymałość wzdłużną kadłuba (ten problem jest szczegółowo dyskutowany w dalszej części wykładu).

Układ mieszany łączy zalety obu układów wymienionych wyżej. Jest powszechnie stosowany na statkach średniej wielkości i dużych. Usztywnienia dna i pokładu wytrzymałościowego przebiegają wzdłuż osi statku.



Rys. III.6 Układy wiązań kadłuba: poprzeczny, wzdłużny i mieszany

#### **IV. PODZIAŁ PRZESTRZENNY KADŁUBA STATKU. POPULARNE TYPY STATKÓW.**

Typ statku wymusza charakterystyczną budowę kadłuba, zapewniającą funkcjonalność statku.

Najbardziej popularne typy statków to:

- drobnicowce;
- masowce;
- zbiornikowce ( tankowce, produktowe, chemikaliowce );
- gazowce;
- statki Ro-Ro;
- kontenerowce;
- barkowce;
- statki rybackie;
- holowniki i pchacze;
- statki zaopatrzeniowe.

Są typy statków łączące dwie lub więcej funkcji – np. statki OBO, statki typu O/O, statki „con-ro”, itp.

Typ statku określa przede wszystkim podział przestrzeni kadłuba grodziami poprzecznymi i wzdłużnymi, liczbę pokładów poniżej pokładu górnego, zastosowanie burt pojedynczych lub podwójnych, itp.

Każdy statek musi posiadać gródź zderzeniową ( w pobliżu dziobu ) i gródź rufową. Wymaganie tzw. niezatapialności i konieczność zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości i sztywności kadłuba wymusza zastosowanie odpowiednio małego odstępu pomiędzy grodziami poprzecznymi. Wynika stąd minimalna liczba grodzi poprzecznych, które trzeba zastosować.

Wg rodzaju przewożonego ładunku statki dzieli się na ;

- statki do transportu ładunków suchych;
- statki do transportu ładunków płynnych.

Statki do transportu ładunków suchych wyróżnia zastosowany system załadunku/ wyładunku, który może być:

- pionowy;
- poziomy;
- mieszany.

Statki do transportu ładunków ciekłych tradycyjnie dzieli się na:

- zbiornikowce;
- gazowce.

Zbiornikowce można podzielić na następujące typy:

- ropowce ( do transportu surowej ropy naftowej );
- produktowe ( transportują produkty przerobu ropy naftowej; mogą jednocześnie zabierać kilka rodzajów ładunku );
- zbiornikowce zaopatrzeniowe ( małe statki do zaopatrywania w paliwo innych statków);
- chemikaliowce ( transport ciekłych chemikaliów );
- zbiornikowce specjalne ( do transportu ładunków specyficznych, np. takich jak płynna

siarka, asfalt, pulpa celulozowa ).

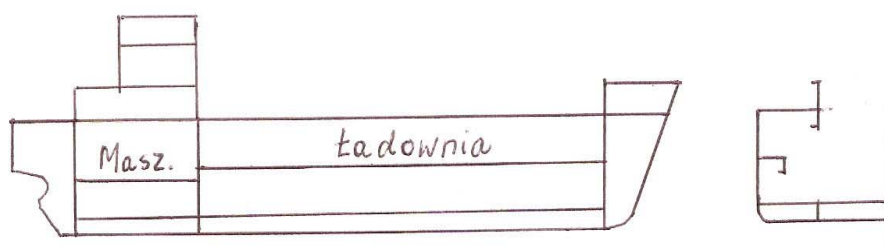
Niżej przedstawiono i omówiono schematy podziału przestrzennego kadłubów kilku popularnych typów statków.

## Drobnicowce

Klasyczny niewielki drobnicowiec pokazano na rys. IV.1. Jego długość całkowita nie przekracza 90 m. Statek ma jedną lub 2 ładownie, podwójne dno i pojedynczą burtę.

Większy drobnicowiec, np. o długości rzędu 150 m będzie miał 4 ładownie.

Statki te są przystosowane do transportu różnorodnych suchych ładunków – oprócz ładunków sypkich luzem.



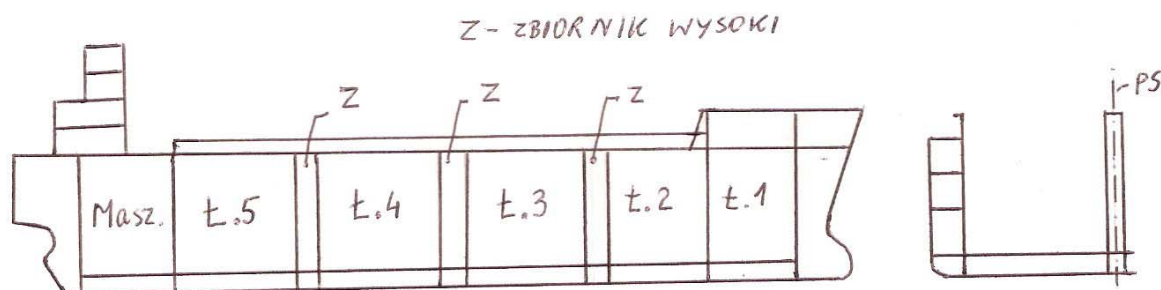
Rys. IV.1 Tradycyjny mały drobnicowiec.

Nowoczesny drobnicowiec właściwie jest statkiem wielozadaniowym . Podział przestrzenny takiego statku o nośności ok. 30000 DWT pokazano na rys. IV.2.

Podstawowe wymiary statku :  $L_c = 190\text{m}$ ,  $B = 32,2\text{ m}$ ,  $T = 12\text{ m}$ .

Statek ma 5 ładowni, do których oprócz tradycyjnych ładunków drobnicowych można ładować kontenery lub ładunki masowe luzem. Ściany ładowni są gładkie dzięki zastosowaniu dna podwójnego, podwójnej burty i zbiorników wysokich pomiędzy ładowniami. Zastosowanie grodzi wzdłużnej w PS ( 2- poszyciowej) zapewnia wytrzymałość pokryw lukowych odpowiednią do ustawiania na nich znacznej liczby kontenerów.

Statek ma demontowane pokłady poniżej pokładu głównego, na których można układać ładunki drobnicowe. Wyposażenie statku w 3 żurawie o udźwigu rzędu 150 ton pozwala na samodzielny załadunek ładunków wielkogabarytowych.

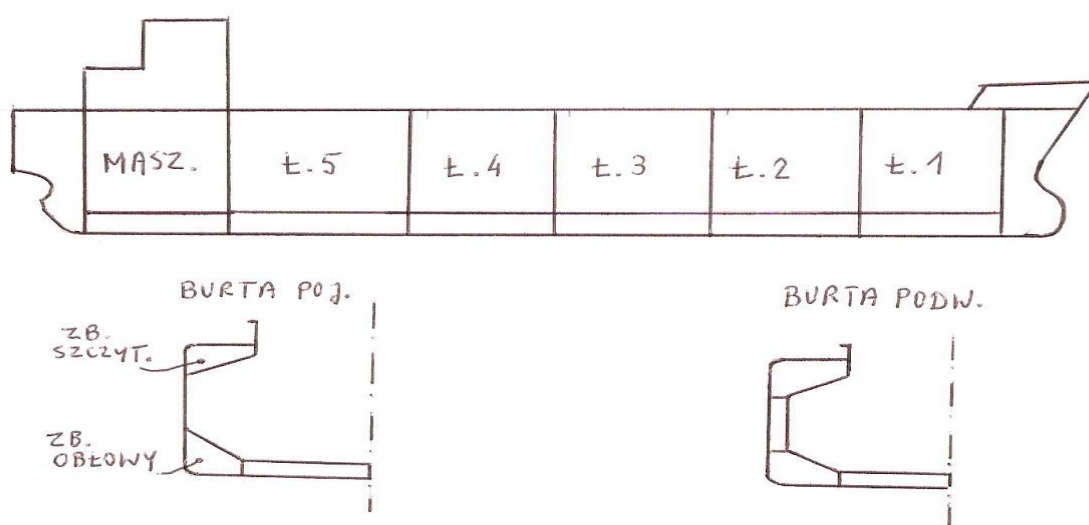


Rys. IV.2 Współczesny drobnicowiec

## Masowce

Masowce to statki transportujące ładunki sypkie ( rudy metali, minerały, węgiel, zboża, itp.) wsypane wprost do ładowni.

Charakterystyczny podział przestrzenny takiego statku pokazano na rys. IV.3. statek ma burty pojedyncze lub podwójne. Charakterystyczne elementy kadłuba takiego statku to zbiorniki obłowe i zbiorniki szczytowe ( rys. IV.3). Pozwalają one na samoczynne wypełnienie całej objętości ładowni przy wsypywaniu ładunku przez otwory lukowe. Przy rozładunku chwytakami ładunek zsuwa się z kolei po pochylej ścianie zbiornika obłowego w „światło” luku. Przestrzeń w zbiornikach obłowych i szczytowych oraz większość przestrzeni w dnie podwójnym jest wykorzystywana jako zbiorniki balastowe.



Rys. IV.3 Masowiec

Wrgi burtowe statku z burtą pojedynczą są w układzie poprzecznym. Dzięki temu ładunek zsuwa się samoczynnie po burcie przy rozładunku statku. Burtą podwójną jest usztywniona poprzecznie lub wzdłużnie. Pokład, fragmenty burt w zbiornikach szczytowych i obłowych, pochyle ściany tych zbiorników, dno zewnętrzne i dno wewnętrzne są usztywnione wzdłużnie.

Grodzie poprzeczne pomiędzy ładowniami zazwyczaj są budowane w formie tzw. grodzi profilowanych ( falistych ). Dzięki temu tworzą one ściany o gładkiej powierzchni.

Masowce należą do jednej z kategorii, ze względu na wielkość statku:

- 'handy size';
- 'panamax size';
- 'cape size'.

Masowce 'handy size' mają nośność mniejszą niż 50000 ton. Statki te mają najczęściej 5 ładowni ( jak na rys. IV.3 ). Statek o nośności 32000 ton ma wymiary główne o wartościach zbliżonych do poniższych :  $L_{PP} = 185\text{ m}$ ;  $B = 24,4\text{ m}$ ;  $H = 15\text{ m}$ ;  $T = 9,8\text{ m}$ .

Ładownia nr 3 zazwyczaj może być również wykorzystywana jako zbiornik balastowy.

Masowce ‘ *panamax size* ‘ odznaczają się charakterystyczną szerokością  $B = 32,2 \text{ m}$ . Są to statki o nośności rzędu 50000 do 70000 ton. Wymiary główne takiego statku są rzędu :  $L_{PP} = 215 \text{ m}$ ;  $B = 32,2 \text{ m}$ ;  $H = 18 \text{ m}$ ;  $T = 12 \text{ m}$ . Statek ma zazwyczaj 7 ładowni. Ładownia nr 4 jest przystosowana do zapewniania balastem wodnym.

Masowce ‘ *cape size* ‘ to statki o nośności powyżej 70000 ton i szerokości kadłuba większej niż 32,2 m. Nośność największych statków tego typu dochodzi do 250000 ton. Statki te mają 9 albo 11 ładowni. Statek o nośności 100000 ton osiąga wymiary rzędu :  $L_{PP} = 260 \text{ m}$ ;  $B = 40 \text{ m}$ ;  $H = 24 \text{ m}$ ;  $T = 18 \text{ m}$ . Dwie ładownie ( zazwyczaj nr 3 i nr 7 ) są przystosowane do zapewniania balastem wodnym.

Charakterystyczną cechą niektórych masowców jest dostosowanie wytrzymałości ich kadłuba do tzw. naprzemiennego sposobu załadowania, gdzie ładunek jest umieszczany w co drugiej ładowni ( np. w ładowni nr 1, nr 3, nr 5 , itd.). Dotyczy to tzw. ciężkich ładunków masowych, jak np. ruda żelaza, której gęstość może nawet przekraczać  $3 \text{ t/m}^3$ . W takich sytuacjach ładunek o masie równej ładowności statku zmieści się w ładowniach w warunkach załadowania naprzemiennego. Ładunki masowe lekkie ( o gęstości mniejszej niż  $1 \text{ t/m}^3$ , jak np. zboża ) mogą natomiast wypełnić całkowicie wszystkie ładownie i dopiero wówczas statek wykorzysta pełną ładowność.

## Zbiornikowce

Przed wdrożeniem wymagań konwencji MARPOL statki tego typu mogły być budowane jako statki o pojedynczym kadłubie, tzn. z pojedynczą burtą i z pojedynczym dnem. Charakterystyczny podział przestrzenny takiego statku, z grodziami wzdłużnymi, pokazano na rys. IV.4. Zbiorniki ładunkowe były wykorzystywane także ( zamiennie ) jako zbiorniki balastu wodnego.

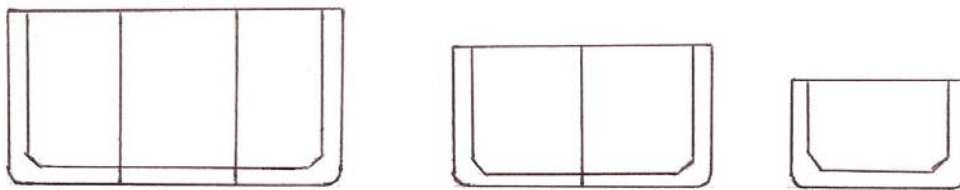


Rys. IV.4 Ropowiec o pojedynczym kadłubie

Statek o nośności rzędu 100000 ton miał wymiary zbliżone do :  $L_{PP} = 250 \text{ m}$ ,  $B = 45 \text{ m}$ ,  $H = 21 \text{ m}$ ,  $T = 18 \text{ m}$ .

Statek o nośności 250000 ton miał wymiary zbliżone do :  $L_{PP} = 313 \text{ m}$ ,  $B = 48 \text{ m}$ ,  $H = 25,2 \text{ m}$ ,  $T = 19,6 \text{ m}$ .

Statki wspomnianego wyżej typu wychodzą stopniowo z użycia i są zastępowane przez zbiornikowce o podwójnym kadłubie, których charakterystyczne przekroje poprzeczne pokazano na rys. IV.5.



Rys. IV.5 Zbiornikowce o podwójnym kadłubie

Przestrzenie w podwójnej burcie i w podwójnym dnie są wykorzystywane jako zbiorniki balastu.

Grodzie wzdłużne na produktowcach i chemikaliowcach mają zazwyczaj formę grodzi profilowanych. Kadłub wewnętrzny chemikaliowców jest zbudowany ze specjalnej stali kwasoodpornej lub powierzchnie zbiorników ładunkowych są pokryte specjalną powłoką chemiczną ( farbą ).

## **Gazowce**

Gazowce to statki do transportu skroplonych gazów.

Są dwa typy takich statków : LPG ( Liquefied Petroleum Gas ) i LNG ( Liqueified Natural Gas ).

### **Statki LPG**

Przeznaczone są do transportu gazów uzyskiwanych w procesie przerobu ropy naftowej, takich jak propan i butan oraz amoniaku, propylenu i etylenu.

Gaz może być transportowany w warunkach:

- skroplony w temperaturze otoczenia, pod znacznym ciśnieniem;
- schłodzony do temperatury wrzenia ( rzędu  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $-48^{\circ}\text{C}$  ), przy ciśnieniu atmosferycznym ( ok.  $0,1\text{ MPa}$  );
- częściowo schłodzony, pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego.

### **Statki LNG**

Transportują gaz ziemny. Gaz musi być schłodzony do temperatury zbliżonej do temperatury wrzenia o wartości około  $-165^{\circ}\text{C}$ . Warto wiedzieć, że tzw. punkt krytyczny metanu ( jest to podstawowy składnik gazu ziemnego ), to ciśnienie ok.  $4,6\text{ MPa}$  i temperatura ok.  $-82^{\circ}\text{C}$ .

Nie ma możliwości skroplenia tego gazu w temperaturze wyższej od podane wyżej!

### **Zbiorniki ładunkowe gazowców**

Wymienione wyżej parametry skroplonego gazu sprawiają, że najtrudniejszym pod względem konstrukcji elementem gazowca są zbiorniki ładunkowe – szczególnie w przypadku statków LNG. Niżej wymieniono podstawowe typy konstrukcyjne zbiorników oraz krótko podano ich podstawowe cechy. Więcej szczegółów podano w końcowej części fragmentu niniejszego rozdziału dotyczącego gazowców

#### **Zbiorniki integralne**

Stanowią one integralną część kadłuba statku, przenoszącą naprężenia typowe dla kadłuba statku, wywoływane przez obciążenia od wody zaburtowej i od ładunku. Są stosowane tylko na statkach LPG, do ładunków, które mogą być transportowane w temperaturze otoczenia, przy niewielkich ciśnieniach. Takim gazem jest np. butan. W tak łagodnych warunkach nie ma konieczności zapewnienia swobody odkształceń termicznych zbiorników.

#### **Zbiorniki membranowe**

Ładunek jest umieszczony w zbiornikach mających formę cienkich membran, które opierają się na konstrukcji kadłuba poprzez warstwę izolacji termicznej. Zbiorniki są skonstruowane tak, że ich odkształcenia termiczne nie wywołują istotnych naprężeń w membranach. Zbiorniki tego typu są stosowane przede wszystkim na statkach LNG.

#### Zbiorniki półmembranowe

Zbiornik składa się z płaskich dużych fragmentów, które łączą się poprzez fragmenty o zaokrąglonych narożach. Fragmenty płaskie opierają się na konstrukcji kadłuba statku a fragmenty zaokrąglone zapewniają znaczne wartości odkształceń termicznych nie wywołując przy tym nadmiernych naprężeń w zbiorniku. Zbiorniki tego typu są stosowane głównie na statkach LNG i rzadziej na statkach LPG.

#### Zbiorniki niezależne ( samonośne )

Są to zbiorniki wstawiane do kadłuba. Mają wytrzymałość wystarczającą do przeniesienia obciążeń w formie ciśnienia od ładunku i reakcji specjalnych fundamentów poprzez które opierają się na kadłubie statku.

Stosowane są 3 typy tych zbiorników : A, B i C.

Zbiorniki typu A są projektowane tradycyjnymi metodami – podobnie jak sam kadłub statku. Bywają stosowane na statkach LPG i LNG.

Zbiorniki typu B są projektowane z użyciem zaawansowanych metod obliczeniowych. Uwzględniana jest wytrzymałość zmęczeniowa i odporność konstrukcji na tzw. propagację pęknięć ( szczelin ). Dzięki temu można zastosować tzw. drugą barierę bezpieczeństwa w formie okrojonej ( patrz np. rys. IV.7 ).

Zbiorniki typu C są konstruowane jako zbiorniki ciśnieniowe. Są stosowane na statkach LPG.

#### Zbiorniki z izolacją wewnętrzną

Ich konstrukcja nie jest samonośna. Warstwa izolacji termicznej jest wewnątrz zbiornika, tzn. jej wewnętrzna powierzchnia styka się z ładunkiem. Izolacja opiera się na wewnętrznym kadłubie statku lub na zewnętrznym płaszczu zbiornika. Stosowane są 2 typy takich zbiorników, oznaczane umownie symbolami '1' i '2'.

W zbiorniku typu '1' izolacja lub izolacja i tzw. wypełniacz stanowią podstawową barierę bezpieczeństwa. Druga bariera bezpieczeństwa jest tworzona przez wewnętrzny kadłub statku lub przez zewnętrzny płaszcz zbiornika.

W zbiorniku typu '2' izolacja lub kombinacja izolacji i wypełniacza stanowi jednocześnie obie bariery – dzięki specjalnej konstrukcji warstwowej.

Należy zauważyć, że wypełniacz nie pełni funkcji membrany ( porównaj zbiorniki membranowe ). Zbiorniki tego typu są stosowane tylko na statkach LPG.

#### **Budowa statków LPG**

Budowa tych statków istotnie zależy od temperatury ( albo ciśnienia ) skroplonego gazu. Niżej scharakteryzowano podstawowe typy statków LPG.

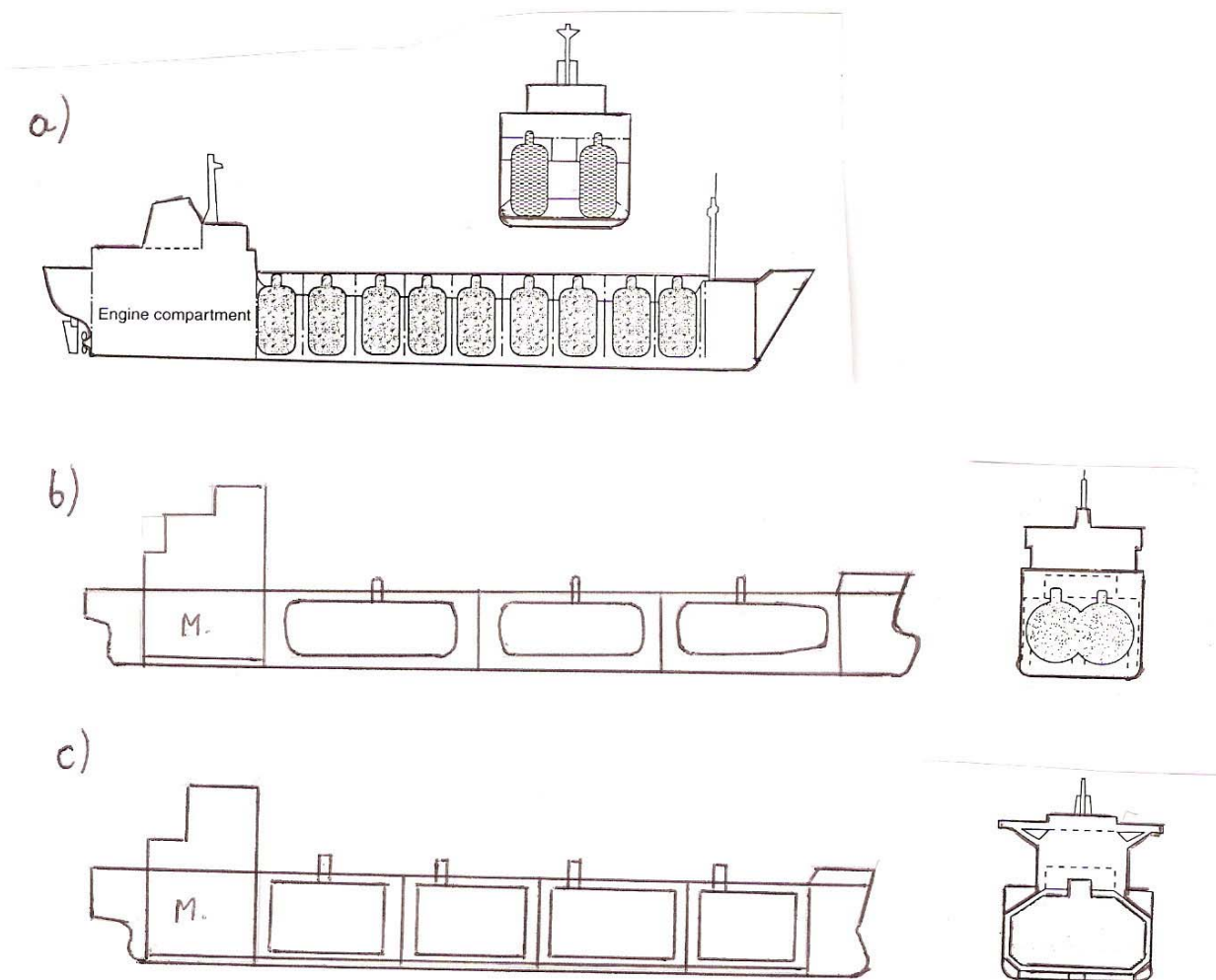
##### Statki LPG ze zbiornikami ciśnieniowymi

Są to statki niewielkie – o pojemności zbiorników ładunkowych do 2000 m<sup>3</sup>. Transportują propan, butan lub amoniak. Stosowane są niewielkie zbiorniki cylindryczne pionowe ( rys.



IV.6-a ) lub 2 do 6 zbiorników niezależnych ( typu C ), bez izolacji termicznej, o osiach wzdłuż statku ( rys. IV.6-b, który przedstawia także zbiorniki półciśnieniowe, omówione niżej ). Zbiorniki są konstruowane na ciśnienie 1,75 MPa, które jest ciśnieniem skraplania propanu w temperaturze 45° C.

Zbiorniki są budowane ze zwykłej stali kadłubowej. Opierają się one na kadłubie statku poprzez specjalne fundamenty. W zbiornikach względnie długich są stosowane tzw. grodzie przelewowe.



Rys. IV.6 Gazowce LPG

#### Statki LPG ze zbiornikami półciśnieniowymi

Są to statki o pojemności zbiorników ładunkowych do 5000 m<sup>3</sup>. Stosowane są zbiorniki niezależne typu C ( rys. IV.6-b ) zbudowane ze zwykłej stali o kategorii odpowiedniej dla temperatury ładunku ok. -5° C . Ciśnienie ładunku wynosi wówczas ok. 0,8 MPa. Zewnętrzne powierzchnie zbiorników są izolowane termicznie. Statek wyposażony jest w instalację skraplającą i ponownie wtłaczającą do zbiorników gaz, który odparowuje wskutek przenikania do zbiornika ciepła z powietrza na zewnątrz zbiorników.

#### Statki LPG ze zbiornikami w pełni chłodzonymi

Są to statki większe, o pojemności zbiorników ładunkowych do 100000 m<sup>3</sup>. Zazwyczaj stosowane są niezależne zbiorniki pryzmatyczne typu A, zwężone w części górnej aby

zmniejszyć niekorzystny wpływ swobodnej powierzchni cieczy na stateczność statku ( rys. IV.6-c). Zbiorniki mogą mieć grodzie wzdłużne w PS.

Zbiorniki opierają się na kadłubie statku poprzez specjalne podpory, wyposażone w nakładki izolowane termicznie. Konstrukcja podpór pozwala na swobodne odkształcenia termiczne zbiorników i zabezpiecza zbiorniki przed przemieszczeniami w kierunku poprzecznym lub wzdłużnym. Zbiorniki są izolowane termicznie na zewnątrz lub izolowana jest zewnętrzna powierzchnia wewnętrznego kadłuba statku, stanowiąca drugą barierę bezpieczeństwa. Zbiorniki są budowane ze stali o kategorii odpowiedniej dla temperatury eksploatacyjnej rzędu  $-43^{\circ}\text{C}$  ( temperatura skraplania propanu przy ciśnieniu atmosferycznym ).

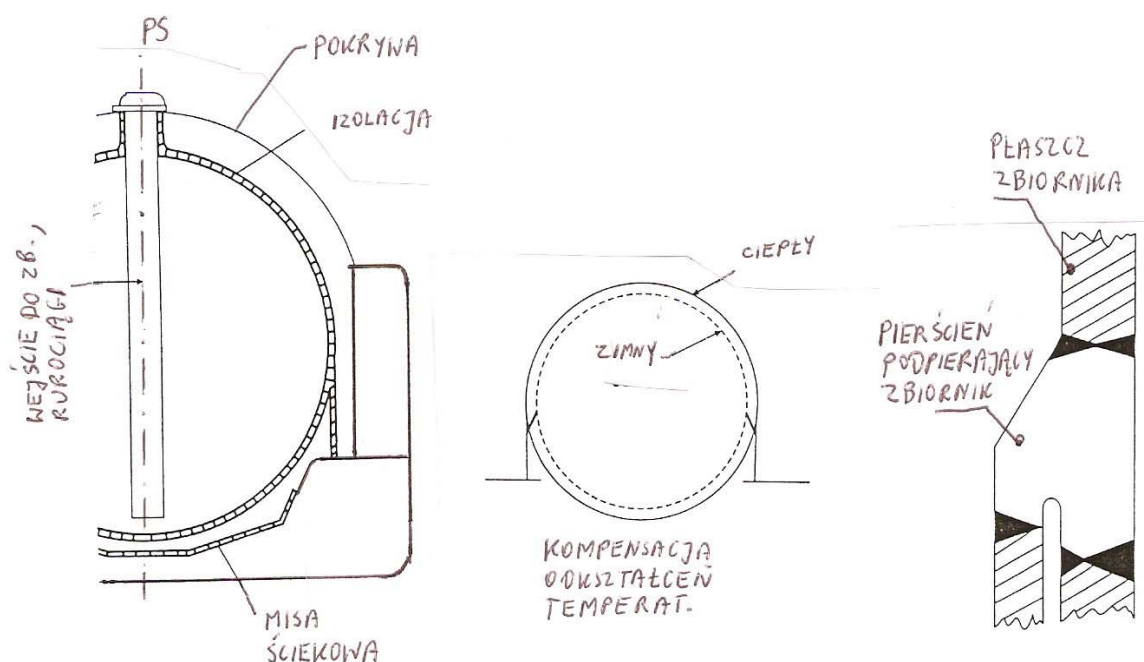
### **Budowa statków LNG**

Są to statki trudniejsze do zaprojektowania i zbudowania niż statki LPG – ze względu na bardzo niską temperaturę skroplonego gazu. Stosowane są zbiorniki ładunkowe membranowe lub niezależne, zastrzeżone patentami. Statek LNG ma obowiązkowo podwójny kadłub, w którym zamontowane są zbiorniki ładunkowe i tzw. druga bariera bezpieczeństwa.

Niżej opisano krótko podstawowe typy statków LNG.

#### **Statki LNG z niezależnymi zbiornikami typu B**

Stosowane są zbiorniki kuliste, niezależne, opatentowane przez firmę Kvaerner-Moss ( rys. IV.7 ).



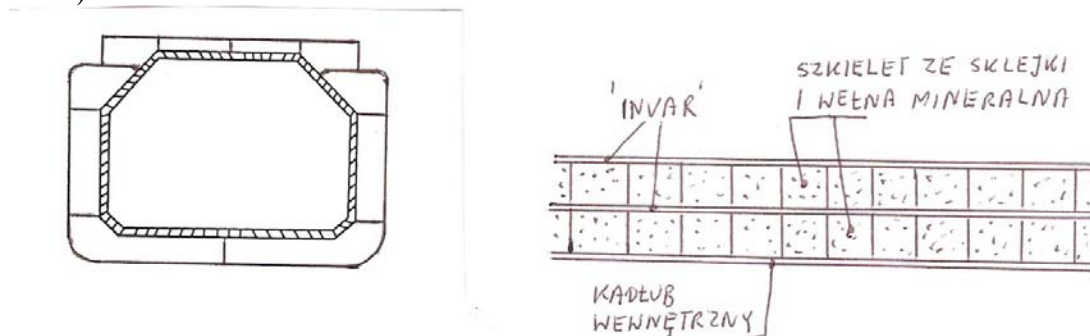
Rys. IV.7 Zbiornik kulisty

Zbiorniki są zbudowane ze specjalnego stopu aluminium lub ze stali stopowej zawierającej ok. 9% niklu. Zbiornik jest spawany do specjalnego pierścienia o osi pionowej, o średnicy zbliżonej do średnicy zbiornika. Pierścień pozwala oprzeć zbiornik na konstrukcji kadłuba. Zbiornik może odkształcać się termicznie dzięki możliwości zmiany średnicy górnej części zbiornika, bez generowania przy tym nadmiernych naprężeń. Zewnętrzna powierzchnia zbiornika i górna część pierścienia są izolowane termicznie pianką poliuretanową. Pod

zbiornikiem utworzona jest swego rodzaju misa ściekowa, stanowiąca drugą barierę bezpieczeństwa. Zbiorniki są obowiązkowo wyposażone w instalację do wykrywania przecieków ładunku. Pozwala to odpowiednio wcześniej tymczasowo naprawiać konstrukcję zbiornika aby nie dopuścić do zbyt dużych wymiarów pęknięć ( szczelin ) poszycia zbiornika. Statek o pojemności zbiorników rzędu 125000 m<sup>3</sup> ma zazwyczaj 5 zbiorników. Zbiorniki wystają ponad poziom pokładu górnego. Górne części zbiorników są osłonięte wodoszczelną konstrukcją stalową.

#### Statki LNG ze zbiornikami membranowymi

Stosowane są 2 podstawowe rozwiązania konstrukcyjne, opracowane odpowiednio przez francuskie firmy Gaz- Transport i Technigaz. Omówimy tylko pierwszy typ konstrukcji ( rys. IV.8 ).



Rys. IV.8 Zbiornik membranowy na statku LNG

Pierwsza i druga bariera bezpieczeństwa ( membrany zbiornika ) są wykonywane ze stopu żelaza i niklu o zawartości niklu aż 36%, zwanego 'Invar'. Materiał ten odznacza się bardzo małą wartością współczynnika rozszerzalności temperaturowej. Dzięki temu nie ma potrzeby konstruowania specjalnych węzłów konstrukcji, kompensujących takie odkształcenia. Grubość tych membran wynosi zaledwie 0,5 do 0,7 mm. Jest to więc konstrukcja bardzo lekka.

Izolacja termiczna składa się z komór ze sklejk wypełnionych perlitem ( rodzaj wełny mineralnej ) – patrz rys. IV.8.

#### Statki LNG ze zbiornikami półmembranowymi typu B

Konstrukcja jest opatentowana przez japońską firmę IHI. Zbiornik pryzmatyczny ma płaskie nieuszytwnione ściany, lekko pochyle w suficie. Krawędzie zbiornika są zaokrąglone. Umożliwiają dzięki temu odkształcalność temperaturową. Zbiornik ma formę powłoki o grubości ścianek rzędu 15 do 25 mm, wykonanej ze stopu aluminium. Zbiornik opiera się na wewnętrznym kadłubie statku płaskimi częściami ( ścianami ) poprzez warstwę mającą formę szkieletu ze sklejk, wypełnionego pianką PCV zapewniającą izolacyjność termiczną.

#### Podsumowanie budowy statków LNG

Podział przestrzenny kadłuba jest podobny jak w przypadku zbiornikowców. Maszynownia jest zawsze w części rufowej statku.

Gęstość skroplonego gazu LPG mieści się w przedziale 0,58 do 0,97 t/m<sup>3</sup>. Gęstość gazu LNG to zaledwie 0,5 t/m<sup>3</sup>. Statki LNG charakteryzują się więc względnie małą wartością zanurzenia i dużą wartością wolnej burty.

Są to statki o podwójnym kadłubie ( z wyjątkiem niektórych statków LPG ). Przestrzenie w dnie podwójnym i w podwójnej burcie są wykorzystywane jako zbiorniki balastowe.

Kadłuby tych statków są zazwyczaj budowane we wzdlużnym układzie wiązań ( przynajmniej w części ładunkowej).

Stosowany jest system monitorowania przestrzeni pomiędzy zbiornikami ładunkowymi a kadłubem w celu wykrywania możliwych przecieków gazu. Przestrzenie te są wypełniane zazwyczaj gazem obojętnym ( azotem ) – w celu zapobiegania wybuchom gazu. Ciśnienie w zbiornikach ładunkowych jest zawsze wyższe niż ciśnienie atmosferyczne. Nie ma więc zagrożenia wybuchem od wewnątrz zbiorników ładunkowych.

Na statkach LPG stosowana jest instalacja do skraplania i ponownego wtłaczania do zbiorników gazu, który podlega odparowaniu wskutek przenikania do zbiorników ciepła od zewnątrz.

W przypadku statków LNG odparowywany gaz jest spalany w kotłach parowych, które są elementem napędu turbinowego takich statków.

## **Kontenerowce**

Kontenerowce to statki transportujące wyłącznie kontenery. Przykładowy kontenerowiec wielkości ‘panamax’ pokazano na rys. IV.9. Główne wymiary tego statku :  $L_{BP}=205,4$  m;  $B=32,2$  m;  $T=11,0$  m. DWT = 36500 ton.

Pojemność statku :

- kontenery pod pokładem : 1406 TEU;
- kontenery na pokrywach luków ładowni : 1274 TEU;
- wszystkie kontenery : 2680 TEU.

W ładowniach jest do 11 rzędów kontenerów; na pokrywach 13 rzędów.

Symbol ‘TEU’ oznacza standardowy kontener 20-stopowy o wymiarach: długość= 6,052 m ( 20 stóp; 1 stopa = 0,3048 m); szerokość = 2,438 m ( 8 stóp); wysokość= 2,438 m do 2,896 m; maksymalna masa z ładunkiem = 20 ton.

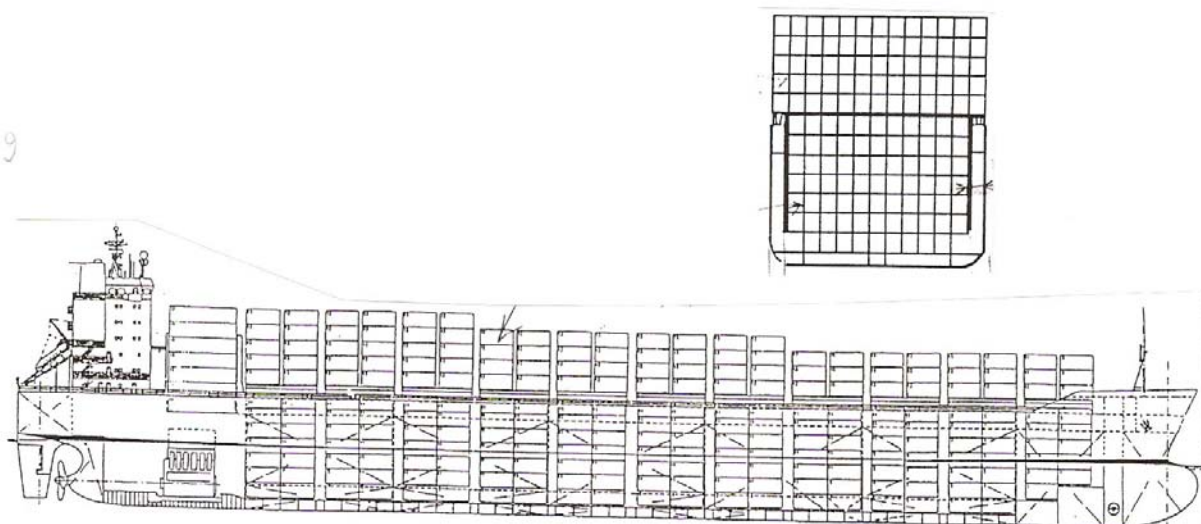
Charakterystyczną cechą kadłuba kontenerowca jest dno podwójne i podwójne burty.

Wymiary ładowni są dostosowane do wymiarów kontenerów. Otwory lukowe są bardzo szerokie. Ładownie są przykryte mocnymi pokrywami na których można ustawiać kontenery w ilości podobnej jak w ładowni.

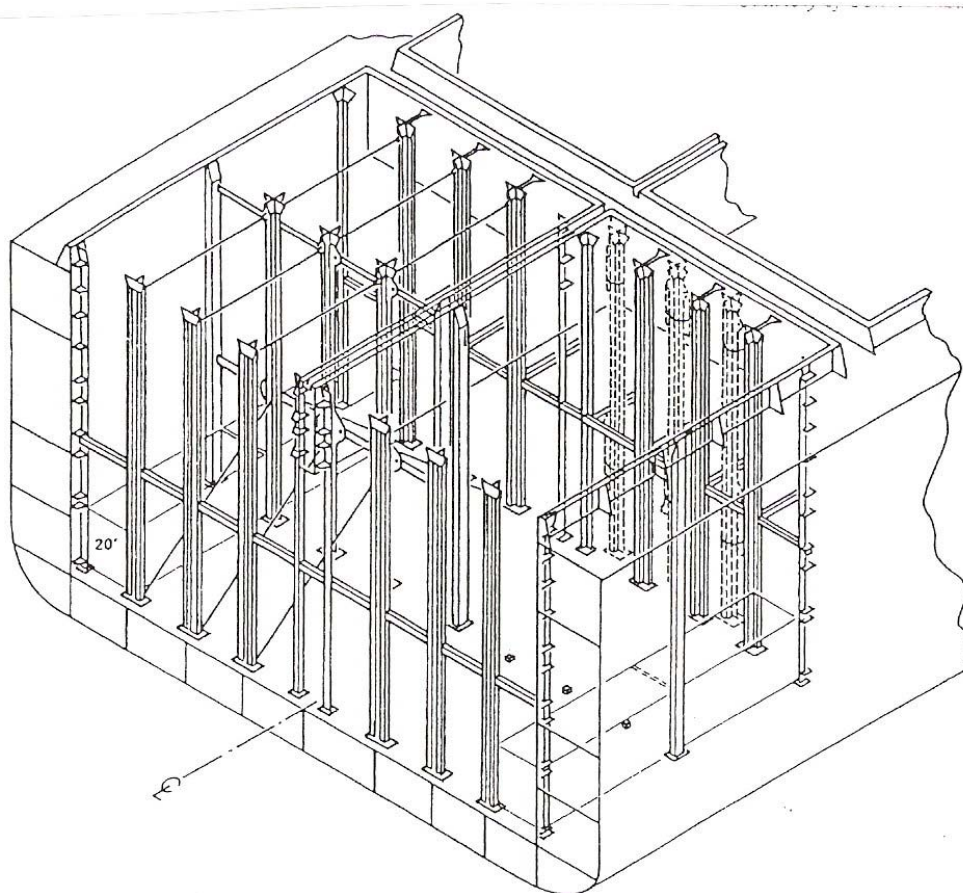
W ładowniach statku są zainstalowane specjalne prowadnice kontenerów ułatwiające załadunek statku ( rys. IV.10).

Kontenery na pokrywach luków mogą być mocowane przy pomocy specjalnego przenośnego osprzętu lub mogą być umieszczane pomiędzy specjalnymi prowadnicami ( rys. IV.11).

IV-9

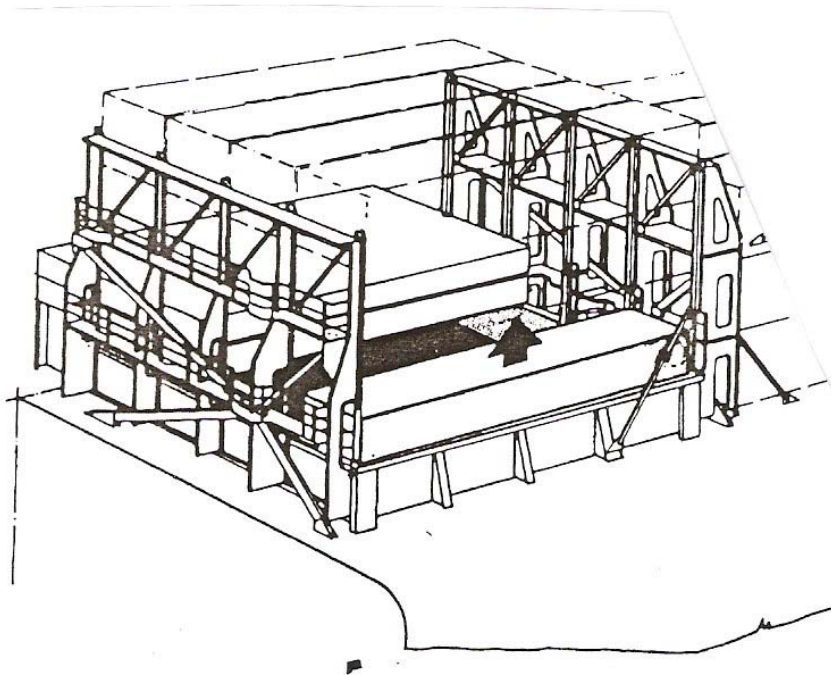


Rys. IV.9 Klasyczny kontenerowiec wielkości 'panamax'



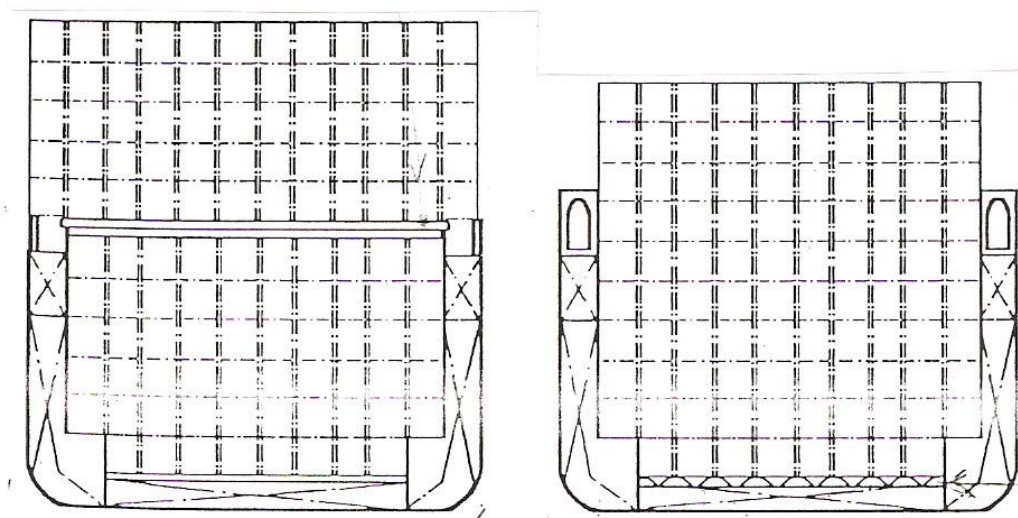
Rys. IV.10 Prowadnice kontenerów w ładowniach





Rys. IV.11 Prowadnice kontenerów na pokładzie statku

Istnieją nowoczesne kontenerowce bez pokryw luków ( rys. IV.12). Zaletą takich statków jest usprawnienie operacji ładunkowych. Statek może załadować taką samą liczbę kontenerów jak klasyczny kontenerowiec przy istotnie mniejszych wymiarach kadłuba. Statek taki musi jednak być wyposażony w system pomp i rurociągów do usuwania wody deszczowej z ładowni.



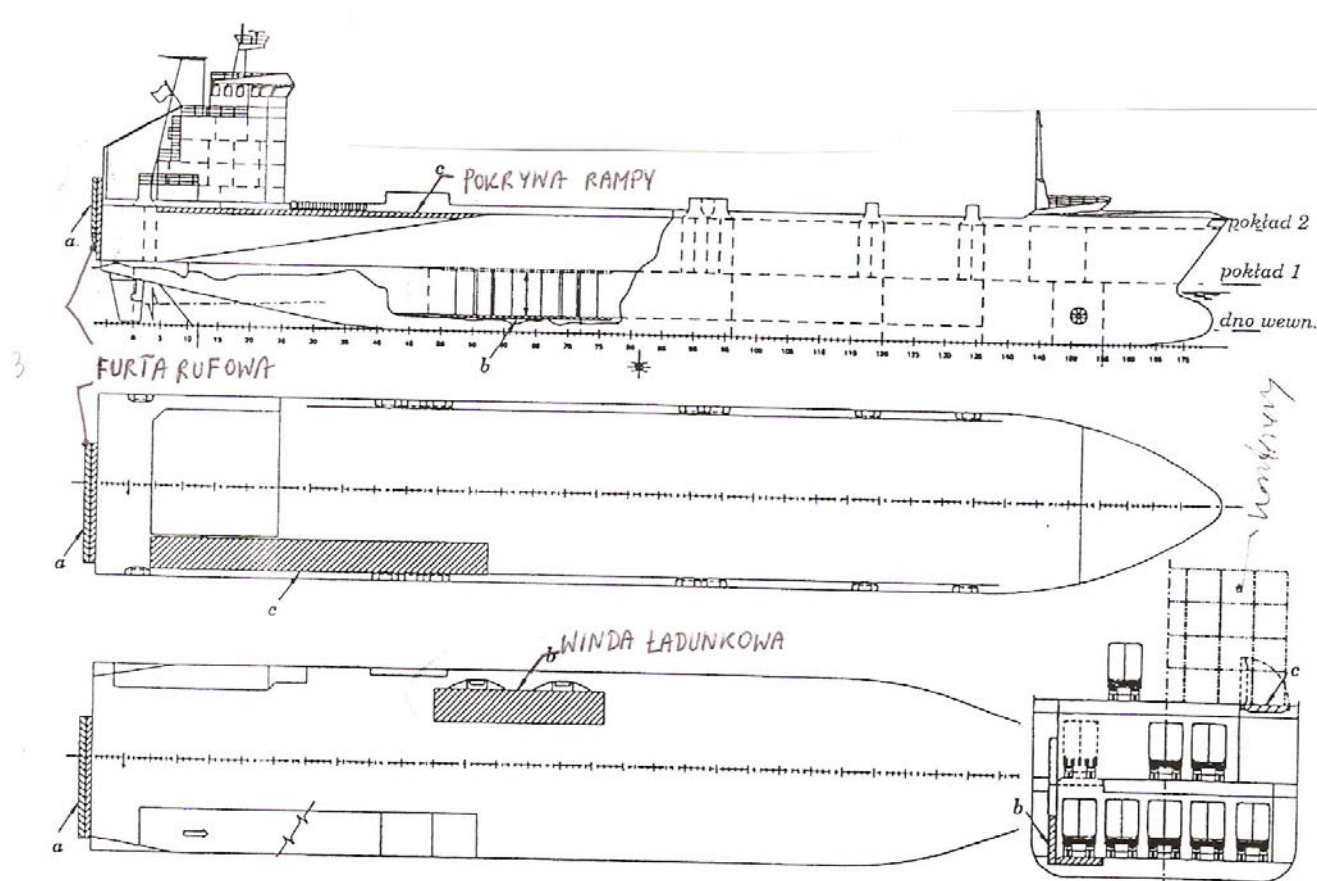
Rys.IV.12 Kontenerowiec klasyczny ( lewa strona rysunku ) i kontenerowiec bez pokryw luków ( prawa strona rysunku )

Kontenery są powszechnie transportowane także przez inne typy statków. Przykładem może być nowoczesny drobnicowiec omówiony w początkowym fragmencie niniejszego rozdziału. Inne przykłady to statki typu 'con-ro' i statki wielozadaniowe wspomniane w końcowej części niniejszego rozdziału.

Transport kontenerów takimi statkami odbywa się mniej sprawnie niż klasycznymi kontenerowcami – ze względu na konieczność mocowania kontenerów w ładowniach i na pokrywach luków przy pomocy przenośnego osprzętu.

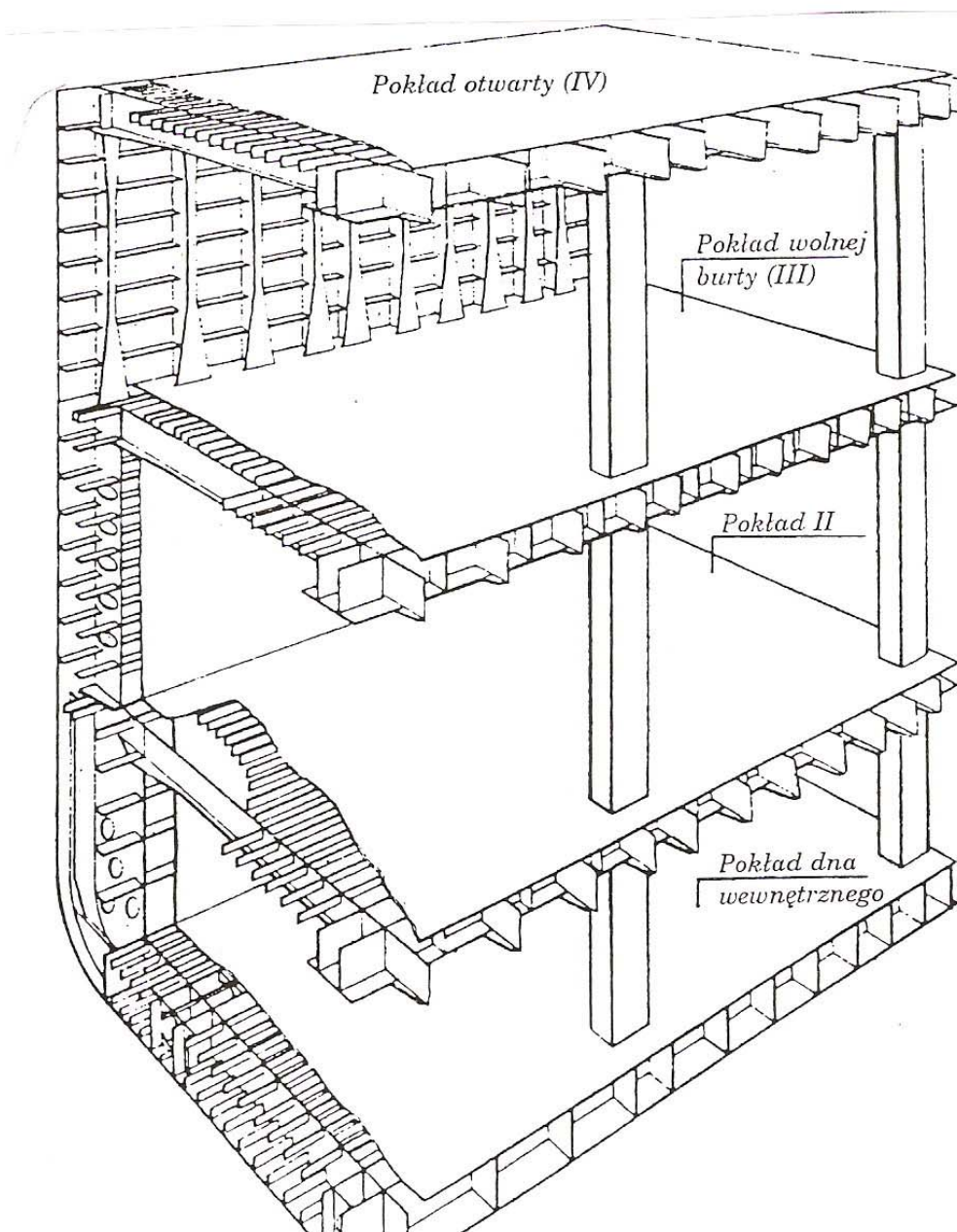
### Statki poziomego ładowania ( Ro-Ro) i promy

Są to statki o specyficznej budowie kadłuba wymuszonej przez założony poziomy system załadunku. Ładunkiem mogą być samochody lub kontenery, które są dowożone do wnętrza statku lub na pokład poprzez specjalne naczepy lub sztaplarki. Wymusza to zastosowanie na statku furt rufowych, dziobowych lub burtowych, specjalnych ramp i wind ładunkowych. Cechą charakterystyczną kadłuba takiego statku jest niskie usytuowanie pokładu grodziowego, który przykrywa także maszynownię w części rufowej statku oraz duże otwarte przestrzenie ładunkowe powyżej pokładu grodziowego i na pokładzie głównym. Przykład statku Ro-Ro pokazano na rys. IV.13. Jest to statek średniej wielkości, o długości ok. 150 m.



Rys. IV.13 Typowy statek Ro-Ro

Fragment konstrukcji kadłuba statku Ro-Ro w rejonie ładunkowym pokazano na rys. IV.14. Charakterystyczną cechą jest zastosowanie podpór pokładów. Poszycie pokładów, po których jeżdżą pojazdy jest stosunkowo grube a usztywnienia poszycia są rozmieszczone gęsto. Wynika to z niekorzystnego sposobu obciążenia naciskiem opon pojazdów.



Rys. IV.14 Konstrukcja kadłuba statku Ro-Ro

Do kategorii statków poziomego ładowania należą **promy pasażersko – samochodowe**. Pod pokładem górnym transportowane są samochody osobowe lub ciężarowe. Nad pokładem górnym znajduje się potężna nadbudówka, w której mieści się część hotelowa statku.

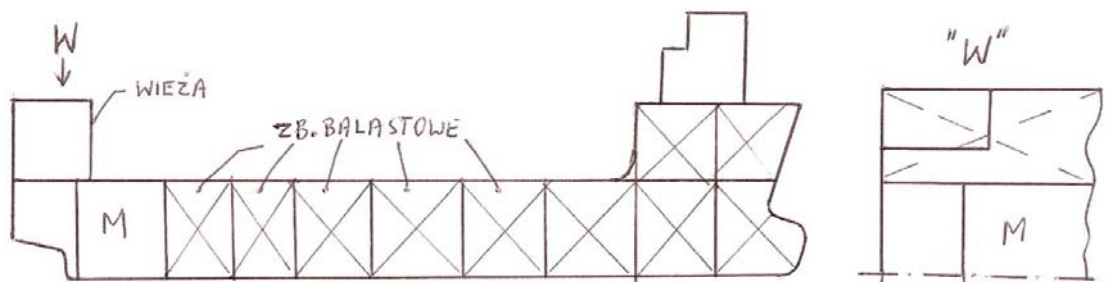
### Statki 'heavy-lift'

Schemat podziału przestrzennego takiego statku pokazano na rys. IV.15. Charakterystyczne cechy to wysoka dziobówka i dwie 'wieże' w części rufowej, nad pokładem górnym. Pod pokładem górnym mieści się maszynownia i system zbiorników balastowych. Zapełnienie tych zbiorników pozwala zanurzyć statek tak, że jego pokład górny znajdzie się kilka metrów



pod wodą. Dzięki dziobówce i ‘wieżom’ statek zachowuje wystarczającą stateczność pływania. W takim położeniu statku można nasunąć nad jego pokład inny obiekt pływający ( np. półzanurzalną platformę wiertniczą ). Odpompowanie wody ze zbiorników balastowych statku spowoduje jego wynurzenie z innym obiektem opartym na jego pokładzie. Obiekt ten może w ten sposób być transportowany na znaczne odległości.

Przykładowa nośność takiego statku to 55000 ton, przy wymiarach :  $L_{BP}=206$  m,  $B=42$  m,  $H=13,3$  m.



Rys. IV.15 Statek ‘heavy-lift’

### Siarkowce do transportu płynnej siarki

Istnieją statki, które transportują siarkę w stanie płynnym w zbiornikach wstawianych do kadłuba. Zbiorniki są izolowane termicznie, gdyż utrzymywanie siarki w stanie płynnym wymaga utrzymywania jej temperatury w przedziale  $135^{\circ}\text{C}$  do  $145^{\circ}\text{C}$ , dzięki specjalnej instalacji grzewczej.

Podział przestrzenny takich statków jest podobny do gazowca pokazanego na rys. IV.6-c. W każdej z czterech ładowni jest jeden zbiornik wstawiany opierający się na dnie statku poprzez specjalne fundamenty.

Przykładowa nośność takiego statku to ok. 15500 ton, przy wymiarach kadłuba:  $L_{BP}=138$  m,  $B=23$  m,  $H=12,1$  m.

Statki tego typu były budowane ok. roku 1999 w Stoczni Szczecińskiej.

### Inne typy statków

Istnieje wiele typów statków dostosowanych do przewidywanych dla nich specyficznych zadań bądź form transportu ładunków.

Warto wymienić takie popularne typy statków jak:

- barkowce;
- holowniki/ pchacze;
- statki rybackie;
- statki zaopatrujące obiekty ‘offshore’;
- statki do układania kabli na dnie morza;
- pogłębiarki;
- szalandy;
- dźwigi pływające.

## Statki łączące kilka funkcji

Istnieją statki łączące funkcje statków różnych typów. Niżej opisano pobieżnie 3 typy takich statków.

### Statki 'con-ro'

Statek jest jednocześnie kontenerowcem i statkiem 'Ro-Ro'. Maszynownia jest usytuowana na śródokręciu. Część statku przed maszynownią ma cechy klasycznego kontenerowca, który znaczną liczbę kontenerów transportuje na pokrywach luków. W ładowniach są natomiast stałe prowadnice.

Część statku za maszynownią ma cechy statku 'Ro-Ro'. Ładunek dostaje się do statku poprzez furtę rufową.

### Statki wielozadaniowe

Statki te są przystosowane do transportu drobnicy, ładunków masowych i kontenerów. Rodzajem takiego statku jest więc uniwersalny drobnicowiec omówiony na początku niniejszego rozdziału.

Popularne statki tego typu to niewielkie statki (nośność rzędu 2000 ton, długość rzędu 90 m) mające tylko jedną ładownię. Statek ma podwójne dno i podwójne burty. Otwór lukowy jest bardzo szeroki – obejmuje on całą przestrzeń pomiędzy burtami wewnętrznymi.

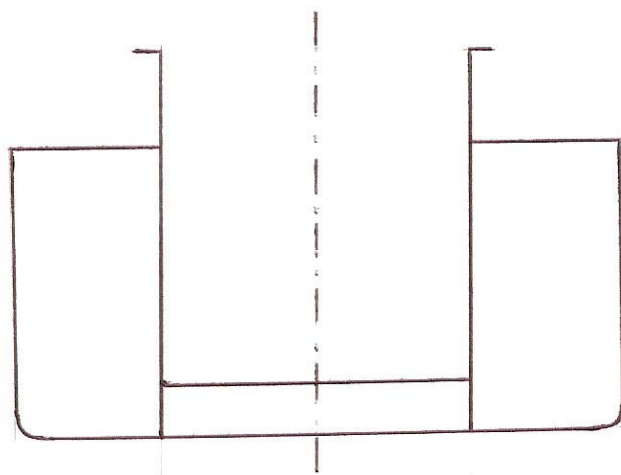
### Statki OBO

Skrót 'OBO' znaczy 'oil/bulk/ore'. Statek łączy więc funkcje tankowca i masowca dostosowanego do transportu ciężkich ładunków masowych jak ruda żelaza. Podział przestrzenny statku jest taki jak na klasycznym masowcu, tzn. statek ma zbiorniki obłowe i szczytowe i przynajmniej 5 ładowni. Pokrywy luków o specjalnej konstrukcji zapewniają odpowiednią szczelność przy transporcie ropy naftowej w ładowniach.

### Statki 'O/O'

Przed wejściem w życie wymagań konwencji MARPOL dotyczących statków transportujących ropę naftową lub produkty jej przerobu popularne były statki 'O/O'. Skrót 'O/O' znaczy 'ore/oil'. Statek może więc transportować ciężki ładunek masowy jak ruda żelaza lub ropę naftową. Przekrój poprzeczny takiego statku pokazano na rys. IV.16. Ropa naftowa była transportowana w ładowni w rejonie PS statku i w zbiornikach bocznych. Do transportu rudy wystarcza przestrzeń w ładowniach (pomiędzy zbiornikami bocznymi), gdyż gęstość ładunku to wielkość rzędu  $3 \text{ t/m}^3$ . Ładunek masowy sięga przy tym do pokryw lukowych. Dzięki temu statek nie jest zbyt sztywny ze względu na kołysania boczne, tzn. okres kołysań własnych jest wystarczająco duży. Otwory lukowe obejmujące całą szerokość ładowni zapewniają efektywność operacji załadunku i wyładunku statku.

Są to statki raczej duże, tzn. o wielkości przynajmniej 'panamax'. Statek zazwyczaj ma 4 ładownie.



Rys. IV.16 Przekrój poprzeczny statku O/O

## **V. OBCIĄŻENIA KADŁUBA STATKU**

### **Wstęp**

Kadłub każdego statku podlega obciążeniom zewnętrznym w formie ciśnienia wody obciążającej poszycie i obciążeniom wewnętrznym – w formie ciśnienia ładunku płynnego lub masowego, balastu wodnego lub paliwa, oddziaływania ładunku drobniczowego lub kontenerów, nacisku kół pojazdów, itp.

Obciążenia te wywołują naprężenia i odkształcenia elementów konstrukcji kadłuba.

Projektując kadłub statku należy tak dobrać wymiary elementów konstrukcji i materiał z którego są one wykonane aby naprężenia nie powodowały takich niedopuszczalnych efektów jak:

- płynięcie plastyczne materiału;
- wyboczenie elementów konstrukcji;
- pękanie zmęczeniowe.

W pewnych sytuacjach należy także zapewnić wymaganą sztywność elementów konstrukcji kadłuba.

Konstrukcja kadłuba statku jest zazwyczaj projektowana wg wymagań przepisów klasyfikacji i budowy statków. Podane tam są zasady wyznaczania tzw. obciążeń obliczeniowych oraz kryteria wytrzymałościowe i sztywności konstrukcji.

Powyższe zagadnienia będą szerzej omawiane w dalszej części wykładu

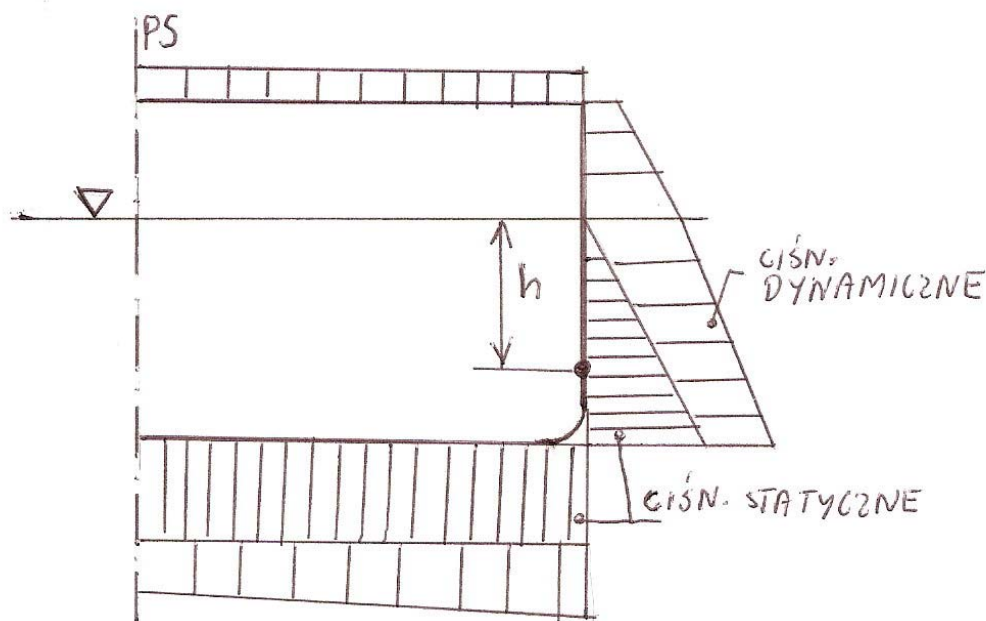
### **OBCIĄŻENIA LOKALNE KADŁUBA STATKU**

Obciążenia lokalne to obciążenia wspomniane wyżej, w części ‘wstęp’. Obliczeniowe wartości tych obciążeń służą do wymiarowania płyt poszycia, usztywnień poszycia i wiązarów.

Obciążenia te powodują także globalne odkształcenia kadłuba, takie jak zginanie ogólne w płaszczyznach pionowej i poziomej oraz skręcanie. Te zagadnienia są omawiane w dalszej części niniejszego rozdziału.

### **Ciśnienia zewnętrzne**

Ciśnienia zewnętrzne od wody zaburtowej zwyczajowo rozdziela się na ciśnienia statyczne i ciśnienia dynamiczne (rys. V.1).



Rys. V.1 Ciśnienia zewnętrzne obciążające poszycie kadłuba

Ciśnienia statyczne działają na kadłub statku pływający w wodzie spokojnej, tzn. bez falowania. Wartość tych ciśnień określa się wg wzoru:

$$p = \rho gh \quad (1)$$

Gdzie:

$p$  – ciśnienie;

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

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

$h$  – odległość w pionie od powierzchni wody.

Gdy statek pływa w wodzie pofalowanej, to podlega dodatkowo tzw. ciśnieniom dynamicznym. Mają one związek z ruchami kadłuba w wodzie i z wartościami ciśnień w wodzie pofalowanej. Ciśnienia te mają charakter losowy. Duże doświadczenie w zakresie prognozowania tych obciążeń z zastosowaniem metod wykorzystujących teorię prawdopodobieństwa zgromadziły towarzystwa klasyfikacyjne.

Charakterystyczne wartości ciśnień dynamicznych, przekraczane w ciągu zakładanego okresu eksploatacji statku (zazwyczaj 20 lat) z zadaniem prawdopodobieństwem (np. o wartości  $10^{-4}$ ) wyznacza się zazwyczaj w przybliżeniu, stosując wzory podane w przepisach budowy i klasyfikacji statków.

Niżej opisano **sposób wyznaczenia ciśnień zewnętrznych (statycznych i dynamicznych) wg Przepisów PRS [1]**.

Obliczeniowe wartości ciśnień obciążających poszycie kadłuba zależą od współrzędnych  $(x, y, z)$ , które są wyznaczane w następującym układzie współrzędnych:

- oś  $x$  w PS statku, w płaszczyźnie podstawowej; zwrócona w stronę dziobu;  $x=0$  w płaszczyźnie owręza;
- oś  $y$  w płaszczyźnie podstawowej; zwrócona ku lewej burcie;
- oś  $z$  pionowo w górę.

We wzorze na ciśnienia dynamiczne wystąpią amplitudy takich ruchów kadłuba jak nurzanie (premieszczenia pionowe środka masy statku), kołysania poprzeczne (ruchy

obrotowe wokół osi wzdłużnej leżącej na wodnicy) i kołysania wzdłużne ( ruchy obrotowe wokół osi poprzecznej leżącej w płaszczyźnie wodnicy). Obliczeniowe wartości amplitud tych ruchów, wyznaczane wg podanych niżej formuł parametrycznych, są w przybliżeniu przekraczane z prawdopodobieństwem  $10^{-8}$  w ciągu zakładanego czasu eksploatacji statku ( zazwyczaj 20 lat).

Amplituda nurzania ( w metrach):

$$Z_A = 12 - 0,1T \quad (2)$$

gdzie: T – zanurzenie projektowe statku ( w metrach).

Amplituda kołysań poprzecznych ( w radianach):

$$\Phi_A = 35 \frac{T}{B^2 + 50} \quad (3)$$

gdzie:

T – jak w (2);

B – szerokość statku ( w metrach).

Amplituda kołysań poprzecznych ( w radianach ):

$$\Theta_A = 4(1 - 4,5 \frac{T}{L_0}) \frac{C_w}{L_0} \quad (4)$$

gdzie:

T – jak wyżej;

$L_0$  – długość obliczeniowa statku ( w metrach);

$C_w$  – tzw. współczynnik falowy:

$C_w = 0,0792 L_0$  – dla  $L_0 \leq 100$  m;

$$C_w = 10,75 - \left( \frac{300 - L_0}{100} \right)^{3/2} \quad \text{ - dla } 100 \text{ m} \leq L_0 < 300 \text{ m.}$$

Obliczeniowa wartość dynamicznego ciśnienia obliczeniowego w punkcie (x,y,z) poszycia ( w kPa):

$$p_{db} = (1 + 0,036V)[0,7Z_A + k_x \Theta_A + 3|y|\Phi_A] + 0,02L_0[10 - 0,25(T - z)] \quad (5)$$

gdzie:

V – prędkość eksploatacyjna statku ( w węzłach);

$k_x = -4(x + 0,05L_0)$  – dla  $x < -0,05 L_0$

$k_x = 5,4(x + 0,05L_0)$  – dla  $x \geq -0,05L_0$

pozostałe parametry – jak w równaniach (2) do (4).

Ciśnienie dynamiczne przyjmowane wg Przepisów [1] do wymiarowania elementów konstrukcji kadłuba stanowią połowę ciśnień obliczanych wg wzoru (5) co odpowiada w przybliżeniu prawdopodobieństwu przekroczenia ich wartości  $10^{-4}$ .

Ciśnienia obliczeniowe powyżej wodnicy także są obliczane wg formuł parametrycznych, które tutaj nie będą jednak przytaczane.

Do wyznaczenia obciążeń obliczeniowych od ładunku lub zapasów na statku potrzebne są wartości przyspieszeń obliczeniowych w kierunku wzdłużnym, poprzecznym i pionowym statku. Przepisy [1] zawierają stosowne formuły parametryczne. Niżej przytoczono tylko formułę do obliczania przyspieszeń pionowych, przekraczanych z prawdopodobieństwem  $10^{-8}$  ( w  $m/s^2$ ):

$$a_v = (1 + 0,036V) \frac{25}{L_0} \{Z_A^2 + [1,6(x + 0,05L_0)\Theta_A]^2 + [0,5y\Phi_A]^2\}^{1/2} \quad (6)$$

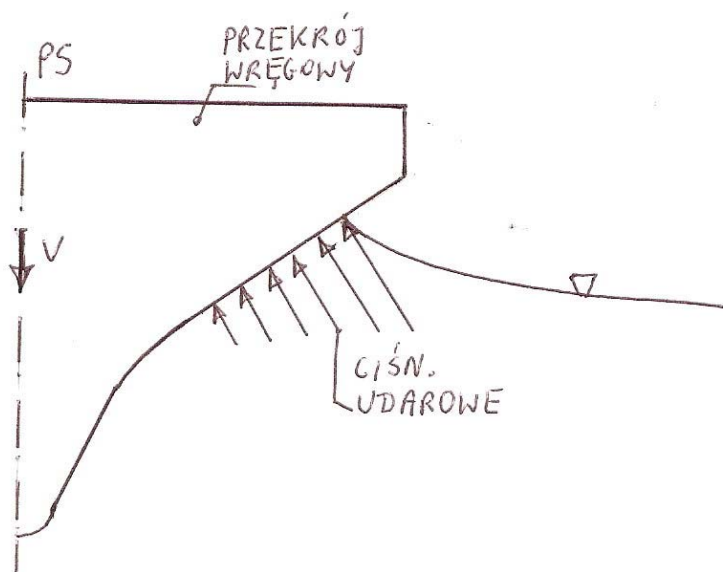
Znaczenie parametrów w powyższym wzorze jest takie jak we wzorach (2) do (5).

Do kategorii ciśnień zewnętrznych należą także ciśnienia od **slemingu**. Zjawisko slemingu to uderzanie statku dnem o wodę. Zjawisko to występuje w ciężkich warunkach sztormowych przy względnie małym zanurzeniu statku – np. w czasie rejsu w stanie balastowym. Ruchy nurzania i kołysań wzdłużnych statku mogą w takich warunkach osiągać tak duży poziom, że dochodzi do chwilowego całkowitego wynurzenia dziobowej części statku a następnie do uderzenia o powierzchnię wody. W takich warunkach mogą na dno statku krótkotrwale działać ciśnienia przewyższające ciśnienia statyczne i dynamiczne omówione wyżej. Wartość tych ciśnień może nawet przekraczać 300 kPa ( rys. V.2)



Rys. V.2 Sleming

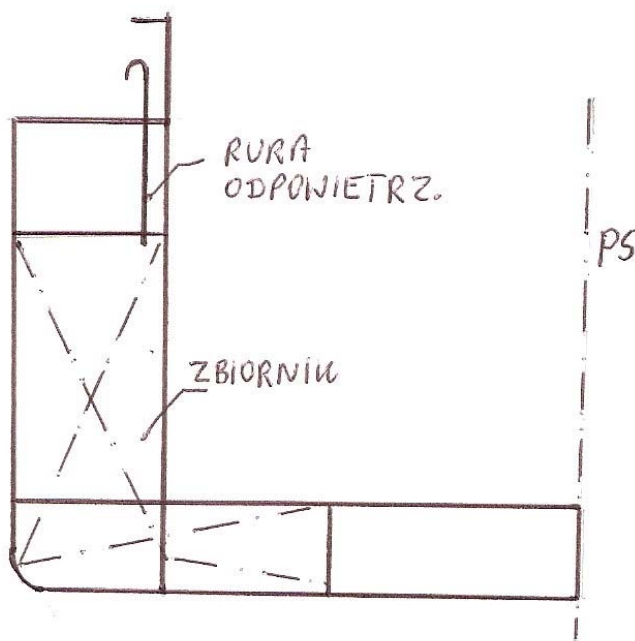
Ciśnienia o charakterze udarowym działają także na poszycie dziobowej części kadłubów statków powyżej wodnicy konstrukcyjnej, gdzie zastosowano kształt wręgów o znacznym rozchyleniu. Zjawisko to zwane **slemingiem burtowym** występuje w warunkach sztormowych i ma związek z ruchami kadłuba ( nurzanie i kołysania wzdłużne) ( rys. V.3).



Rys. V.3 Sleming burtowy

### Ciśnienia wewnętrzne od ładunku płynnego, balastu lub paliwa

Ciecz wypełniająca zbiorniki statku działa w formie ciśnienia obciążającego ściany zbiorników. Zbiorniki są wyposażone w rury odpowietrzające (rys. V.4) lub zawory bezpieczeństwa. Wypełnienie cieczą rury odpowietrzającej lub wzrost ciśnienia pary w zbiorniku z zaworem bezpieczeństwa skutkuje wzrostem ciśnienia w zbiorniku.



Rys. V.4 Odpowietrzenie zbiornika

Ruchy kadłuba statku w pofalowanej wodzie powodują wzrost wartości ciśnień ponad ciśnienia statyczne wskutek przyspieszeń ruchów – głównie w kierunku pionowym.

Przyspieszenia te mają charakter losowy.

Obliczeniowa wartość przyspieszenia pionowego, niezbędna do wyznaczenia ciśnienia obliczeniowego, jest wyznaczana wg wzoru (6).

Ciśnienie stosowane do wymiarowania elementów konstrukcji zbiorników wg Przepisów PRS [1] ma największą wartość spośród obliczonych wg poniższych wzorów (7) do (9).

$$p_1 = \rho(g + 0,5a_v)h_a \quad (7)$$

$$p_2 = 0,67 \rho g h_p \quad (8)$$

$$p_3 = \rho g h_a + p_0 \quad (9)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość cieczy (nie mniej niż 1,025 t/m<sup>3</sup>;

$g$  – przyspieszenie ziemskie;

$h_a$  – pionowa odległość od punktu, gdzie określamy ciśnienie, do szczytu zbiornika;

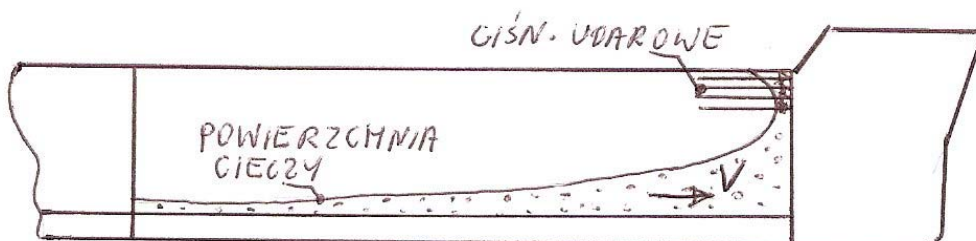
$h_p$  – pionowa odległość od punktu, gdzie określamy ciśnienie, do górnego zakończenia rury odpowietrzającej;

$p_0$  – ciśnienie, przy którym otwiera się zawór bezpieczeństwa (przyjmować  $p_0$  nie mniejsze niż 25 kPa).

W długich lub szerokich zbiornikach bez przegród wewnętrznych może wystąpić **sloshing**.



Jest to zjawisko przemieszczania się cieczy w niekompletnie zapełnionym zbiorniku, wskutek ruchów kadłuba w pofalowanej wodzie. Uderzające w ściany zbiornika masy rozprężonej cieczy generują krótkotrwałe ciśnienia o znacznych wartościach (nawet 300kPa i więcej) – szczególnie w rejonach narożników zbiornika (rys. V.5). Jest to zjawisko niekorzystne ze względu na wytrzymałość konstrukcji. Podstawowa metoda zmniejszania ciśnienia od sloshingu polega na zainstalowaniu w zbiorniku tzw. grodzi przelewowych, które nie pozwalają na nadmierne rozpędzanie się cieczy.



Rys. V.5 Sloshing

#### Obciążenia od ładunków stałych

Ładunki masowe naciskają wprost na ściany ładowni. Ciśnienie od ładunku masowego wyznacza się podobnie jak ciśnienie od cieczy ale uwzględnia się tarcie wewnętrzne, którego miarą jest tzw. kąt usypu ładunku  $\gamma$ . Wg Przepisów PRS [1] ciśnienie od ładunku masowego oblicza się wg wzoru:

$$p = \rho_c (g + 0,5a_v) h K \quad (10)$$

gdzie:

$\rho_c$  – gęstość ładunku masowego ( 3 t/m<sup>3</sup> w przypadku rudy żelaza; 1,4 t/m<sup>3</sup> w przypadku cementu, itp.);

$g=9,81$  m/s<sup>2</sup> – przyspieszenie ziemskie;

$a_v$  – przyspieszenie obliczeniowe ( pionowe) wg wzoru ( 6 );

$h$  – odległość w pionie od powierzchni swobodnej ładunku do punktu, gdzie obliczamy ciśnienie;

$K = \sin^2 \alpha \gamma^2 (45^\circ - 0,5\gamma) + \cos^2 \alpha$

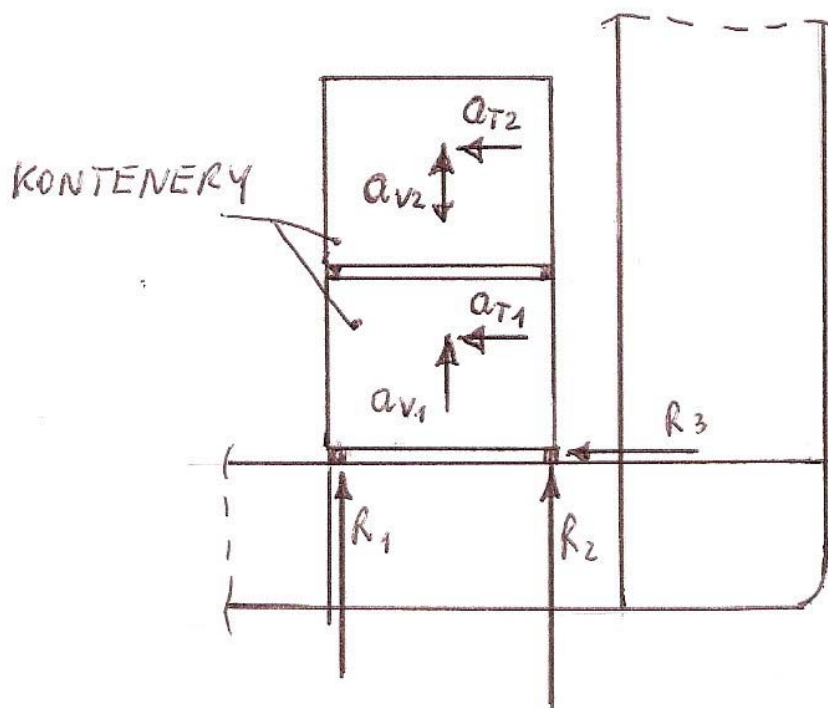
$\gamma$ - kąt usypu ładunku;

$\alpha$  – kąt pomiędzy płaszczyzną na którą naciska ładunek a poziomem.

W przypadku ładunków drobnicowych obciążenia obliczeniowe wyznacza się podobnie jak w przypadku ładunku masowego, przyjmując umowną wartość  $\rho_c = 0,7$  t/m<sup>3</sup> lub rzeczywistą zakładaną wartość obciążenia. Obciążenie nie jest przykładane do bocznych ścian ładowni. Ma ono zastosowanie tylko do dna wewnętrznego i pokładów. W przypadku ładunków nietypowych może być konieczne uwzględnienie nacisków tego ładunku na dno lub pokłady w formie sił skupionych.

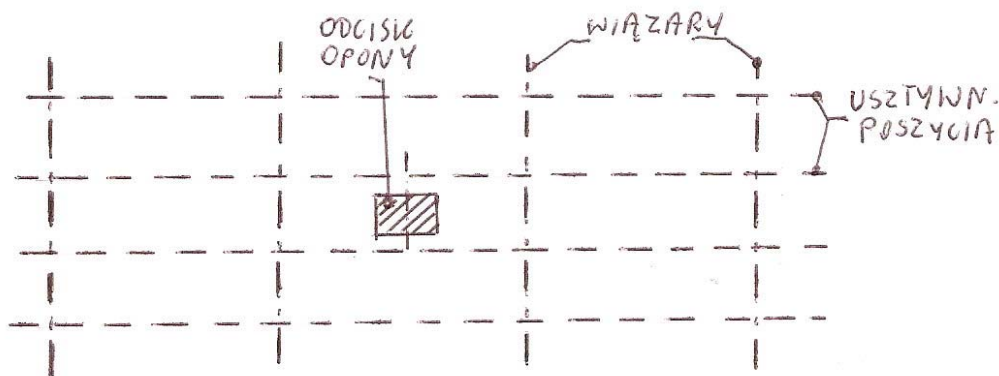
Obciążenie od kontenerów działa na kadłub w formie sił skupionych pod narożnikami kontenerów, gdzie w konstrukcji kadłuba są zamontowane specjalne standardowe gniazda. Wymagane jest zamontowanie specjalnych lokalnych wzmocnień konstrukcji kadłuba, które podpierają gniazda kontenerów. Wartości sił reakcji w gniazdach kontenerów zależą od

przyspieszeń pionowych  $a_v$  i poprzecznych  $a_T$  którym podlega kadłub statku w warunkach falowania wody ( rys. V.6).



Rys. V.6 Obciążenia od kontenerów

Pokłady statków Ro-Ro muszą być projektowane z uwzględnieniem nacisków od kół pojazdów. Nacisk pojedynczego koła o wartości rzędu kilkudziesięciu kN obciąża płyty pokładu na powierzchni odcisku opony koła o wymiarach nie większych niż ( orientacyjnie ) 0,3 m x 0,3 m ( rys. V.7). Ciśnienie w miejscu nacisku osiąga więc wartości nawet rzędu 1000 kPa. Odpowiednią wytrzymałość zapewniają względnie grube płyty poszycia. Odstęp usztywnień poszycia jest względnie mały, tzn. nawet na dużych statkach może wynosić zaledwie 500 mm. Odstęp wiązarów podpierających usztywnienia poszycia także jest stosunkowo mały. W przypadku powszechnie stosowanego wzdłużnego systemu usztywnień pokładów jest on zazwyczaj równy dwóm odstępom wręgów.



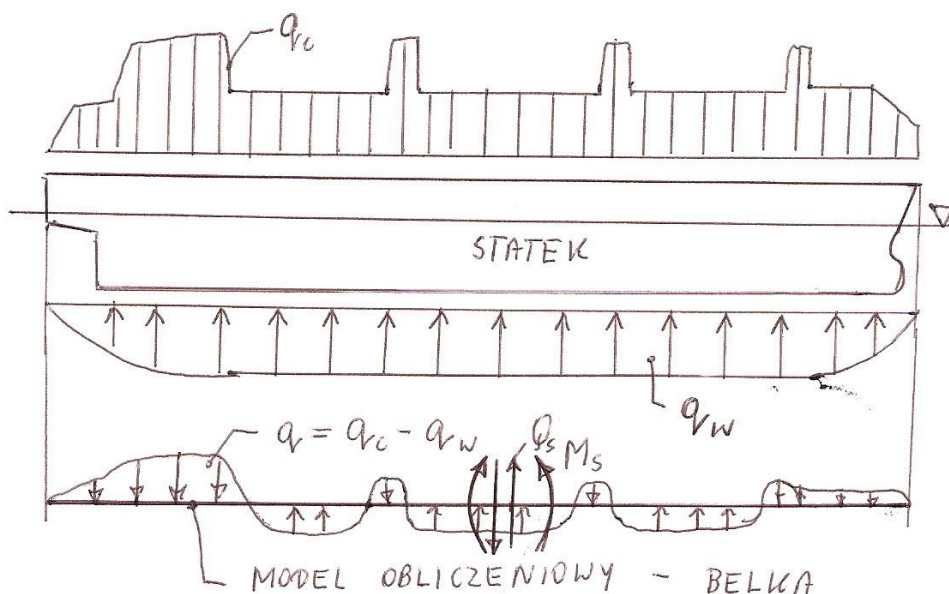
Rys. V.7 Odcisk opony pojazdu

### **OBCIĄŻENIA GLOBALNE KADŁUBA STATKU**

Obciążenia globalne to obciążenia całego kadłuba statku traktowanego jak belka zginana lub pręt skręcany. Obciążenia te wywołują siły wewnętrzne w kadłubie takie jak : moment zginający i siła ścinająca przy zginaniu w płaszczyźnie pionowej, moment zginający przy zginaniu w płaszczyźnie poziomej i moment skręcający.

#### **Zginanie ogólne kadłuba statku w płaszczyźnie pionowej**

Zginanie kadłuba występuje na wodzie spokojnej i w warunkach falowania wody. Zagadnienie zginania ogólnego kadłuba statku na wodzie spokojnej wyjaśnia rys. V.8. Statek jest w równowadze jako całość, tzn. wypadkowa siła ciężkości jest równoważona przez wypadkowy wypór. Obciążenie ciągłe  $q_c$  od ciężaru statku nie jest jednak równe w dowolnym miejscu obciążeniu od siły wyporu  $q_w$ . W wyniku tego w poszczególnych przekrojach poprzecznych kadłuba występują momenty zginające  $M_s$  i siły ścinające  $Q_s$ .



Rys. V.8 Zginanie ogólne kadłuba statku na wodzie spokojnej

Obciążenie  $q_w$  ma wartości obliczane ze wzoru:

$$q_w = \rho g A \quad (11)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość wody;

$g$  – przyspieszenie ziemskie;

$A$  – pole powierzchni przekroju wręgowego poniżej wodnicy.

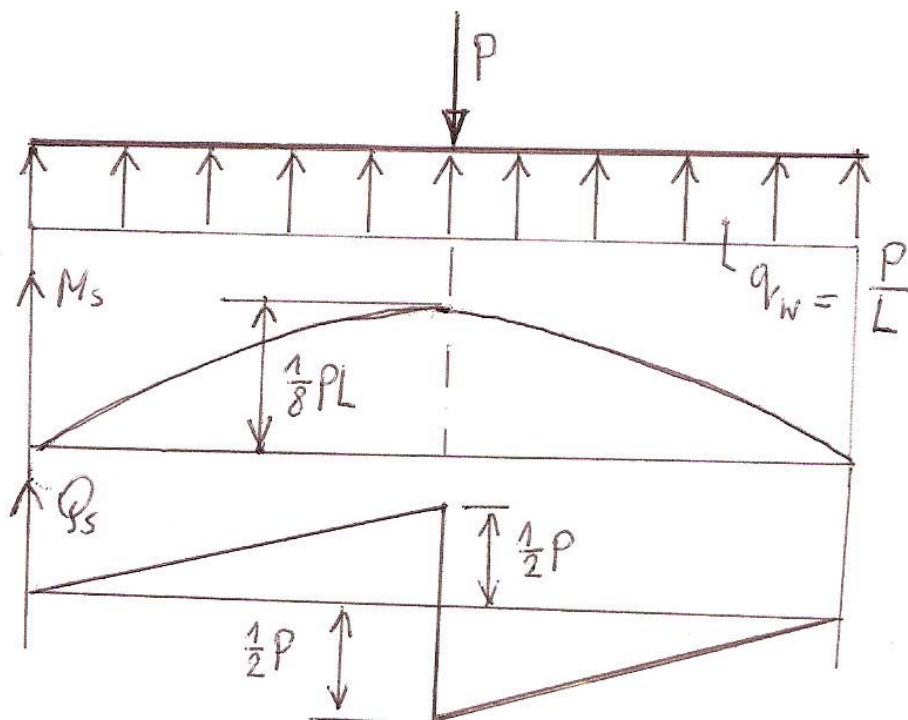
Siły wewnętrzne w przekroju o współrzędnej  $x$  ( $x=0$  na końcu rufowym) wyznaczmy ze wzorów:

$$Q_s(x) = \int_0^x [q_c(u) - q_w(u)] du \quad (12)$$

$$M_s(x) = \int_0^x Q_s(u) du \quad (13)$$

Wartości  $Q_s(x)$  i  $M_s(x)$  są obliczane w trakcie wykonywania obliczeń projektowych z zakresu stateczności statku.

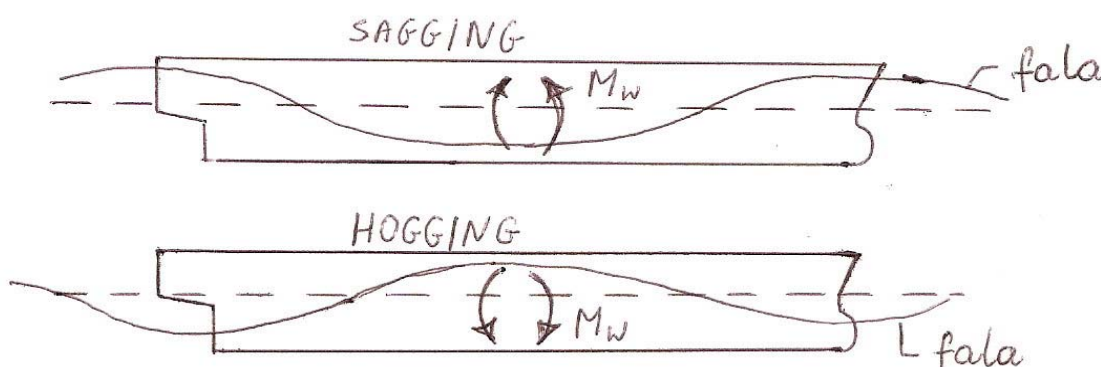
Prosty przykład sił wewnętrznych w prostopadłościennym pontonie o długości  $L$  obciążonego w środku długości siłą skupioną  $P$  pokazano na rys. V.9. Pominięto przy tym ciężar własny pontonu.



Rys. V.9 Przykład zginania prostopadłościennego pontonu

Zginanie ogólne kadłuba statku występuje w warunkach falowania wody. Generowane przy tym siły ścinające  $Q_w$  i momenty zginające  $M_w$  mają charakter losowy. Wartości tych sił wynikają z wartości ciśnień pofalowanej wody na powierzchni kadłuba i przemieszczeń ( z

przyspieszeniami) kadłuba względem powierzchni wody. Genezę tych sił wewnętrznych pokazano na rys. V.10, gdzie także zdefiniowano ustawienia statku względem fali zwane 'hogging' i 'sagging'.



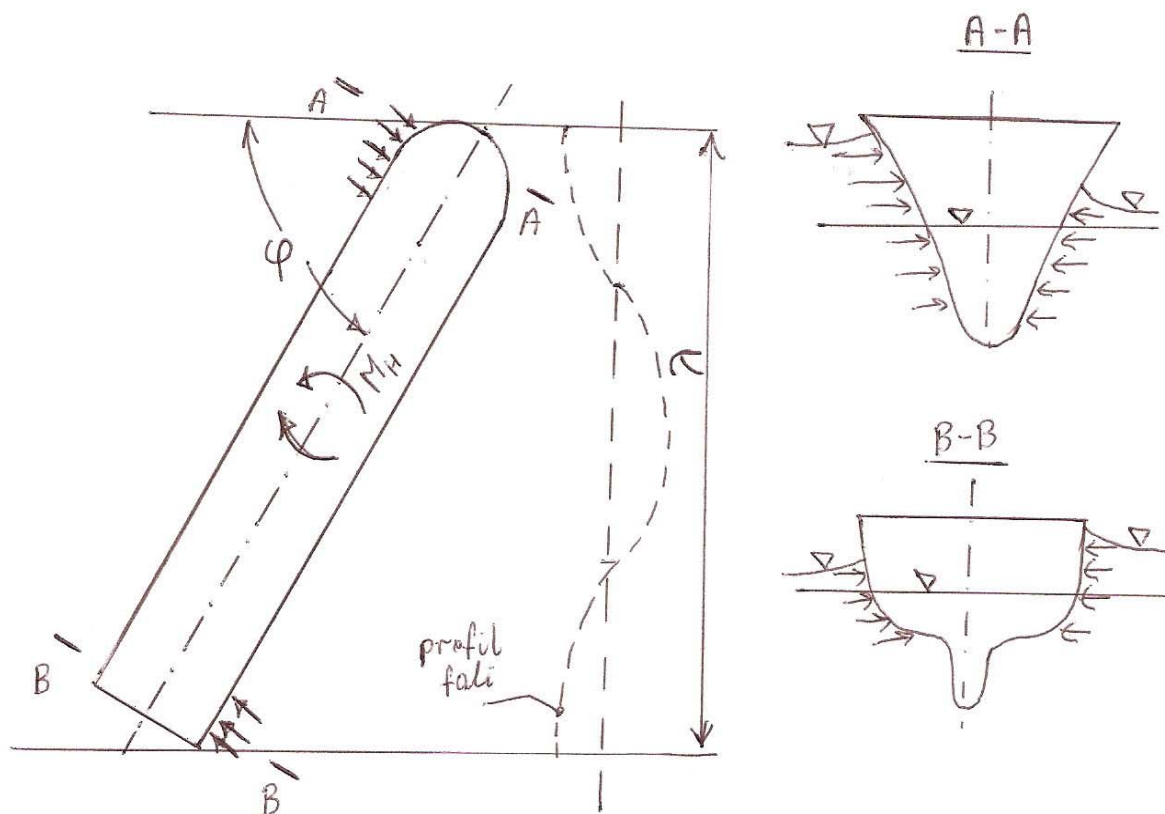
Rys. V.10 Zginanie kadłuba statku na fali

Obliczeniowe wartości  $Q_w$  i  $M_w$  są obliczane wg formuł parametrycznych podanych w Przepisach klasyfikacji i budowy statków ( np. w [1]). Formuły te pozwalają wyznaczyć przybliżone wartości sił wewnętrznych przekraczane w ciągu okresu eksploatacji statku ( 20 lat) z prawdopodobieństwem około  $10^{-8}$ .

Problem zginania ogólnego kadłuba w płaszczyźnie pionowej ma znaczenie w przypadku statków średnich i dużych, tzn. o długości większej niż 65 m. Im większy statek tym większy wpływ tego zjawiska na wymagane wymiary wiązań wzdlużnych w środkowej części kadłuba. W szczególności istotny jest wpływ na grubości blach pokładu wytrzymałościowego. W przypadku dużego kontenerowca wymagana może być nawet grubość blach rzędu 40 mm – aby spełnić kryteria wytrzymałości ogólnej omawiane w rozdziale VI.

#### Zginanie ogólne kadłuba w płaszczyźnie poziomej

Zginanie ogólne kadłuba statku w płaszczyźnie poziomej występuje w warunkach falowania morza. Momenty zginające  $M_H$  występują przy ukośnym ustawieniu statku względem fali pokazanym na rys. V.11. Są one przede wszystkim skutkiem asymetrycznego rozkładu ciśnienia wody na burty statku. Ekstremalne wartości  $M_H$  wystąpią przy wartości kąta  $\phi$  rzędu  $30^\circ$  i długości fali  $\lambda$  rzędu połowy długości statku.



Rys. V.11 Zginanie kadłuba statku w płaszczyźnie poziomej

Zginanie ogólne w płaszczyźnie poziomej może mieć wpływ na wymagane grubości blach burt i pokładu wytrzymałościowego w środkowej części kadłuba. Przyczynia się także istotnie do zjawiska zmęczenia połączeń wzdłużnych usztywnień burt statku z wręgami ramowymi lub grodziami.

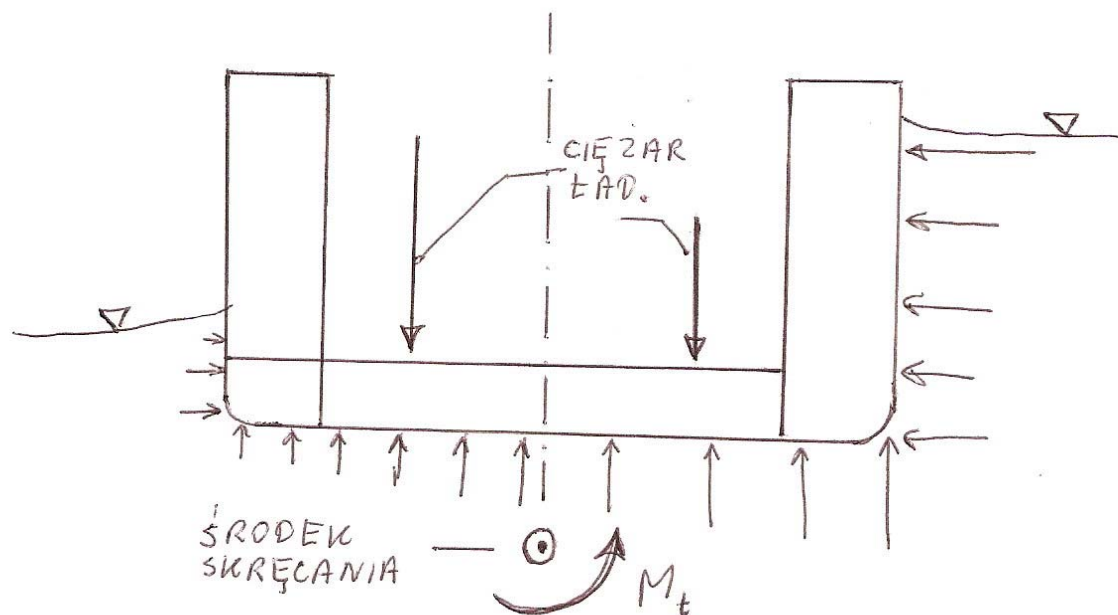
#### Skrećanie kadłuba statku

Skrećanie kadłuba jest istotnym problemem w przypadku statków z szerokimi otworami lukowymi ( np. kontenerowce).

Momenty skręcające  $M_t$  w kadłubie mogą powstawać na wodzie spokojnej i w warunkach falowania morza.

Skrećanie na wodzie spokojnej wynika z asymetrycznego rozkładu ciężaru ładunków lub zapasów względem PS statku ( rys. V.12).

Ekstremalne skrećanie w warunkach falowania morza powstaje jednocześnie z ekstremalnym zginaniem w płaszczyźnie poziomej ( rys. V.11) Momenty skręcające w kadłubie powstają w takich warunkach wskutek asymetrycznego rozkładu ciśnienia wody w przekrojach wręgowych ( rys.V.12). Dodatkowym czynnikiem zwiększającym moment skręcający jest położenie środka skręcania przekroju kadłuba z szerokimi lukami poniżej płaszczyzny podstawowej statku ( rys. V.12).



Rys. V.12 Generowanie momentu skręcającego w kadłubie statku z szerokimi lukami

Skręcanie kadłuba wywołuje deformacje stwarzające problemy ze szczelnością pokryw lukowych, zmianą wymiarów luków ładowni i komór dla kontenerów. W kadłubie powstają naprężenia przyczyniające się przede wszystkim do procesu degradacji zmęczeniowej materiału w rejonie naroży luków ładunkowych. Zagadnienia deformacji kadłuba i naprężeń w warunkach skręcania są szerzej omawiane w rozdziale VI.



## VI. NAPRĘŻENIA W ELEMENTACH KONSTRUKCJI KADŁUBA. KRYTERIUM NAPRĘŻEŃ DOPUSZCZALNYCH.

### Wstęp

Wymagane wymiary elementów konstrukcji kadłubów statków wynikają zazwyczaj ze stosowanych w przepisach towarzystw klasyfikacyjnych kryteriów wytrzymałościowych. Podstawowe kryterium dotyczy wartości naprężeń w elementach konstrukcji odpowiadających obliczeniowym wartościom obciążeń. Naprężenia te nie powinny przekroczyć pewnego dopuszczalnego poziomu, w zależności od wartości granicy plastyczności zastosowanej stali lub stopu aluminium.

Naprężenia w elementach konstrukcji kadłuba statku klasycznie są analizowane na następujących poziomach:

- a) naprężenia lokalne ( wytrzymałość lokalna poszycia i usztywnień poszycia);
- b) naprężenia w systemie wiązarów ( wytrzymałość strefowa);
- c) naprężenia globalne ( wytrzymałość ogólna).

Po wyznaczeniu naprężeń na powyższych trzech poziomach wyznaczane są sumaryczne naprężenia normalne we wzdlużnych elementach konstrukcji ( poszycie, usztywnienia wzdlużne, wiązary wzdlużne) i ich wartości są porównywane z wartościami dopuszczalnymi dla tego przypadku.

W niniejszym rozdziale omawiane są sposoby wyznaczania naprężeń w konstrukcji kadłuba na wymienionych wyżej poziomach i kryteria naprężeń dopuszczalnych.

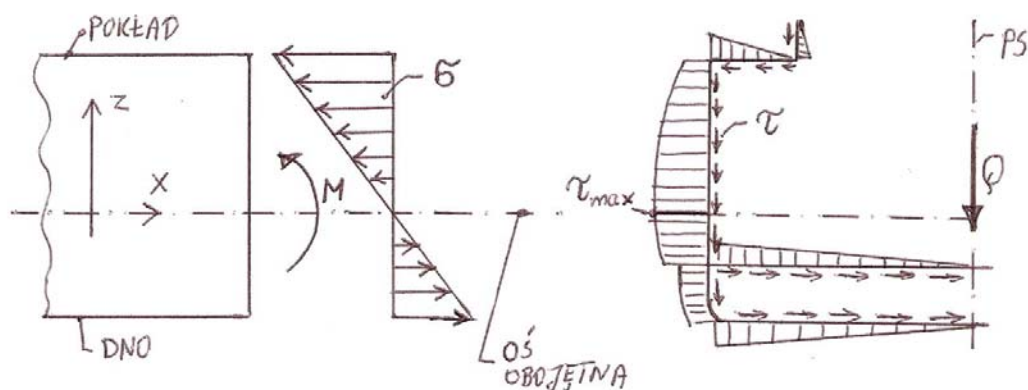
### WYTRZYMAŁOŚĆ OGÓLNA KADŁUBA STATKU

#### Zginanie ogólne w płaszczyźnie pionowej

W ramach analizy wytrzymałości ogólnej w pierwszej kolejności rozpatrywane jest zagadnienie zginania kadłuba w płaszczyźnie pionowej. Cały kadłub statku jest przy tym traktowany jako belka zginana ( o przekroju poprzecznym cienkościennym). W belce tej występują omówione w r.V siły wewnętrzne ( patrz rozdział V):

- całkowity moment zginający  $M = M_s + M_w$ ;
- całkowita siła poprzeczna ( ścinająca )  $Q = Q_s + Q_w$  .

Moment  $M$  wywołuje naprężenia normalne  $\sigma$  we wzdlużnych wiązaniach kadłuba o rozkładzie w przekrojach poprzecznych pokazanym na rys. VI.1. Siła  $Q$  wywołuje naprężenia styczne  $\tau$  w blachach poszycia i w ściankach wiązarów wzdlużnych o rozkładzie pokazanym na rys. VI.1. Zagadnienia rozkładu naprężeń  $\sigma$  i  $\tau$  w belkach były omawiane na wykładzie z *Wytrzymałości Materiałów*.



Rys. VI.1 Naprężenia w przekroju poprzecznym kadłuba statku



Napężenia  $\sigma$  mogą być przedstawione w formie wzoru:

$$\sigma = \frac{M}{I} z \quad (1)$$

gdzie:

M – określono wyżej;

I – moment bezwładności przekroju poprzecznego kadłuba utworzonego przez ciągłe elementy wzdłużne (poszycie, usztywnienia wzdłużne, wiazary wzdłużne);

z – współrzędna pionowa ( patrz rys. VI.1).

Ekstremalne wartości  $\sigma$  występują w skrajnych elementach przekroju, tzn w pokładzie i w dnie a ich wartości mogą być obliczone wg wzoru:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (2)$$

gdzie:

$W = \frac{I}{e}$  - wskaźnik wytrzymałości przekroju; e jest odległością dna lub pokładu od osi obojętnej.

Zazwyczaj większa bezwzględna wartość  $\sigma$  występuje w wiazaniach pokładu wytrzymałościowego, gdyż w pokładzie na ogół są otwory lukowe a dno ma zazwyczaj konstrukcję masywną.

Przekrój poprzeczny ma być tak masywny, że spełnione będzie następujące kryterium wytrzymałościowe stosowane w Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych ( np. w [1]):

$$\sigma = \frac{|M_s + M_w|}{W} \leq 175k \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

gdzie:

$M_s$  – ekstremalna wartość momentu zginającego na wodzie spokojnej spośród tzw. projektowych stanów załadowania rozpatrywanych przy projektowaniu statku;

$M_w$  – obliczeniowa wartość tzw. falowego momentu zginającego, określana wg formuł parametrycznych podanych w Przepisach ( np. w [1]) ( w zależności od wartości długości obliczeniowej  $L_0$ , szerokości B kadłuba i współczynnika pełnotliwości  $\delta$ );

k – współczynnik uwzględniający wartość granicy plastyczności stali Re.

Wartość 175k ( [MPa]) ma znaczenie naprężeń dopuszczalnych.

Zagadnienie stali stosowanych na kadłuby statków są szerzej omawiane w dalszej części wykładu. Na tym etapie rozważań przyjmijmy do wiadomości , że stosowana jest tzw. stal o normalnej wytrzymałości ( oznaczana w przepisach [1] symbolem NW; Re = 235 MPa, k=1,0) i stale o podwyższonej wytrzymałości ( PW) , o wartościach Re i k :

- PW32: Re =315 MPa, k=1.28;

- PW36: Re =355 MPa, k=1,39;

- PW 40: Re = 390MPa, k=1,47.

W liczniku wzoru (3) należy stosować wartości  $M_s$  i  $M_w$  tego samego znaku, tzn ‘hogging’ lub ‘sagging’ ( definicje podano na rys. V.10).

Charakterystyczną cechą  $M_s$  i  $M_w$  jest to, że ich ekstremalne wartości występują w środkowej części statku a na końcach statku przyjmują one wartości zerowe. Kryterium (3) decyduje więc o wymiarach ciągłych wiązań kadłuba w środkowej części kadłuba. Im większy statek tym większy wpływ tego kryterium na wymiary wiązań kadłuba.

Spełnienie tego kryterium w przypadku np. kontenerowca wielkości ‘panamax’ może wymusić zastosowanie blach poszycia pokładu górnego nawet o grubości 40 mm i większej.

W przypadku stosunkowo dużych statków celowe może być zastosowanie stali PW. Często stal PW jest stosowana tylko na wzdłużne wiązania kadłuba w środkowej części kadłuba, na pokład wytrzymałościowy i górne rejony burt lub grodzi wzdłużnych.

Naprężenia styczne od siły ścinającej  $Q$  zazwyczaj osiągają ekstremalne wartości w poszyciu burt ( patrz rys. VI.1). W Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych stosowane jest następujące kryterium wytrzymałości kadłuba na ścinanie:

$$\tau = \frac{|Q_s + Q_w|}{I} \frac{S}{2t} \leq 110k \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Gdzie:

$Q_s$ - wartości sił ścinających na wodzie spokojnej w tzw. projektowych stanach załadowania;

$Q_w$ - wartości falowych sił ścinających, określane wg formuł parametrycznych w przepisach towarzystw klasyfikacyjnych;

$I$  – jak we wzorze (1);

$S$  – moment statyczny ciągłych wiązań wzdłużnych leżących powyżej poziomu  $z$  gdzie określamy  $\tau$ ;  $z$  – współrzędna pionowa – patrz rys. VI.1;

$t$  – grubość poszycia burt na poziomie  $z$ ;

$k$  – współczynnik ( taki sam jak w równaniu (3).

Wartości  $Q_s$  i  $Q_w$  należy przyjmować tego samego znaku.

Charakterystyczny rozkład  $\tau$  w poszyciu przekroju poprzecznego kadłuba pokazano na rys. VI.1. W przypadku stałej wartości grubości  $t$  poszycia burt wzdłuż wysokości kadłuba ekstremalna wartość  $\tau$  wystąpi na poziomie osi obojętnej przekroju.

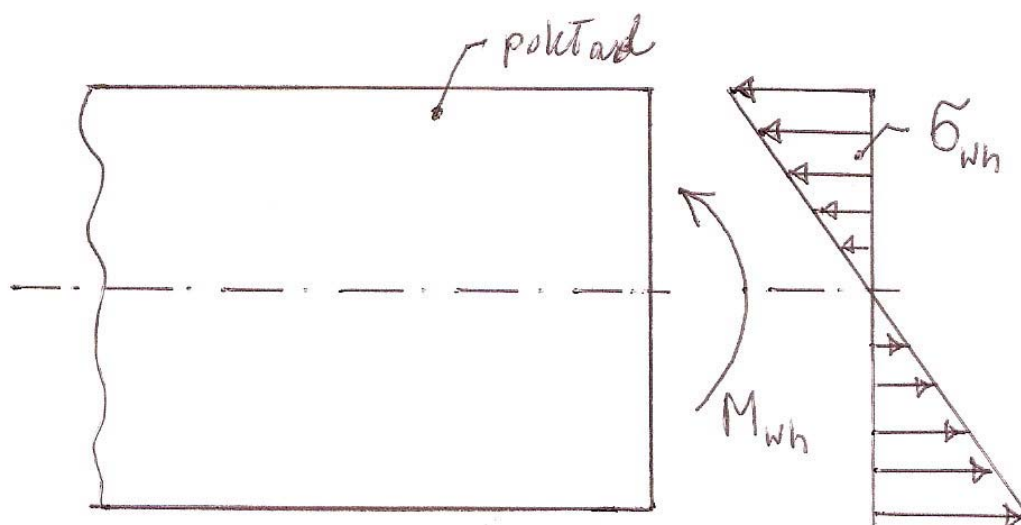
Kryterium w formie (4) może decydować o wymaganej grubości poszycia burt statków o nierównomiernym rozłożeniu ciężaru wzdłuż długości. Takim przypadkiem jest np. masowiec w stanie naprzemiennego załadowania ładowni ( co druga ładownia pusta).

W przypadku statków z burtami podwójnymi nie ma zazwyczaj problemów ze spełnieniem kryterium (4). Grubości  $t$  burt zewnętrznych i wewnętrznych spełniające kryteria wytrzymałości lokalnej ( zagadnienie omawiane w dalszej części niniejszego rozdziału ) zapewniają wystarczającą wytrzymałość na ścinanie w warunkach zginania ogólnego.

### Zginanie ogólne w płaszczyźnie poziomej

Geneza zginania ogólnego w płaszczyźnie poziomej została wyjaśniona w r.V.

Istotny jest tylko moment zginający  $M_{wh}$  (rys.VI.2). Wywołuje on naprężenia  $\sigma_{wh}$  w ciągłych wzdłużnych wiązaniach kadłuba o rozkładzie pokazanym na rys. VI.2.



Rys. VI.2 Naprężenia od zginania ogólnego kadłuba w płaszczyźnie poziomej

Naprężenia  $\sigma_{wh}$  sumują się z naprężeniami od zginania ogólnego kadłuba w płaszczyźnie pionowej. Wg wymagań Przepisów PRS [1] należy spełnić następujące kryterium:

$$\sigma_s + \sqrt{(\sigma_{wv}^2 + \sigma_{wh}^2)} \leq 195k \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

gdzie:

$\sigma_s$  – naprężenia od zginania ogólnego w płaszczyźnie pionowej na wodzie spokojnej;

$\sigma_{wv}$  - naprężenia od zginania ogólnego w płaszczyźnie pionowej na fali;

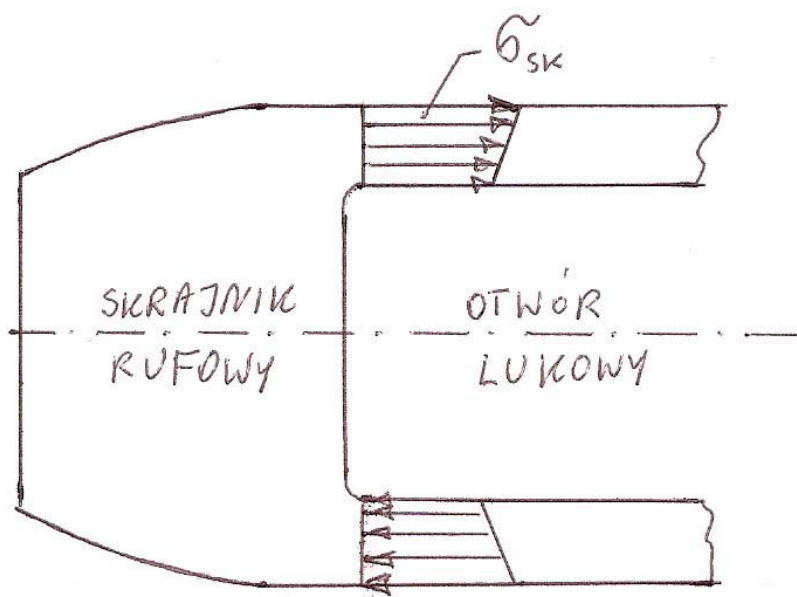
$k$  – współczynnik uwzględniający wytrzymałość stali.

$\sigma_{wh}$  osiągają na ogół maksymalny poziom rzędu zaledwie kilkudziesięciu MPa. Mają one jednak istotny wpływ na zmęczenie elementów konstrukcji burt kadłuba.

#### Skręcanie kadłuba statku

Skręcanie wywołuje istotne wartości naprężeń i odkształceń kadłubów statków z szerokimi otworami lukowymi – jak np. kontenerowce. Genezę skręcania wyjaśniono w r.V.

Zakończenie ładunkowej części kadłuba z szerokimi otworami lukowymi „zamkniętymi” częściami skrajnymi powoduje tzw. skrępowanie skręcania. Części zamknięte sprzeciwiają się bowiem tzw. deplanacji przekrojów poprzecznych (przemieszczenia w kierunku wzdłużnym, powodujące utratę płaskości przekroju) występującej przy skręcaniu prętów o przekrojach otwartych. Wywołuje to naprężenia normalne  $\sigma_{sk}$  kadłubie, których ekstremalne wartości, rzędu nawet kilkudziesięciu MPa, występują w pokładzie wytrzymałościowym, na końcach części ładunkowej. Charakterystyczny rozkład tych naprężeń pokazano na rys. VI.3.



Rys. VI.3 Naprężenia od skręcania kadłuba

Naprężenia  $\sigma_{sk}$  Sumują się z naprężeniami  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{wv}$ ,  $\sigma_{wh}$  i naprężeniami  $\sigma_b$  od zginania pasa pokładu przy burcie wskutek naporu wody zaburtowej na burtę ( pas pokładu opiera się na przewiązkach międzylukowych).

Wg Przepisów PRS [1] należy spełnić kryterium:

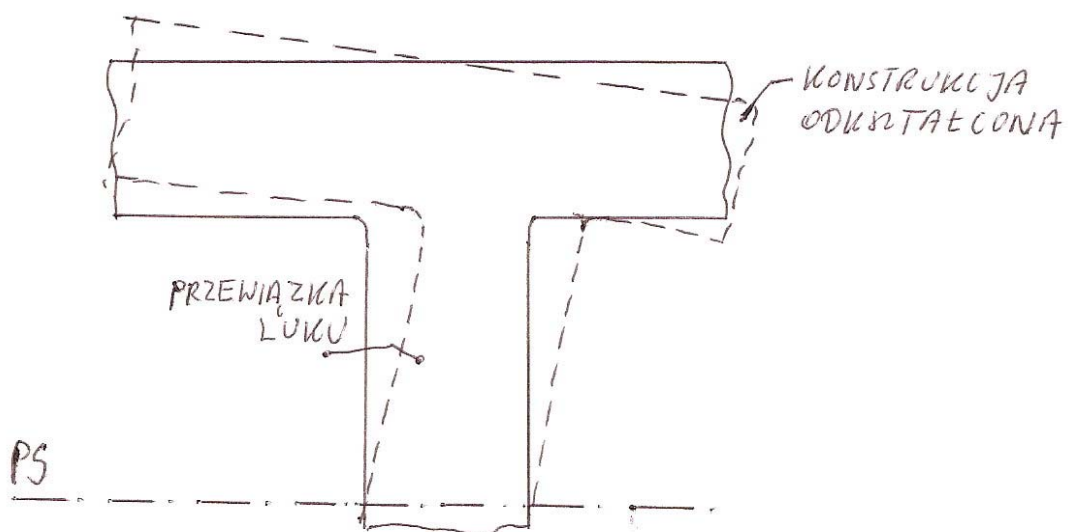
$$\sigma_s + 0,6\sigma_{wv} + \sigma_{wh} + \sigma_{sk} + \sigma_b \leq 195k \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Charakterystyczne jest to, że naprężenia styczne  $\tau$  przy skręcaniu są w przybliżeniu o jeden rząd wielkości mniejsze niż  $\sigma_{sk}$ .

Inny problem związany ze skręcaniem kadłuba to jego odkształcenia. Zmienia się kształt luków wskutek deplanacji przekrojów kadłuba ( rys. VI.4).

Należy tak zaprojektować kadłub aby zmiany długości przekątnych luków odpowiadające obliczeniowym wartościom momentu skręcającego były nie większe niż 35 mm – wg [1].

Naprężenia  $\sigma_{sk}$  w kadłubie mają także niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową konstrukcji kadłuba – szczególnie w rejonie naroży otworów lukowych.



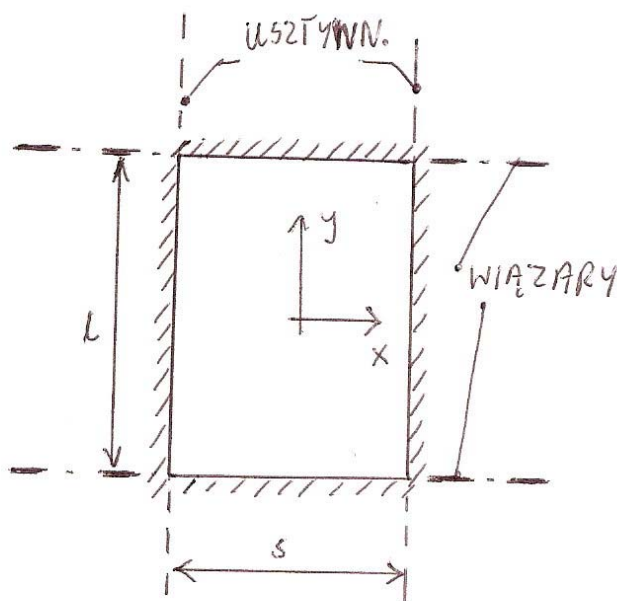
Rys. VI.4 Odkształcenia luków wskutek skręcania

Odkształcenia kadłuba wskutek skręcania powodują także odkształcenia prowadnic kontenerów w ładowniach. Przy nadmiernych deformacjach może dojść do zakleszczania się kontenerów w prowadnicach.

#### Wytrzymałość lokalna poszycia

W analizie wytrzymałości konstrukcji kadłuba można założyć, że usztywnienia i wiazary stanowią sztywne podpory poszycia.

W przypadku, gdy na płat poszycia o względnie dużych wymiarach działa ciśnienie  $p$  o wartościach zmieniających się w funkcji współrzędnych  $x$  i  $y$  nieznacznie, wystarczy analizować zginanie tzw. pojedynczej płyty poszycia, która obejmuje obszar pomiędzy sąsiednimi usztywnieniami i sąsiednimi wiazarami (rys. VI.5).



Rys. VI.5 Pojedyncza płyta poszycia

Naprężenia w płycie zależą od ugięcia  $w(x,y)$  powierzchni środkowej płyty (powierzchnia w połowie grubości płyty). W przypadku płyty zginanej w zakresie sprężystym  $w(x,y)$  jest rozwiązaniem następującego równania różniczkowego:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x,y)}{D} \quad (7)$$

gdzie:

$p(x,y)$  – ciśnienie działające na płytę;

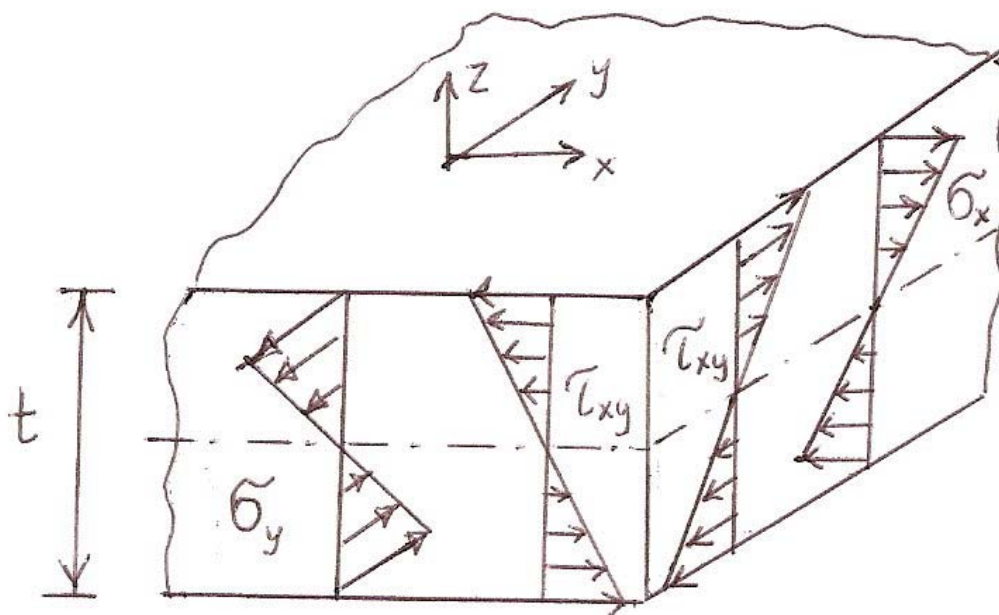
$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  – sztywność płytowa;

$E$  – moduł Younga materiału;

$\nu$  – współczynnik Poissona;

$t$  – grubość płyty.

Spośród naprężeń generowanych w płycie przy jej zginaniu istotne wartości mogą osiągać tylko naprężenia  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\tau_{xy}$ , pokazane na rys. VI.6.



Rys. VI.6 Naprężenia w płycie

Jeżeli znane jest rozwiązanie  $w(x,y)$  równania (7), to ekstremalne naprężenia w płycie (w punktach o współrzędnych  $(x,y)$  przy powierzchniach zewnętrznych płyty) wyznaczymy ze wzorów:

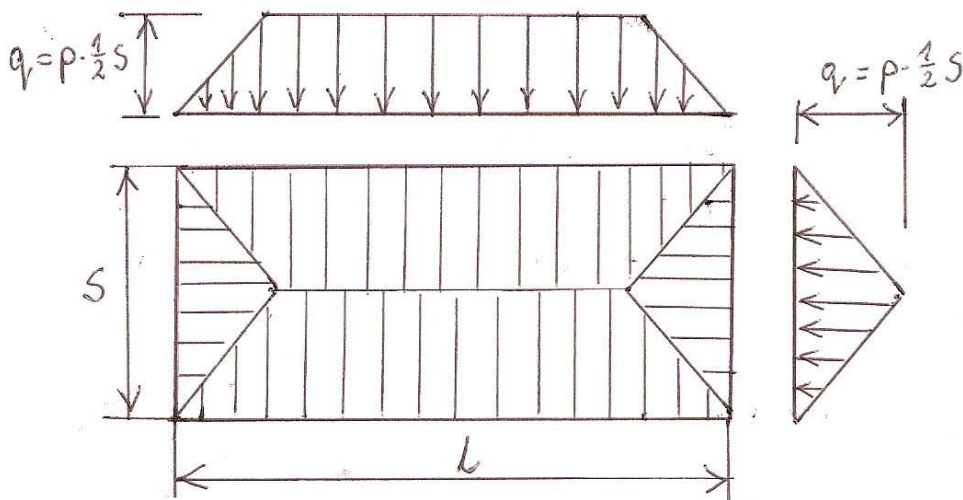
$$\sigma_x = -6 \frac{D}{t^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$\sigma_y = -6 \frac{D}{t^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = -6 \frac{D}{t^2} (1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

W przypadku płyty utwierdzonej na obwodzie, jak na rys. VI.5, i poddanej obciążeniu  $p(x,y)=\text{const}$  największe wyężenie materiału występuje w punktach na zewnętrznych powierzchniach płyty, w środku dłuższych krawędzi. Największe są tam naprężenia  $\sigma_x$  natomiast  $\sigma_y = \nu \sigma_x$ ,  $\tau_{xy} = 0$ .

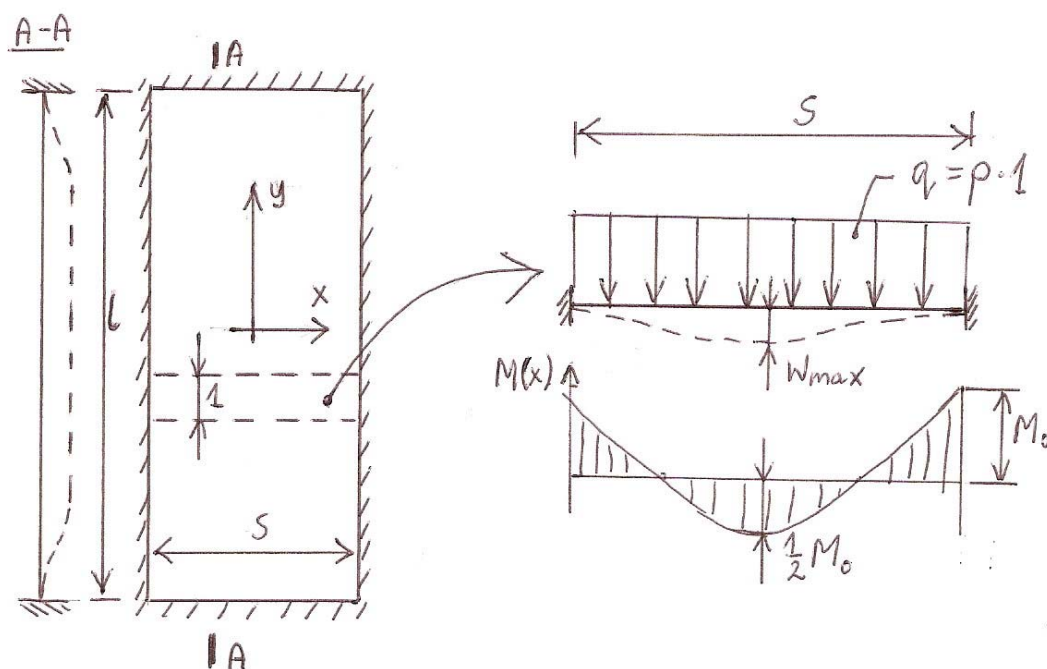
Płyta obciążona ciśnieniem jest podparta na brzegach przez usztywnienia i wiazary (rys. VI.5). Ze względu na wytrzymałość usztywnień i wiazarów istotny jest sposób rozkładu wzdłuż brzegów płyty (osi usztywnień i wiazarów) sił reakcji usztywnień i wiazarów na płytę. W przypadku  $p(x,y)=\text{const}$  te siły reakcji mają przybliżony rozkład, który można określić jako „kopertowy”. Oznacza to, że usztywnienia i wiazary przejmują obciążenie z obszarów pokazanych na rys. VI.7, których krawędzie mają kształt przypominający kopertę na listy.



Rys. VI.7 Rozdział obciążenia płyty na usztywnienia i wiazary

W przypadku płyty jak na rys. VI.5, obciążonej na całej powierzchni ciśnieniem  $p(x,y)=\text{const}$  i dla  $l/s > 2$  (orientacyjnie) wystąpi charakterystyczny kształt powierzchni płyty ugiętej (rys. VI.8). W środkowej części płyty krzywizna w płaszczyźnie  $(y,z)$  jest zerowa. Oznacza to, że ugięta powierzchnia środkowa płyty w części środkowej płyty ze względu na wartości współrzędnych  $y$  jest powierzchnią walcową, tzn. ugięcie wależy tutaj tylko od  $x$ . Do obliczenia naprężeń w tym rejonie płyty wystarczy zastosować model belki odpowiadającej paskowi płyty o jednostkowej szerokości w kierunku osi  $y$ .





Rys. VI.8 Zginanie walcowe płyty

Na rys. VI.8 pokazano także wykres momentu zginającego w powyższej belce. Ekstremalna wartość momentu zginającego  $M_0$  w belce ( przy brzegu płyty) wynosi:

$$M_0 = \frac{1}{12} p s^2 \quad (8)$$

Przekrój poprzeczny tej belki jest prostokątem o wysokości równej grubości  $t$  płyty i szerokości równej 1. Wskaźnik przekroju poprzecznego takiej belki wynosi:

$$W = \frac{1}{6} t^2 \quad (9)$$

Maksymalne naprężenia w płycie  $\sigma_{xmax} = \sigma$  :

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{1}{2} p \left( \frac{s}{t} \right)^2 \quad (10)$$

Pamiętajmy, że belka rozważana na rys. VI.8 nie może zmieniać swych wymiarów w kierunku osi  $y$  ponieważ należy ona do płyty uginającej się walcowo. Wskutek obowiązywania prawa Hooke'a naprężeniom  $\sigma_{xmax} = \sigma$  będą towarzyszyły naprężenia  $\sigma_y = \nu \sigma$ .

Model belki na rys. VI.8 służy także do wyznaczenia maksymalnego ugięcia płyty:

$$w_{max} = \frac{p s^4}{384 D} \quad (11)$$

Parametr  $D$  odpowiada w tym przypadku sztywności  $EI$  na zginanie klasycznej belki.

Jeżeli we wzorze (10) wartość  $\sigma$  potraktujemy jako dopuszczalną wartość naprężeń i przekształcimy ten wzór , to otrzymamy wzór do obliczania wymaganej grubości poszycia z warunku wytrzymałości lokalnej:

$$t = s \sqrt{\frac{p}{2\sigma}} \quad (12)$$

Jeżeli wzór (12) przekształcimy tak aby stosować tam niespójny system jednostek (tak jak w większości wzorów w Przepisach PRS [1]), tzn.  $s$  wyrazimy w [m],  $p$  – w [kPa] a  $\sigma$  w [MPa] i chcemy  $t$  otrzymać w [mm], to w miejsce powyższego wzoru otrzymamy:

$$t = 22,4s \sqrt{\frac{p}{\sigma}} \quad (13)$$

Wg Przepisów PRS [1] wymaganą grubość poszycia oblicza się wg wzoru:

$$t = 18k_a \sqrt{\frac{p}{\sigma}} + t_k \quad (14)$$

gdzie :

$$k_a = (1 - 0,27 \frac{s}{l})^2 \text{ - ale nie więcej niż } 0,88.$$

$l$ - długość dłuższego boku płyty;

$t_k$  – tzw. naddatek korozyjny ( patrz rozdział X );

pozostałe symbole i ich jednostki – jak we wzorze (13).

Największa wartość  $18k_a$  wynosi 15,8. Widzimy więc, że płyta wymiarowana wg wzoru (14) ma grubość rzędu  $15,8/22=0,72$  grubości płyty wymiarowanej wg wzoru (13) – przy tych samych wartościach  $p$  i  $\sigma$ .

W przypadkach płyt, w których naprężenia od zginania ogólnego kadłuba przyjmują niewielkie wartości wg [1] można przyjąć  $\sigma=160$  MPa – dla stali normalnej wytrzymałości, tzn. o granicy plastyczności  $Re=235$  MPa. Pamiętając o sposobie wyprowadzenia wzoru (13) możemy wyciągnąć wniosek, że maksymalne naprężenia  $\sigma$  w płycie o grubości wynikającej ze wzoru (14) będą około  $(1/0,72)^2$  razy większe niż 160 MPa, tzn. wyniosą około 320 MPa. Jest to poziom znacznie wyższy od wartości granicy plastyczności  $Re=235$  MPa. Oznacza to, że w skrajnych warstwach płyty, przy jej dłuższych krawędziach wystąpi płynięcie plastyczne materiału. Po zdjęciu z płyty obciążenia w formie ciśnienia  $p$  pozostanie ona w sposób trwały odkształcona, tzn. będzie ona ugięta – wartość tego ugięcia może być nawet rzędu  $s/150$ .

W przypadku płyt w których występują znaczące wartości naprężeń od zginania ogólnego wartości  $\sigma$ , które są stosowane we wzorze (14) są mniejsze – aby nie doprowadzić do przeciążenia materiału. Dla przykładu – do obliczania wg [1] grubości poszycia dna w środkowej części statku należy przyjąć  $\sigma=120$  MPa – dla stali, gdzie  $Re=235$  MPa.

### Wytrzymałość lokalna usztywnień poszycia

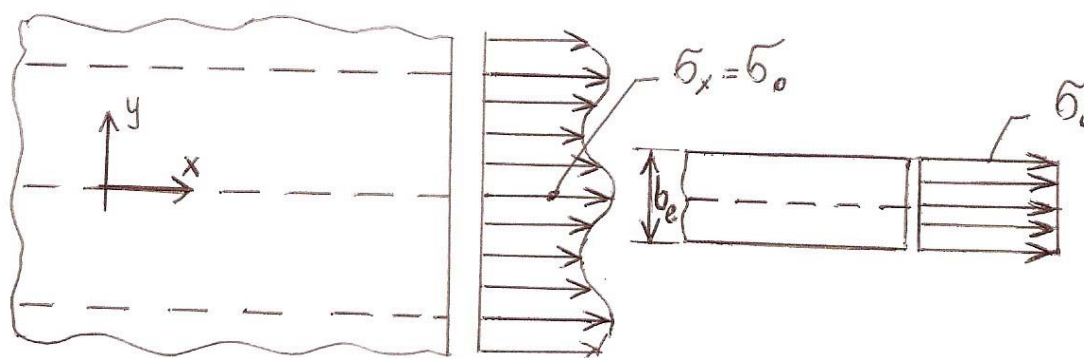
Usztywnienia poszycia podpierają płyty poszycia. Jeżeli płyta jest obciążona na całej powierzchni stałym ciśnieniem  $p$ , to usztywnienia będą obciążone obciążeniem ciągłym, odpowiadającym schematowi „kopertowemu”, który jest pokazany na rys. VI.7. W praktycznych obliczeniach wytrzymałościowych schemat kopertowy jest upraszczany i zakłada się, że obciążenie płyty jest przekazywane tylko na podpory wzdłuż dłuższych krawędzi płyty. Oznacza to, że w przypadku usztywnionego „regularnego” płata poszycia o odstępach usztywnień  $s$  usztywnienia poszycia są obciążone obciążeniem ciągłym  $q=ps$ .

W obliczeniach wytrzymałościowych usztywnienia poszycia są traktowane jako belki. Usztywnienia są połączone z poszyciem spoinami. Poszycie ugina się więc razem z usztywnieniami i przenosi naprężenia związane ze zginaniem usztywnień. Przekrój

poprzeczny belki zginanej stanowi więc przekrój samego usztywnienia i przekrój tzw. współpracującego pasa poszycia.

Naprężenia normalne w poszyciu, w kierunku osi usztywnień, związane ze zginaniem usztywnień, mają rozkład nierównomierny, gdyż w poszyciu panuje płaski stan naprężenia (rys. VI.9). Występują tam naprężenia  $\sigma = \sigma_x$ ,  $\sigma = \sigma_y$  i  $\tau_{xy}$ , które muszą spełniać równania równowagi naprężeń w ośrodku ciągłym.

Koncepcja pasa współpracującego poszycia polega na tym aby w miejsce nierównomiernego rozkładu naprężeń  $\sigma$  na szerokości  $s/2$  z każdej strony usztywnienia przyjąć zastępczy rozkład naprężeń  $\bar{\sigma} = \text{const}$ , na szerokości  $b_e$  zwanej szerokością pasa współpracującego poszycia (rys. VI.9).



Rys. VI.9 Koncepcja pasa współpracującego poszycia

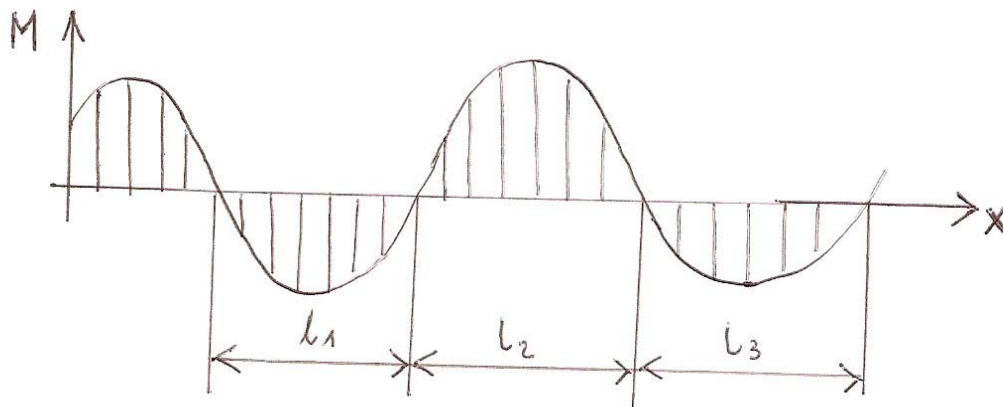
Wartość  $b_e$  zależy od rozkładu momentu zginającego w usztywnieniu. Moment  $M$  w usztywnieniu zmienia swe wartości wzdłuż usztywnienia – wskutek obciążenia  $q = ps$  oraz wskutek sił reakcji przykładanych do usztywnienia przez wiazary lub przegrody w kadłubie statku. Wartość  $b_e$  nie jest na ogół stała wzdłuż osi  $x$  usztywnienia. Przykładowy rozkład  $M(x)$  pokazano na rys. VI.10. W praktycznych obliczeniach przyjmuje się wartości  $b_e$  w poszczególnych odcinkach pomiędzy zerowymi wartościami momentu zginającego o wartościach :

$$b_{ei} = \frac{1}{3} l_i \quad (15)$$

gdzie:

$l_i$  – patrz rys. VI.10.

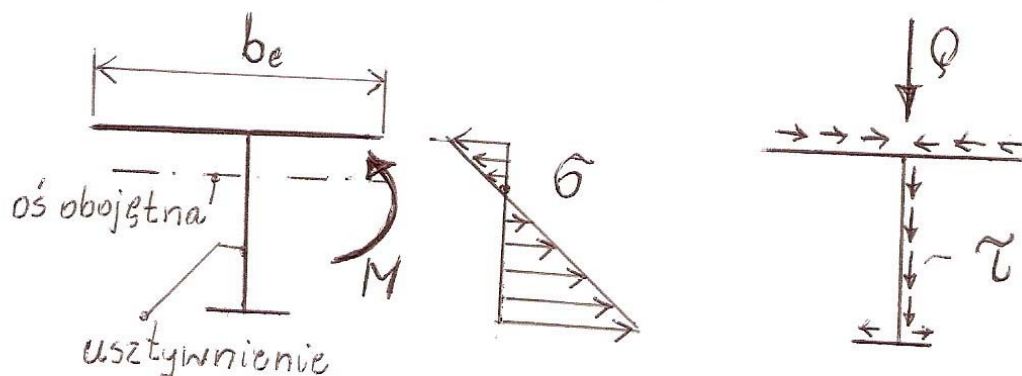
Wzór (15) wynika z rozwiązań teoretycznych przedstawionych w klasycznych podręcznikach teorii sprężystości.



Rys. VI.10 Przykładowy rozkład  $M(x)$  w usztywnieniu

Przyjęte wartości  $b_e$  nie mogą być większe niż odstęp  $s$  usztywnień poszycia.

Naprężenia w przekroju poprzecznym usztywnienia (wraz z pasem współpracującym poszycia) pokazano na rys. VI.11. Moment zginający  $M$  wywołuje naprężenia normalne  $\sigma$  a siły poprzeczne (ścinające)  $Q$  – naprężenia styczne  $\tau$ .



Rys. VI.11 Naprężenia  $\sigma$  i  $\tau$  w przekroju poprzecznym usztywnienia

Naprężenia  $\sigma$  oblicza się metodami znanymi z Wytrzymałości materiałów. Ekstremalne wartości  $\sigma$  (w skrajnych włóknach przekroju belki) obliczymy ze wzoru:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (16)$$

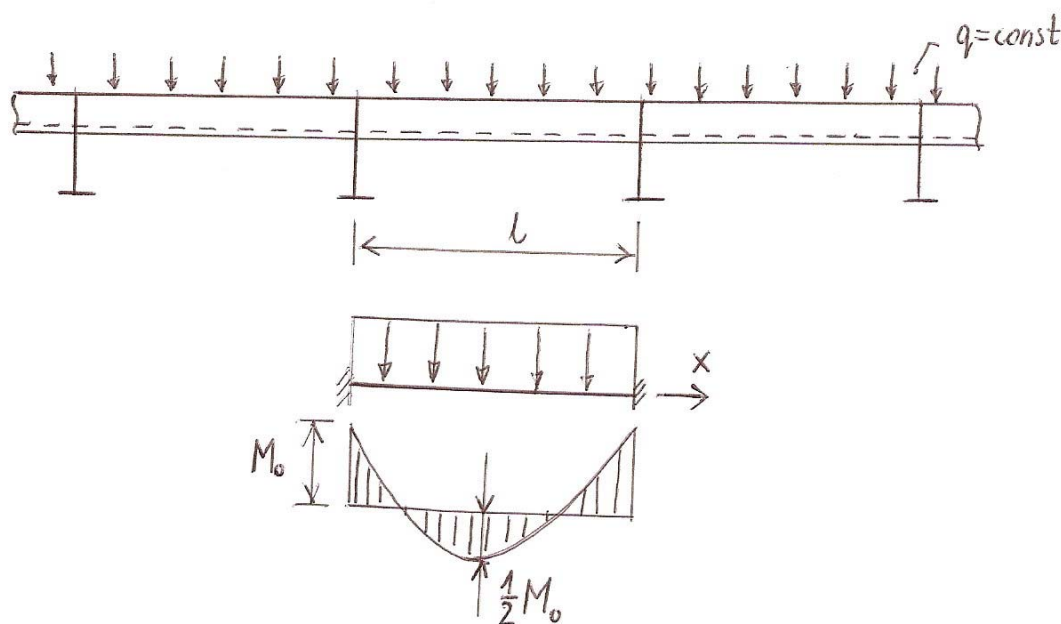
gdzie:

$W$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego.

Wartość wskaźnika przekroju dla mocnika usztywnienia jest zazwyczaj kilka razy mniejsza niż wartość dla pasa współpracującego poszycia. Oś obojętna przekroju leży bowiem zazwyczaj stosunkowo blisko poszycia – ze względu na typowe proporcje elementów konstrukcji kadłuba statku.

Ekstremalne wartości naprężeń  $\tau$  są w przypadku usztywnień poszycia kilka razy mniejsze niż ekstremalne wartości  $\sigma$ . Przy projektowaniu usztywnień poszycia naprężenia  $\tau$  są więc zazwyczaj pomijane. Uwzględnia się tylko naprężenia  $\sigma$ .

Szczególnie prosty jest przypadek usztywnienia ciągłego poddanego stałemu obciążeniu  $q=ps$ , podpartego przez regularnie rozstawione wiazary w odstępach  $l$  (rys. VI.12). Symetria obciążenia i konstrukcji sprawia, że wystarczy rozpatrywać pojedynczą belkę o długości  $l$ , pod obciążeniem ciągłym  $q=ps$ . Końce belki są utwierdzone. Na rys. VI.12 pokazano także rozkład  $M(x)$  w takiej belce.



Rys. VI.12 Model usztywnienia w formie belki jednoprzęsłowej o utwierdzonych końcach

Maksymalna wartość momentu zginającego  $M_0$  w belce:

$$M_0 = \frac{psl^2}{12} \quad (17)$$

Jeżeli podstawimy  $M_0$  wg (17) do (16) i przekształcimy ten wzór aby wyznaczyć wartość wskaźnika  $W$ , to otrzymamy wzór:

$$W = \frac{psl^2}{12\sigma} \quad (18)$$

Wzór (18) można potraktować jako wymaganie określające potrzebną wartość  $W$  aby maksymalne naprężenia osiągnęły poziom dopuszczalny  $\bar{\sigma}$ .

Podobną strukturę mają wymagania Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych dotyczące wymiarowania usztywnień poszycia. Wg [1] wymaganą wartość  $W$  (w  $[\text{cm}^3]$ ) należy wyznaczać wg wzoru:

$$W = \frac{1000psl^2}{m\sigma} \quad (19)$$

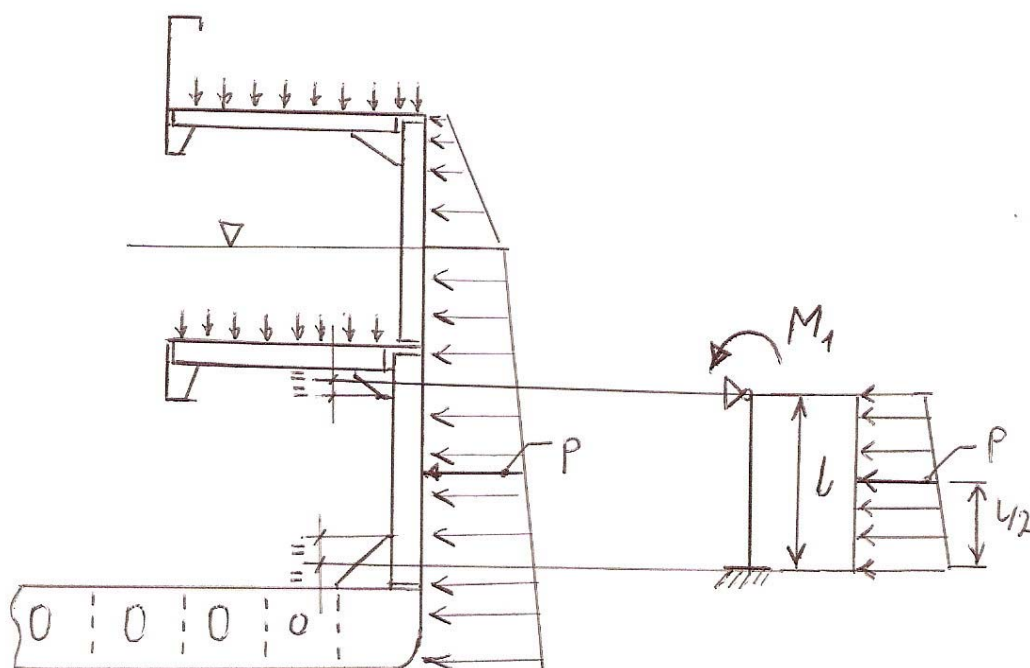
gdzie:

$p$  – ciśnienie obliczeniowe ( w środku rozpiętości  $l$  usztywnienia), w [kPa];  
 $s$  – odstęp usztywnień, w [m];  
 $l$  – rozpiętość usztywnienia, w [m];  
 $\bar{\sigma}$  – naprężenia dopuszczalne, w [MPa];  
 $m$  – bezwymiarowy współczynnik o wartościach zależnych od sposobu zamocowania końców usztywnienia; jego wartości mieszczą się w przedziale od 7,5 do 12.

Dla usztywnień poprzecznych kadłuba i obciążeń obliczeniowych uwzględniające dynamiczne składowe obciążeń przekraczane z prawdopodobieństwem  $10^{-4}$  Przepisy PRS [1] wymagają stosować  $\bar{\sigma} = 160$  MPa – dla stali o wartości  $Re=235$  MPa.

W przypadku wzdłużnych usztywnień poszycia w środkowej części kadłuba wartości  $\bar{\sigma}$  stosowane we wzorze (19) są odpowiednio zmniejszane w stosunku do poziomu podanego wyżej – aby uwzględnić naprężenia normalne we wzdłużnych wiązaniach kadłuba od zginania ogólnego kadłuba.

Wzór (19) stosowany w [1] uwzględnia bardziej złożone przypadki niż prosty przypadek belki pokazany na rys. VI.12. Taki przypadek to np. wręg burtowy ( rys. VI.13). Obciążenie ( ciśnienie obliczeniowe) zmienia się wzdłuż wręgu. Odcinki wręgów są połączone z pokładnikami. Trudne jest więc ustalenie warunków brzegowych dla pojedynczego przęsła wręgu. Na rys. VI.13 współdziałanie dolnego przęsła wręgu z przęsłem górnym i pokładnikiem uwzględniono w formie momentu  $M_1$  na jego górnym końcu. Wartość  $M_1$  zależy jednak od wielu czynników takich jak np. sztywności pokładnika i wręgu, ich rozpiętości, sposobu obciążenia, itp. W [1] dla takiego przypadku przewidziano wartość  $m=10$  ( patrz wzór 19). Jako  $p$  należy przyjąć wartość ciśnienia w środku rozpiętości  $l$ . Wpływ węzłówek zastosowanych na końcach przęsła wręgu uwzględnia się poprzez odpowiednie zmniejszenie wartości  $l$  w stosunku do rzeczywistej rozpiętości odcinka wręgu ( patrz rys. VI.13).



Rys. VI.13 Model belkowy przęsła wręgu

### Wytrzymałość wiązarów ( wytrzymałość strefowa)

Wytrzymałość strefowa dotyczy systemu wiązarów kadłuba. W przypadku wiązarów zastosowanie prostego modelu belki 1- przęsłowej do oceny ich wytrzymałości ( lub do ich wymiarowania ) jest na ogół niemożliwe. W konstrukcji kadłuba statku są zazwyczaj stosowane wiązary wzdłużne i poprzeczne, które są połączone ze sobą. Denniki w dnie podwójnym są połączone z wzdłużnikami dennymi, wręgi ramowe są połączone z wzdłużnikami burtowymi, pokładniki ramowe są połączone z wzdłużnikami pokładowymi, itp. Trudno jest więc wydzielić z takiego systemu pojedyncze przęsło wiązara i na jego końcach zadać odpowiednie warunki brzegowe. Oceniając wytrzymałość systemu wiązarów należy rozpatrywać jednocześnie stosunkowo duży obszar konstrukcji – aby prawidłowo uwzględnić współdziałanie poszczególnych elementów tego systemu. Wymagane jest więc zastosowanie stosunkowo pracochłonnych modeli obliczeniowych i zastosowanie zaawansowanych metod numerycznych ( programów komputerowych).

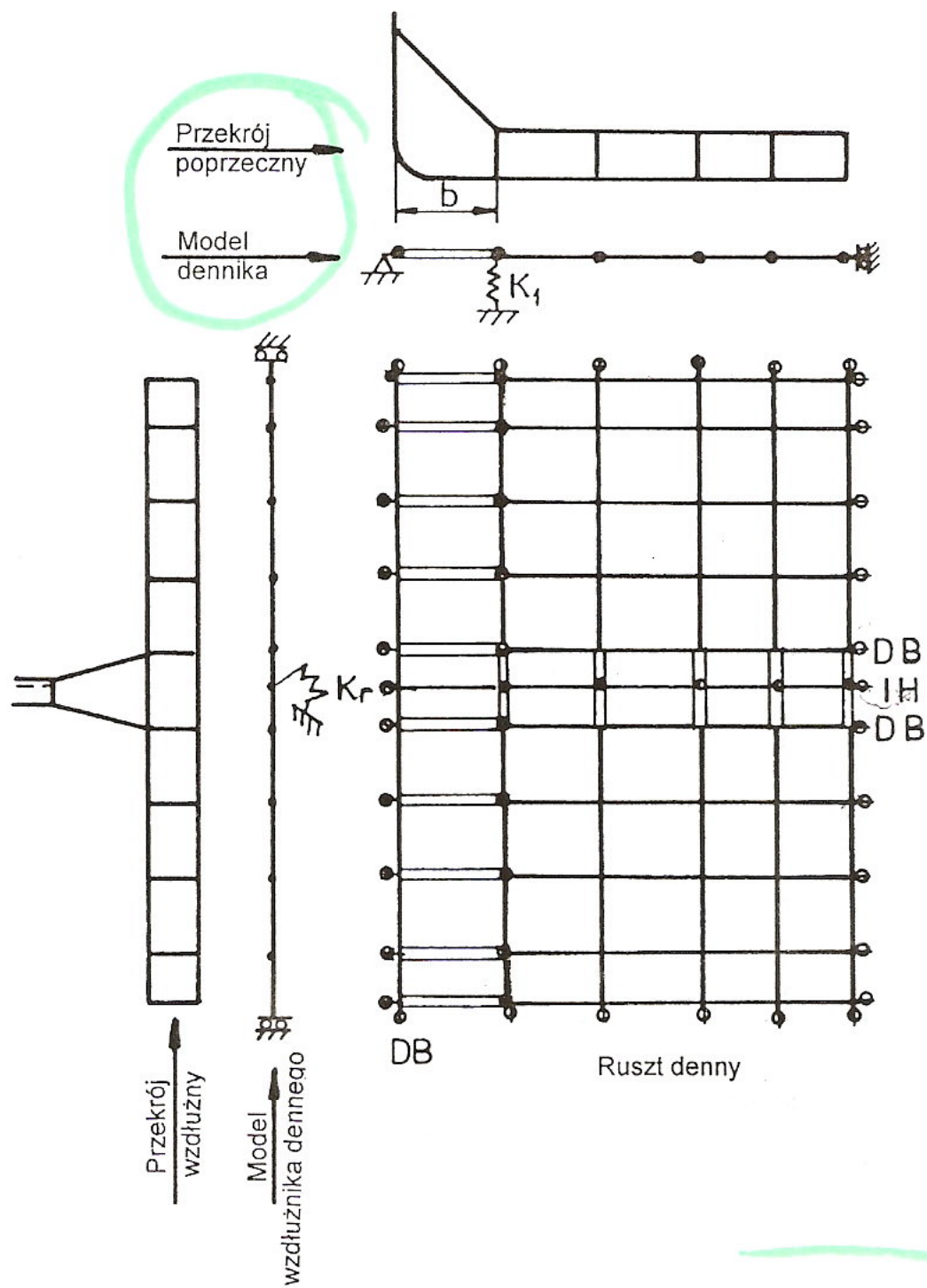
Stosowane są następujące modele obliczeniowe:

- ramy płaskie;
- ramy przestrzenne;
- ruszty;
- przestrzenne modele MES ( MES – metoda elementów skończonych) z zastosowaniem membranowych, powłokowych i prętowych elementów skończonych.

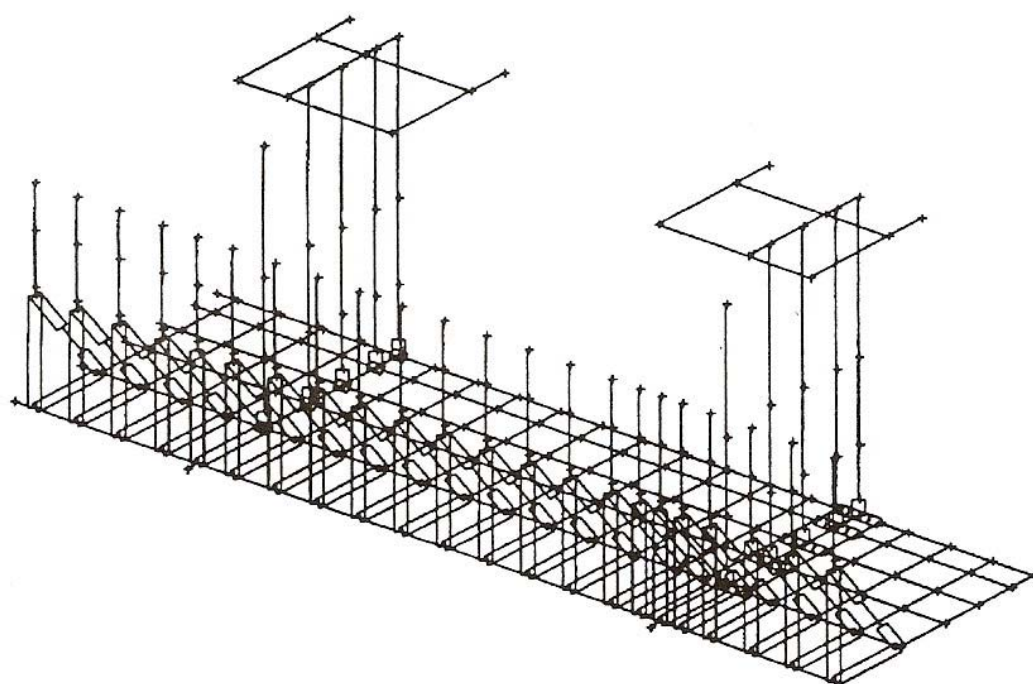
W trzech pierwszych modelach wymienionych wyżej stosowane są belkowe elementy skończone. Pojawia się w związku z tym trudny problem określenia szerokości pasa współpracującego poszycia. Stosowane są podobne zasady jak przy określaniu wartości  $b_e$  usztywnień poszycia. Obliczając charakterystyki wytrzymałościowe przekroju poprzecznego wiązara uwzględnia się usztywnienia poszycia o osiach równoległych do osi wiązara, leżące w pasie poszycia o szerokości  $b_e$ .

Przykłady modeli MES stosowane w praktyce, zaczerpnięte z Przepisów PRS lub DnV pokazano na rys. VI.14 do VI.16.





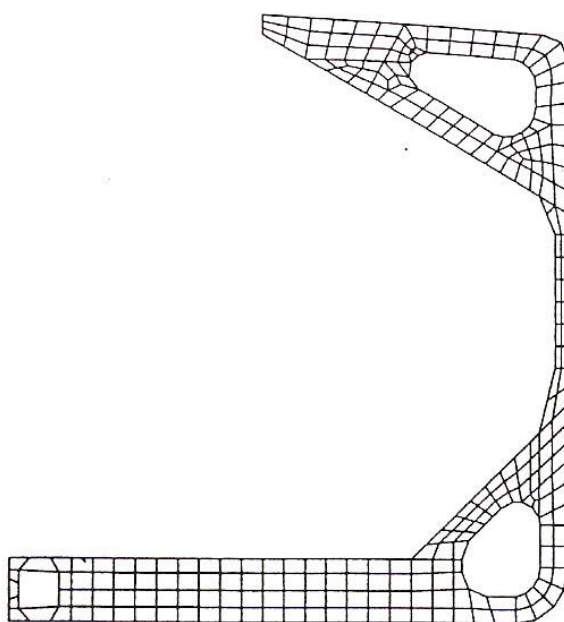
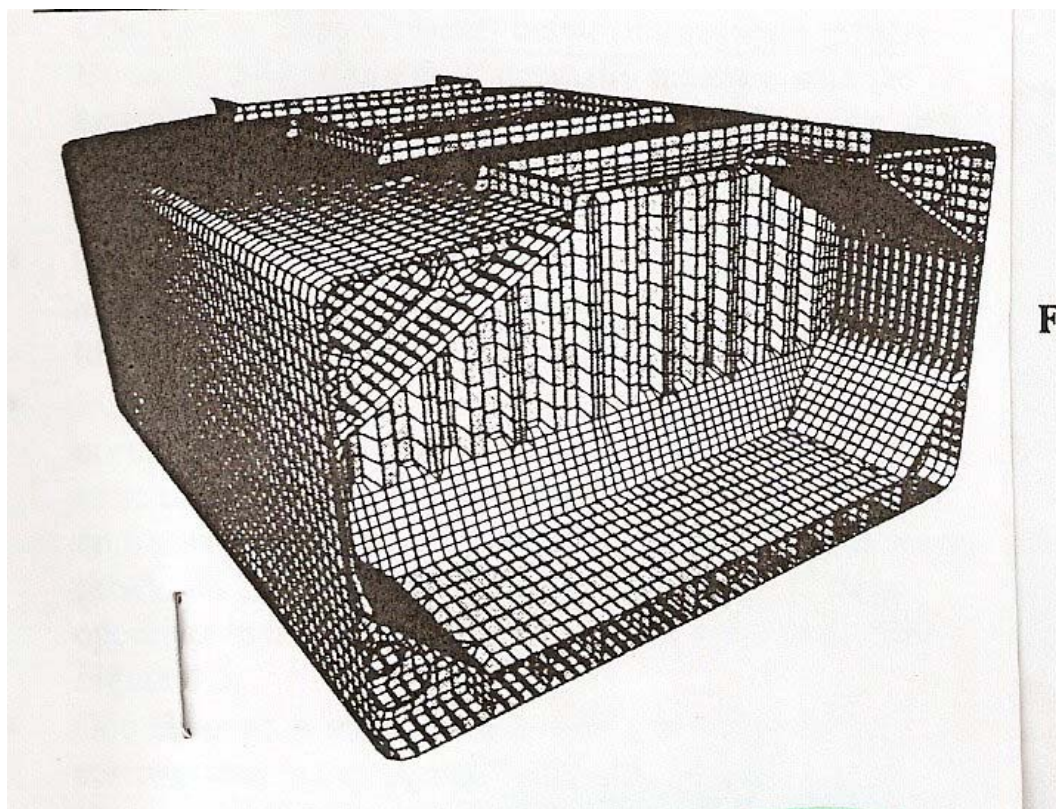
Rys. VI.14 Rusztowy model MES fragmentu dna masowca ( wg PRS – [15])



(b)

**3D beam element model covering double bottom structure, hopper region, bulkhead and deck between holds. Lumped main frames**

Rys. VI.15 Model fragmentu konstrukcji masowca w formie ramy przestrzennej ( wg DnV – [16])



Rys. VI.16 Trójwymiarowy moment MES fragmentu kadłuba masowca z zastosowaniem powłokowych i prętowych elementów skończonych ( wg DnV – [16])

W ramach analizy wytrzymałości strefowej trzeba zazwyczaj uwzględnić **obciążenia obliczeniowe** odpowiadające wielu charakterystycznym stanom załadowania statku. Ekstremalne wartości naprężeń w poszczególnych wiązarach mogą bowiem występować w różnych stanach załadowania. Pewne stany załadowania będą np. wywoływały ekstremalne naprężenia w dennikach a inne stany załadowania będą niekorzystne ze względu na poziom

naprężeń w pokładach. Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych podają charakterystyczne stany załadowania, które należy uwzględnić przy projektowaniu poszczególnych typów statków. Liczba wymaganych wariantów obciążenia konstrukcji przy ocenie wytrzymałości systemu wiązarów kadłuba może dochodzić nawet do kilkudziesięciu- jak np. przy projektowaniu masowców.

W obliczeniach wytrzymałościowych z zastosowaniem modeli MES należy uwzględnić odpowiednie **warunki brzegowe**. Z reguły zakłada się, że wiązary są nieprzesuwnie podparte przez prostopadłe do nich przegrody. Np. wiązary dna są podparte w ten sposób przez burty i grodzie.

Przy symetrycznych obciążeniach modeluje się tylko konstrukcję z jednej strony płaszczyzny symetrii statku i zakłada się warunki brzegowe w formie warunków symetrii. Na końcach modelu MES (wzdłuż kadłuba), które często znajdują się w połowie długości ładowni także zadaje się warunki brzegowe w formie symetrii. Szczegółowe wymagania dotyczące wymaganych modeli MES znajdują się w Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych, np. w [16].

W przypadku wiązarów ocenie podlegają nie tylko naprężenia normalne  $\sigma$  ale także naprężenia styczne  $\tau$  i naprężenia zredukowane  $\sigma_{zr}$ :

$$\sigma_{zr} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (20)$$

Jako  $\tau$  we wzorze (20) należy przyjmować średnie naprężenia w środniku, tzn. obliczane jako iloraz siły ścinającej  $Q$  i efektywnego pola przekroju środnika na ścinanie  $A_s$  – z uwzględnieniem osłabienia przekroju przez otwory i wycięcia.

Proporcje wymiarów wiązarów są takie, że naprężenia styczne  $\tau$  mogą osiągać poziom porównywalny z poziomem  $\sigma$ . W przypadku usztywnień poszycia ekstremalne naprężenia  $\tau$  są natomiast przynajmniej kilka razy mniejsze od ekstremalnych naprężeń  $\sigma$ .

Wartości dopuszczalnych naprężeń dla wiązarów wg Przepisów PRS [1], stosowane do obciążeń obliczeniowych zawierających składowe dynamiczne przekraczane z prawdopodobieństwem  $10^{-4}$ , są następujące (dla stali o granicy plastyczności  $R_e=235$  MPa):

- $\sigma_{dop} = 160$  MPa;
- $\tau_{dop} = 100$  MPa (dla konstrukcji 2 – poszyciowych; 90 MPa – dla wiązarów teowych);
- $\sigma_{zr,dop} = 180$  MPa (uwzględniając tylko  $\sigma$  od zginania strefowego).

Stosowane jest także kryterium dla sumarycznych  $\sigma$  od zginania strefowego i od zginania ogólnego kadłuba – nie mogą one przekraczać poziomu 190 MPa.

## VII. WYBOCZENIE ELEMENTÓW KONSTRUKCJI

Konstrukcja kadłuba statku może ulec uszkodzeniu wskutek wyboczenia ( utraty stateczności ) pewnych elementów konstrukcji. Wyboczenie może powstać w warunkach ściskania lub ścinania poszycia lub ścianek wiązarów lub w warunkach ściskania usztywnień poszycia.

Wyboczenie polega na ugięciu płyty poszycia lub usztywnienia poszycia. Płaski lub prostoliniowy element konstrukcji, który ulega wyboczeniu, traci sztywność w warunkach ściskania lub ścinania. Nie jest on w stanie przenieść większych naprężeń niż tzw. naprężenia krytyczne, zależne od jego wymiarów i parametrów materiału. Oznacza to, że elementy, które uległy wyboczeniu nie są w stanie uczestniczyć w równoważeniu wzrostu obciążeń konstrukcji – w formie przyrostu naprężeń. Wzrost obciążeń musi więc być równoważony przez elementy konstrukcji, które jeszcze nie uległy wyboczeniu. Wzrost naprężeń w takich elementach może wywołać ich wyboczenie. Wynika stąd, że przy odpowiednio dużym poziomie obciążenia wyboczeniu mogą ulec rozległe rejony kadłuba statku a to może poprzedzać poważną awarię lub wręcz katastrofę w formie np. złamania całego kadłuba w warunkach zginania ogólnego.

Konstrukcja kadłuba statku powinna więc być projektowana tak, aby wyboczenie elementów konstrukcji występowało dopiero przy odpowiednio dużych wartościach naprężeń ściskających lub ścinających.

W niniejszym rozdziale przytoczono podstawowe wzory i wnioski dotyczące wyboczenia płyt oraz prętów ściskanych bez przytaczania teorii z której one wynikają. Teoria ta jest wykładana tradycyjnie w ramach takich przedmiotów jak *Wytrzymałość materiałów*, *Teoria sprężystości* i *Mechanika konstrukcji*. Na początku diskutowane są zagadnienia dotyczące wyboczenia płyt a później – wyboczenia prętów ściskanych.

### Wyboczenie płyt

Z kursu *Wytrzymałości Materiałów* znane jest zagadnienie wyboczenia pręta ściskanego ( rys. VII.1). Idealne prosty pręt pryzmatyczny, wykonany z materiału liniowo sprężystego, przegubowo podparty na końcach, ulega wyboczeniu ( przechodzi do stanu równowagi chwiejnej przy teoretycznie dowolnej wartości ugięcia) przy wartości  $P_E$  siły ściskającej zwanej teoretyczną siłą krytyczną lub zamiennie – siłą Eulerowską. Wartość tej siły określa wzór:

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (1)$$

gdzie:

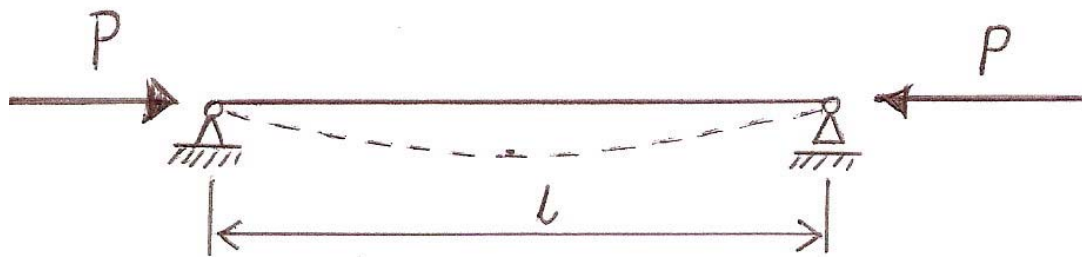
$E$  – moduł Younga;

$I$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego pręta ( mniejsza z wartości głównych centralnych momentów bezwładności );

$l$  - długość pręta.

Przy odpowiednio dużej wartości ugięcia pręta materiał ściskanych włókien pręta w jego części środkowej zacznie płynąć plastycznie i pręt ulegnie uszkodzeniu, tzn pozostanie wygięty w sposób trwały.





Rys. VII.1 Wyboczenie pręta ściskanego

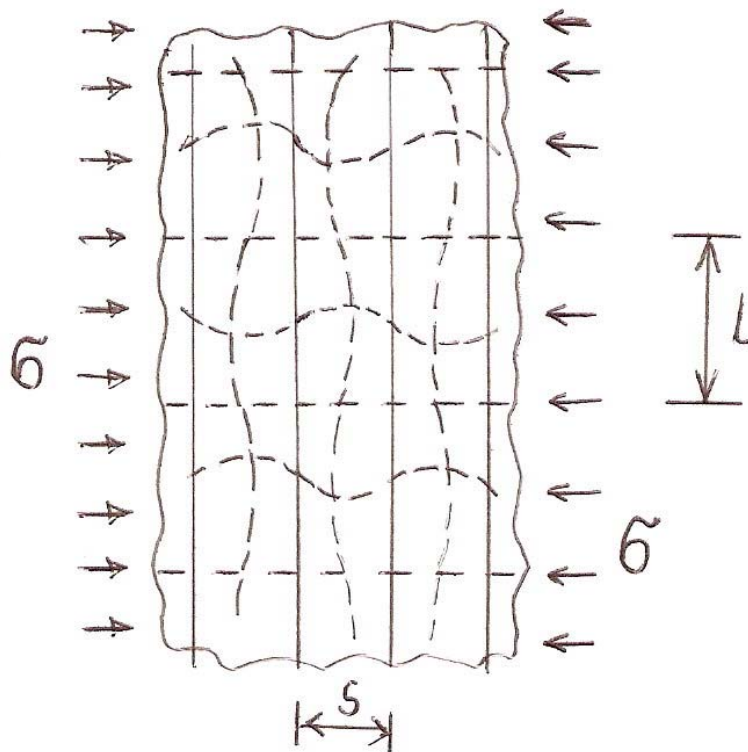
#### Płyty ściskane

Wyboczeniu mogą ulegać także ściskane lub ścinane płyty poszycia statku lub ścianki wiązarów kadłuba.

Naprężenia ściskające w poszyciu pokładów, burt lub dna statku lub w ściankach wiązarów wzdłużnych powstają np. w warunkach zginania ogólnego kadłuba.

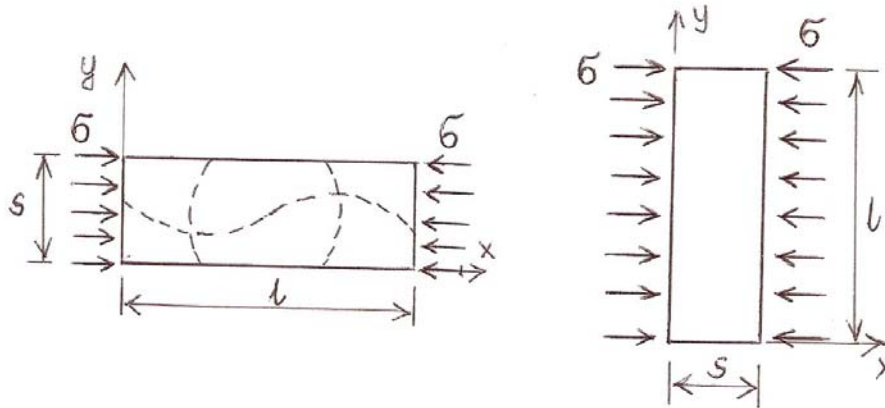
Naprężenia styczne pojawiają się np. w poszyciu burt w warunkach zginania ogólnego kadłuba lub w środnikach wiązarów w warunkach strefowego zginania całych rejonów konstrukcji kadłuba pod obciążeniem poprzecznym.

Poszycie kadłuba składa się z wielu płyt ( od usztywnienia do usztywnienia i od wiązara do wiązara ). Wyboczenie sprężyste ściskanego płata poszycia ma formę pokazaną na rys. VII.2.



Rys. VII.2 Wyboczenie fragmentu poszycia kadłuba

Usztywnienia i wiązary pozostają prostoliniowe ( nie uginają się). Sąsiednie płyty poszycia wyginają się w przeciwnych kierunkach. W związku z powyższym wartość teoretycznych naprężeń krytycznych  $\sigma_E$  ( naprężenia przy których płyta ulega wyboczeniu sprężystemu ) można wyznaczyć rozpatrując pojedynczą płytę ściskaną pokazaną na rys. VII.3, o wymiarach  $s \times l$  ( patrz rys. VII.2 i rys. VII.3 ). Płyta jest przegubowo podparta na obwodzie. Interesują nas dwa przypadki ściskania pokazane na rys. VII.3 – ściskanie wzdłuż dłuższego boku płyty i ściskanie wzdłuż krótszego boku płyty.



Rys. VII.3 Wyboczenie ściskanej płyty podpartej przegubowo na obwodzie

Wzory do obliczania  $\sigma_E$  wyprowadzono w ramach teorii sprężystości ( dział : teoria płyt ). Przybliżona wartość  $\sigma_E$  dla płyty ściskanej wzdłuż dłuższego boku wynosi ( lewa strona rys. VII.3):

$$\sigma_E \approx 4 \frac{\pi^2 D}{s^2 t} \quad (2)$$

Gdzie:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \text{ - sztywność płytowa;}$$

$E$ - moduł Younga;

$\nu$ - współczynnik Poissona;

$t$  – grubość płyty;

$s$ - długość krótszego boku płyty.

W przypadku płyty ściskanej wzdłuż krótszego boku ( prawa strona rys. VII.3):

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 D}{s^2 t} \left( 1 + \left( \frac{s}{l} \right)^2 \right)^2 \quad (3)$$

gdzie:

$D, s, t$  – jak we wzorze (2);

$l$  – długość dłuższego boku płyty.



Założmy, że płyta o ustalonych wymiarach  $l$ ,  $s$  i  $t$  jest raz ściskana wzdłuż dłuższego boku a następnie wzdłuż krótszego boku ( dwa przypadki na rys. VII.3). Założmy dodatkowo, że  $s$  jest wielokrotnie mniejsze niż  $l$ , tzn. we wzorze (3) można przyjąć  $s/l=0$ .

Wówczas z wzorów (2) i (3) wynika, że **naprężenia  $\sigma_E$  dla płyty ściskanej wzdłuż dłuższego boku są 4 razy większe niż dla płyty ściskanej wzdłuż krótszego boku.**

Wynika stąd praktyczny wniosek, że poszycie, które może podlegać istotnym wartościom naprężeń ściskających należy usztywniać w kierunku naprężeń ściskających. Taki przypadek to pokład wytrzymałościowy względnie dużych statków, gdzie naprężenia ściskające pochodzą od zginania ogólnego kadłuba. **Pokład wytrzymałościowy większych statków powinien więc być budowany we wzdłużnym układzie wiązań.**

Powyższy wniosek uzasadniają wartości  $\sigma_E$  podane w tabeli 1, obliczone dla płyt stalowych (  $E=206000$  MPa,  $\nu = 0,3$  ) o kilku wartościach grubości  $t$ , o wartości  $s=0,8$  m odstepu usztywnień typowej dla większych statków.  $\sigma_E$  obliczono wg wzoru (2) i wg wzoru (3) dla  $s/l=0$ .

Tabela 1. Przykładowe wartości  $\sigma_E$

$t$ [mm]	$\sigma_E$ – płyta ściskana wzdłuż dłuższego boku; [MPa]	$\sigma_E$ – płyta ściskana wzdłuż krótszego boku; [MPa]
5	38,0	9,5
8	97,2	24,3
10	152,0	38,0
12	218,8	54,7
15	342,0	85,5
20	608,0	152,0
25	950,0	237,5

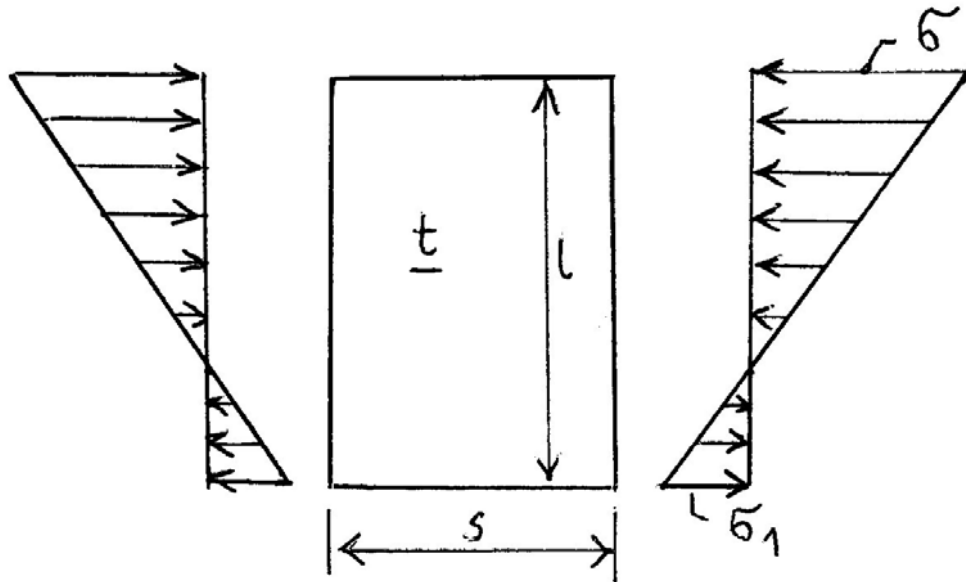
Pamiętajmy, że w przypadku zginania ogólnego kadłuba ze stali o  $Re=235$  MPa dopuszczalny poziom naprężeń ściskających wynosi 175 MPa ( patrz rozdział VI). Oznacza to, że w przypadku pokładu wytrzymałościowego usztywnionego wzdłużnie bezpieczne ze względu na wyboczenie będą płyty o grubości  $t = 12$  mm ( patrz tabela 1). W przypadku pokładu usztywnionego poprzecznie wystarczającą odporność na wyboczenie miałyby płyty o grubości powyżej 20 mm.

Na podstawie powyższych rozważań wynikają podane niżej wnioski praktyczne.

- A. Wartości  $\sigma_E$  są proporcjonalne do  $(t/s)^2$ .
- B. Wartości  $\sigma_E$  są proporcjonalne do  $E$ . Wynikają stąd problemy z zapewnieniem odporności na wyboczenie konstrukcji ze stopów aluminium, których wytrzymałość może być zbliżona do wytrzymałości stali a moduł Younga jest około 3 razy mniejszy niż w przypadku stali. Podobnie jest z konstrukcjami z laminatów poliestrowo-szkłanych, których moduł Younga jest rzędu 10 do 20 razy mniejszy niż w przypadku stali.
- C. Zastosowanie stali o podwyższonych wytrzymałościach (  $Re>235$  MPa) skutkuje mniejszą grubością  $t$  poszycia niż w przypadku równoważnej konstrukcji ze stali zwykłej (  $Re= 235$  MPa) – wg kryterium naprężeń dopuszczalnych. Oznacza to jednak większą skłonność takiej konstrukcji do wyboczenia. Wymagane może być zmniejszenie odstepu usztywnień poszycia w stosunku do równoważnej konstrukcji ze stali zwykłej.

### Stateczność płyt ściskanych – naprężenia liniowo zmienne

Liniowo zmienne wzdłuż krawędzi płyty naprężenia  $\sigma$  (rys. VII.4) występują przy zginaniu ogólnym kadłuba statku ( w poszyciu burt ) lub przy zginaniu wiązarów ( w ich środkach ). Takie obciążenie płyty, gdzie w całym obszarze płyty lub w jej części występuje ściskanie, może spowodować jej wyboczenie.



Rys. VII.4 Liniowo zmienne naprężenia normalne w płycie

Wartości naprężeń eulerowskich dla płyty przegubowo podpartej na obwodzie wyznacza się na podstawie wzoru:

$$\sigma_E = k \frac{\pi^2 D}{s^2 t} \quad (4)$$

Znaczenie symboli  $D$ ,  $s$  i  $t$  w tym wzorze jest takie jak we wzorze (2).

$k$  jest współczynnikiem zależnym od parametrów  $s/l$  i  $\beta = 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma}$ ;  $\sigma_1$  i  $\sigma$  pokazano na

rys. VII.4. Wartości  $k$  można znaleźć w poradnikach z zakresu mechaniki technicznej. Ich przykładowe wartości dla  $s/l=0,4$  są następujące:

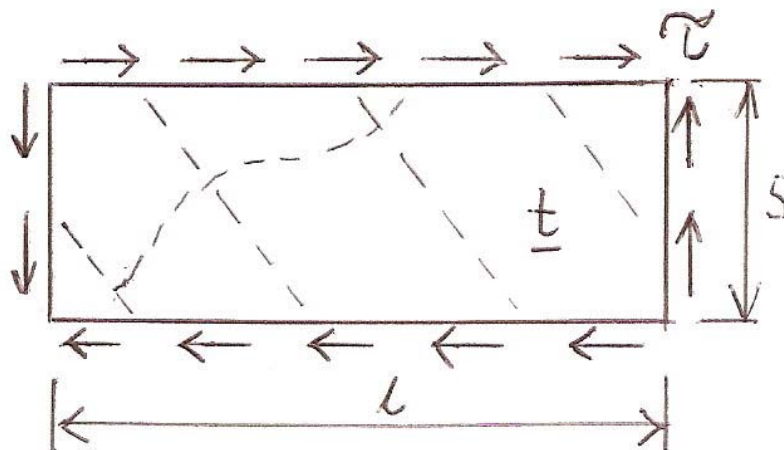
-  $k = 29,1$  dla  $\beta = 2$  (na połowie wysokości płyty ściskanie a na drugiej połowie rozciąganie);

-  $k = 15,1$  dla  $\beta = 1$  ( ściskanie na całej wysokości płyty, od wartości zerowej do maksymalnej.

Warto porównać powyższe wartości z wartością  $k = 4$  we wzorze (2).

### Stateczność płyt ścinanych

Istotne wartości naprężeń stycznych w płytach kadłuba statku powstają np. w poszyciu burt od ścinania w warunkach zginania ogólnego lub w środkach wiązarów przy ich zginaniu. Płyta w warunkach ścinania ( rys. VII.5) może ulec wyboczeniu sprężystemu.



Rys. VII.5 Wyboczenie płyty ścinanej

Wartość teoretycznych naprężeń krytycznych  $\tau_E$  ( ścinających ) dla płyty podpartej przegubowo na obwodzie wyznacza się wg wzoru:

$$\tau_E = k \frac{\pi^2 D}{s^2 t} \quad (5)$$

Znaczenie symboli  $D$ ,  $s$  i  $t$  w tym wzorze jest takie jak we wzorze (2).

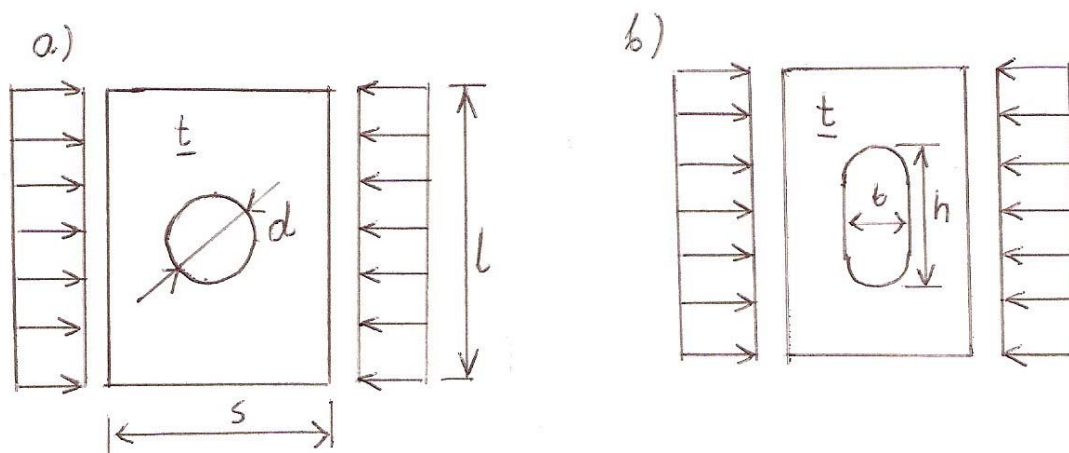
$k$  jest współczynnikiem zależnym od parametrów  $s/l$ . Wartości  $k$  można znaleźć w poradnikach z zakresu mechaniki technicznej. Ich przykładowe wartości są następujące:

- $k = 5,35$  dla  $s/l \rightarrow 0$  ;
- $k = 9,34$  dla  $s/l = 1$ .

Warto porównać powyższe wartości z wartością  $k = 4$  we wzorze (2) i spojrzeć na wartości  $\sigma_E$  w tabeli 1. Dojdziemy do wniosku, że zagrożenie płyt ścinanych wyboczeniem jest realne.

#### Wpływ otworów w płytach na ich stateczność

W środnikach wiązarów, w platformach, w pokładach, przegrodach, itp., powszechnie występują otwory. Są one niezbędne do komunikacji na statku, umożliwiają prowadzenie rurociągów, itp. Zastosowanie otworów w płytach skutkuje zmniejszeniem wartości  $\sigma_E$  lub  $\tau_E$ . Przykłady ściskanych płyt z otworami pokazano na rys. VII.6. Pokazano zastosowanie otworu okrągłego i otworu owalnego.



Rys. VII. 6 Ściskanie płyt z otworami

Do wyznaczania  $\sigma_E$  lub  $\tau_E$  dla płyt z otworami wg Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych stosuje się współczynniki korygujące wartości teoretycznych naprężeń krytycznych płyt bez otworów. Dla przykładu, wartość  $\sigma_E$  dla płyty z otworem okrągłym (jak z lewej strony rys. VII.6) wg [1] wyznacza się ze wzoru:

$$\sigma_E = \sigma_E^* \cdot k \quad (6)$$

Gdzie:

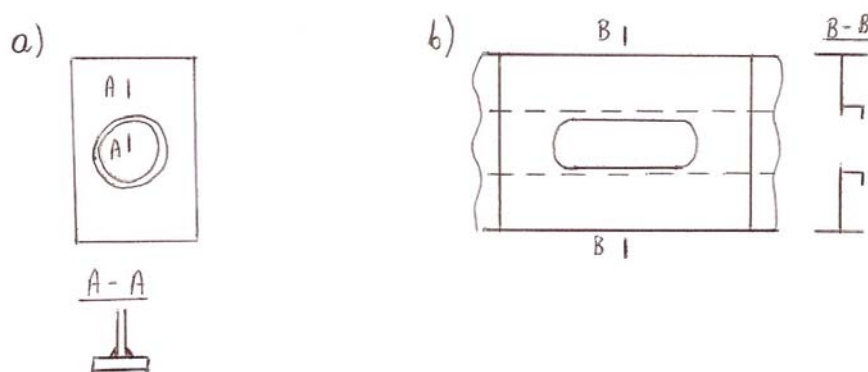
$\sigma_E^*$  - teoretyczne naprężenia krytyczne płyty bez otworu;

$k = 1 - 0,25 \frac{d}{l}$  - współczynnik uwzględniający wpływ otworu okrągłego.

Otwory powodują zmniejszenie wartości teoretycznych naprężeń krytycznych w stosunku do płyt bez otworów.

Podobnie uwzględnia się wpływ otworów owalnych. Wartości współczynnika korygującego  $k$  zależą także od sposobu obciążenia płyty. Szczegółowe wzory nie będą tutaj przytaczane.

Zwiększenie wartości  $\sigma_E$  lub  $\tau_E$  płyt z otworami można uzyskać poprzez obramowanie otworów. Przykłady takich obramowań pokazano na rys. VII.7.



Rys. VII.7 Obramowanie otworów

#### Wpływ usztywnień na wartości teoretycznych naprężeń krytycznych poszycia

W przypadku ściskania poszycia w kierunku prostopadłym do osi usztywnień przy wyboczeniu płyt poszycia następuje skręcanie jego usztywnień (rys. VII.8).

Zdeformowane usztywnienia gromadzą energię sprężystą. Efektem takiego zjawiska jest wzrost teoretycznych naprężeń krytycznych w stosunku do sytuacji, gdy krawędzie płyt poszycia są podparte w sposób „klasyczny” w kierunku poprzecznym, wzdłuż osi usztywnień.



Rys. VII.8 Wyboczenie ściskanego poszycia podpartego przez usztywnienia

Wg Przepisów PRS [1] wartości  $\sigma_E$  w sytuacji jak wyżej oblicza się ze wzoru:

$$\sigma_E = C \cdot \sigma_E^* \quad (7)$$

Gdzie :

$\sigma_E^*$  - teoretyczne naprężenia krytyczne dla poszycia bez usztywnień ale podpartego w pionie wzdłuż osi usztywnień;

$C$  – współczynnik uwzględniający wpływ usztywnień:

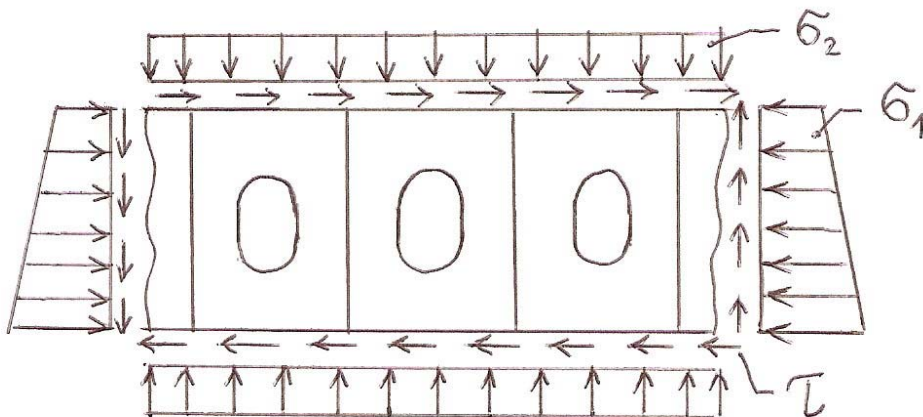
$C = 1,05$  – gdy usztywnienia to płaskowniki;

$C = 1,10$  – gdy usztywnienia to płaskowniki łebkowe;

$C = 1,21$  – gdy usztywnienia to kątowniki.

#### Wyboczenie płyt w złożonych stanach naprężeń

Fragmenty poszycia konstrukcji kadłuba statku bywają jednocześnie ściskane w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach i ścinane. Taki przypadek to np. wzdłużnik dna podwójnego statku ściskany naprężeniami od zginania ogólnego kadłuba, naprężeniami od obciążenia dna wewnętrznym ciśnieniem ładunku i obciążenia dna ciśnieniem wody oraz ścinanego naprężeniami od zginania wzdłużnika pomiędzy grodziami poprzecznymi ( rys. VII.9).



Rys. VII.9 Złożony stan naprężeń we wzdłużniku dna podwójnego

Jednoczesne działanie  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\tau$  może spowodować wyboczenie płyty przy mniejszych wartościach tych naprężeń niż odpowiednie wartości poszczególnych naprężeń działających samodzielnie.

Do oceny stateczności poszycia w sytuacji jak na rys. VII.9 stosowane są formuły przybliżone. Wg Przepisów [1] płyta ulega wyboczeniu sprężystemu, gdy wartości naprężeń  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\tau$  spełniają równanie:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{1E}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{2E}} + \left( \frac{\tau}{\tau_E} \right)^2 = 1 \quad (8)$$

gdzie:  $\sigma_{1E}$ ,  $\sigma_{2E}$ ,  $\tau_E$  – teoretyczne naprężenia krytyczne poszczególnych naprężeń  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\tau$  działających samodzielnie.

#### Naprężenia krytyczne. Formuła Johnsona

Wartości teoretycznych naprężeń krytycznych wyznaczane wg wzorów podanych dotychczas dotyczą warunków idealnych takich jak:

- a) zależność między naprężeniami  $\sigma$  i odkształceniami  $\varepsilon$  w próbie jednoosiowego rozciągania ma postać:  $\sigma = E \varepsilon$  (E – moduł Younga); nie występuje przy tym uplastycznienie materiału, tzn. materiał odkształca się liniowo- sprężysto przy dowolnym poziomie  $\sigma$  ;
- b) płyty są idealnie płaskie;
- c) w płytach nie występują tzw. naprężenia reszkowe ( samoprównoważone pola naprężeń będące wynikiem np. spawania elementów konstrukcji).

Żadne z powyższych założeń nie jest spełnione w praktyce i teoretyczne naprężenia krytyczne nie mogą bezpośrednio być stosowane do oceny bezpieczeństwa konstrukcji ze względu na możliwość wyboczenia.

Przy ściskaniu lub ścinaniu płyt ich ugięcia początkowe powiększają się i wpływają one na poziom naprężeń w poszczególnych punktach płyty. Naprężenia związane z obciążeniem płyty na brzegu i z jej ugięciem sumują się z naprężeniami reszkowymi i, przy odpowiednio wysokim poziomie obciążenia, wystąpi płynięcie plastyczne materiału w pewnych obszarach płyty. Powiększanie obciążenia będzie powodowało systematyczny wzrost ugięć i lokalnych naprężeń i odkształceń plastycznych w płycie. Przy odpowiednio wysokim poziomie naprężeń przyłożonych do płyty, zwanych **naprężeniami krytycznymi**, nastąpi utrata sztywności płyty utożsamiana z tzw. wyboczeniem sprężysto – plastycznym. Poziom tych naprężeń krytycznych ( $\sigma_c$  lub  $\tau_c$ ) jest zawsze nie większy niż poziom teoretycznych naprężeń krytycznych ( $\sigma_E$  lub  $\tau_E$ ).

Poziom naprężeń krytycznych  $\sigma_c$  lub  $\tau_c$  jest miarą odporności konstrukcji na wyboczenia. W praktyce  $\sigma_c$  i  $\tau_c$  wyznacza się w przybliżeniu na podstawie wartości  $\sigma_E$  i  $\tau_E$  stosując tzw. formułę Johnsona. W przypadku wyznaczania  $\sigma_c$  obowiązują wzory:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_E \quad \text{gdy} \quad \sigma_E < \frac{1}{2} R_e \\ \sigma_c &= R_e \left( 1 - \frac{R_e}{4\sigma_E} \right) \quad \text{gdy} \quad \sigma_E \geq \frac{1}{2} R_e \end{aligned} \quad (9)$$

$R_e$  oznacza granicę plastyczności materiału.

Z wzorów (9) wynika, że  $\sigma_c$  nigdy nie przekroczy poziomu  $R_e$ .

Podobnie wyznacza się  $\tau_c$  w funkcji  $\tau_E$ . We wzorze (9) należy podstawić tylko  $\tau_c$  zamiast  $\sigma_c$ ,  $\tau_E$  zamiast  $\sigma_E$  oraz  $R_e/\sqrt{3}$  zamiast  $R_e$ .

Projektowanie konstrukcji kadłuba statku wystarczająco odpornej na wyboczenie wg wymagań Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych przebiega więc zgodnie ze schematem:

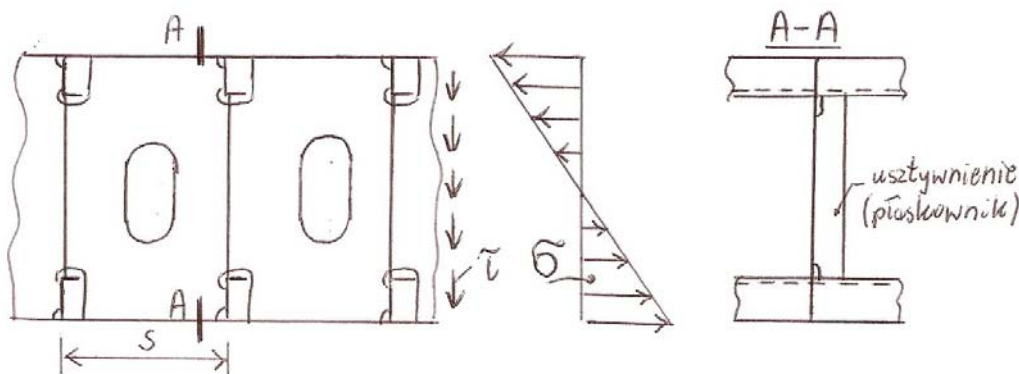
- oblicz  $\sigma_E$  ( lub  $\tau_E$  ) dla założonych wymiarów i materiału elementów konstrukcyjnych;
- oblicz  $\sigma_c$  wg wzorów (9);
- sprawdź, czy spełniony jest warunek :  $\sigma_c \geq C \cdot \sigma$  , gdzie  $C > 1$  jest współczynnikiem bezpieczeństwa a  $\sigma$  oznacza poziom naprężeń odpowiadających tzw. obciążeniom obliczeniowym; jeżeli powyższy warunek nie jest spełniony, to należy odpowiednio zmodyfikować wymiary elementu konstrukcyjnego.

#### Wpływ kryterium odporności płyt na wyboczenie na konstrukcję elementów konstrukcji kadłuba statku

Grubość blach z których budowane są różne elementy konstrukcji kadłuba statku rzadko przekracza 20 mm. Aby zapobiec wyboczeniu różnych płytowych elementów konstrukcji w warunkach ściskania lub ścinania należy takie płyty usztywniać w odstępach rzędu 500 mm do 900 mm. Zagadnienie ilustrują dwa przykłady podane niżej.

##### *Przykład 1*

Na rys. VII.10 pokazano fragment typowego dennika dna podwójnego statku we wzdluznym systemie usztywnień. Usztywnienia pokazane w przekroju A-A, w formie płaskownika, muszą być zastosowane tylko po to aby podzielić płytę dennika na pola płytowe o sztywnym brzegu, o długości krawędzi  $s$  rzędu 500mm do 900mm. Gdyby tych usztywnień nie było, to naprężenia  $\sigma$  i  $\tau$  związane ze zginaniem denników spowodowałyby wyboczenie płyty dennika.

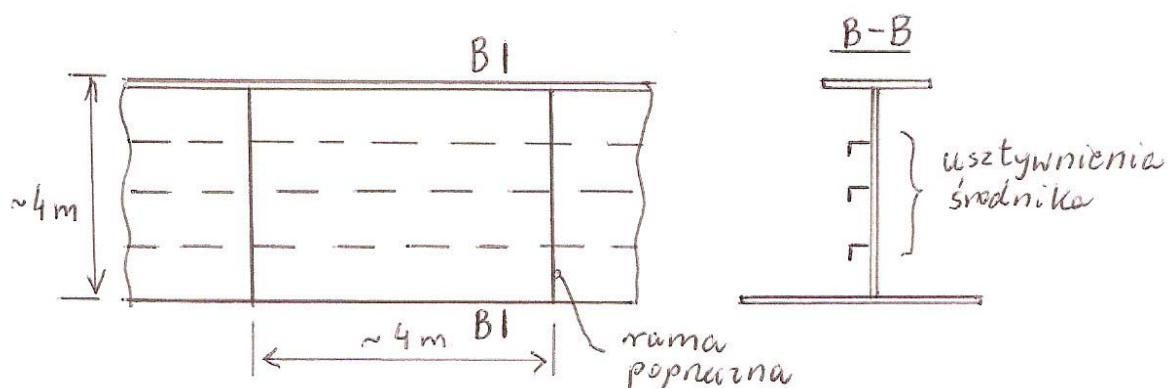


Rys. VII.10 Usztywnienie płyty dennika

##### *Przykład 2*

Na rys. VII.11 pokazano usztywnienia środnika wzdluznika dennego dużego zbiornikowca o pojedynczym kadłubie. Środnik takiego wiazara o wysokości nawet do 4m musi być usztywniony aby nie uległ wyboczeniu wskutek ściskania przy zginaniu ogólnym kadłuba. Konieczne jest więc zastosowanie wzdluznych usztywnień pokazanych na rys. VII.11.

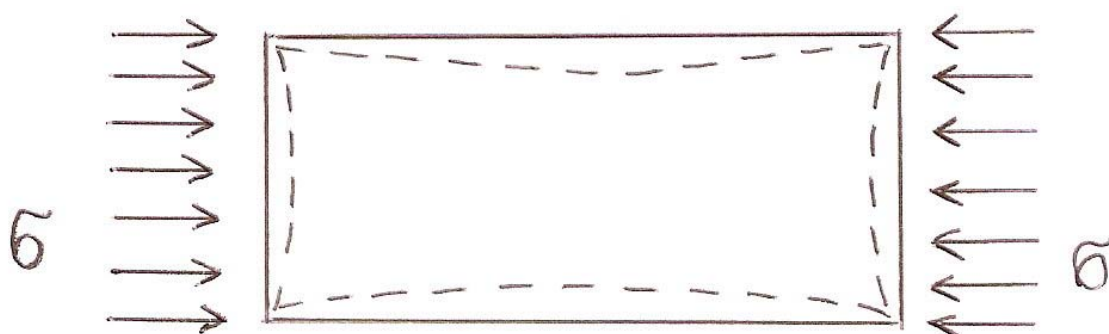




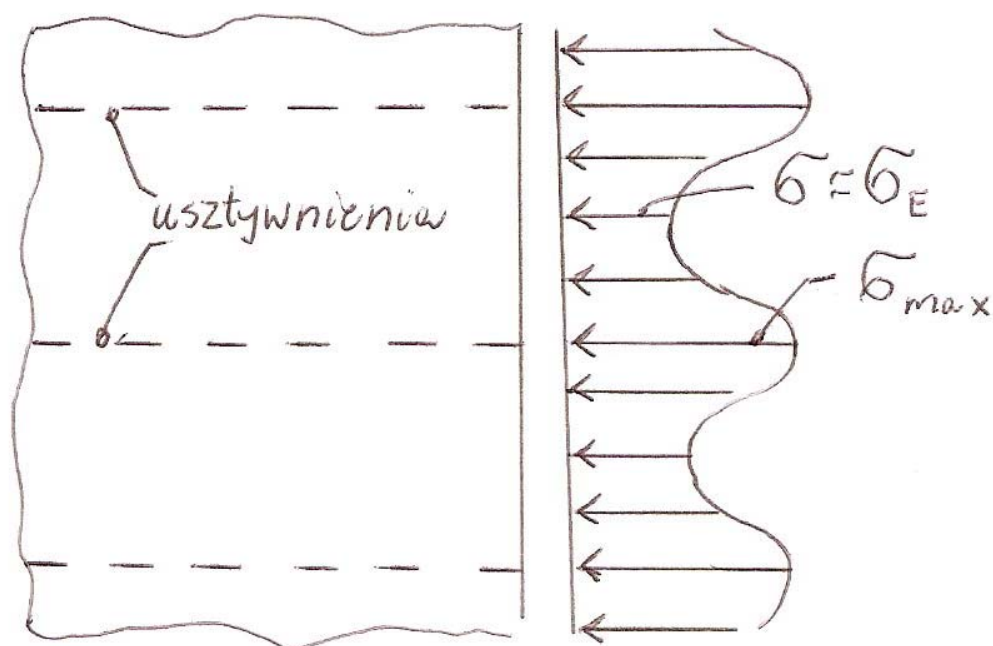
Rys. VII.11 Usztywnienie środka wzdłużnika dennego zbiornikowca

Naprężenia normalne w ściskanych płytach poszycia w warunkach ich wyboczenia sprężystego

W przypadku stosunkowo cienkich płyt poszycia poziom naprężeń  $\sigma_E$  może być kilkakrotnie mniejszy od naprężeń dopuszczalnych ze względu na uplastycznienie. Ściskanie takich płyt spowoduje ich wyboczenie sprężyste ale ugięcia takich płyt będą stosunkowo małe, gdyż krawędzie pojedynczych płyt muszą pozostać prostoliniowe z powodu połączenia z sąsiednimi, podobnymi płytami usztywnionego płata konstrukcji. Problem wyjaśnia rys. VII.12. Linia przerywaną pokazano tam położenie krawędzi, które wystąpiłoby gdyby mogły one swobodnie odkształcać się w płaszczyźnie płyty. Wymuszenie prostoliniowości krawędzi płyty przez płyty sąsiednie usztywnia płytę w sąsiedztwie krawędzi i nie pozwala na znaczne wartości ugięć. Dzięki temu w sąsiedztwie krawędzi płyty naprężenia ściskające  $\sigma$  mogą osiągać poziom znacznie większy niż  $\sigma_E$ . Część środkowa płyty jest znacznie mniej sztywna w swej płaszczyźnie i naprężenia nie mogą tam przekroczyć znacząco poziomu  $\sigma_E$ . Pojawia się nierównomierny rozkład naprężeń  $\sigma$  w płycie pokazany na rys. VII.13. Płyta jako całość nie jest zagrożona wyboczeniem i taki stan „pracy” płata poszycia dopuszcza się np. w przypadku pokładów barek śródlądowych.



Rys. VII.12 Deformacja nieskrępowanych krawędzi płyty przy wyboczeniu sprężystym



Rys. VII.13 Rozkład naprężeń w ściskanym płacie poszycia

Przy obliczaniu poziomu naprężeń  $\sigma_{max}$  w płacie poszycia ( rys. VII.13 ) stosowane są specjalne metody obliczeniowe, przedstawione np. w [9]. Uwzględnia się przy tym wpływ na rozkład  $\sigma$  początkowych ( trwałych ) ugięć płyt i ciśnienia działającego na płytę.

### **Wyboczenie usztynnień poszycia, wiązarów i podpór**

Wyboczenie usztynnień poszycia, wiązarów lub podpór może wystąpić przy ściskaniu tych elementów konstrukcji kadłuba statku.

Ściskanie powyższych elementów może wystąpić w następujących przykładowych sytuacjach:

- zginanie ogólne kadłuba;
- obciążenie pokładów ciężarem ładunku ( wywołuje np. ściskanie pionowych usztynnień grodzi poprzecznych, podpór pokładowych, itp.);
- obciążenie burt ciśnieniem wody ( wywołuje ściskanie poprzecznych usztynnień przewiązek międzylukowych).

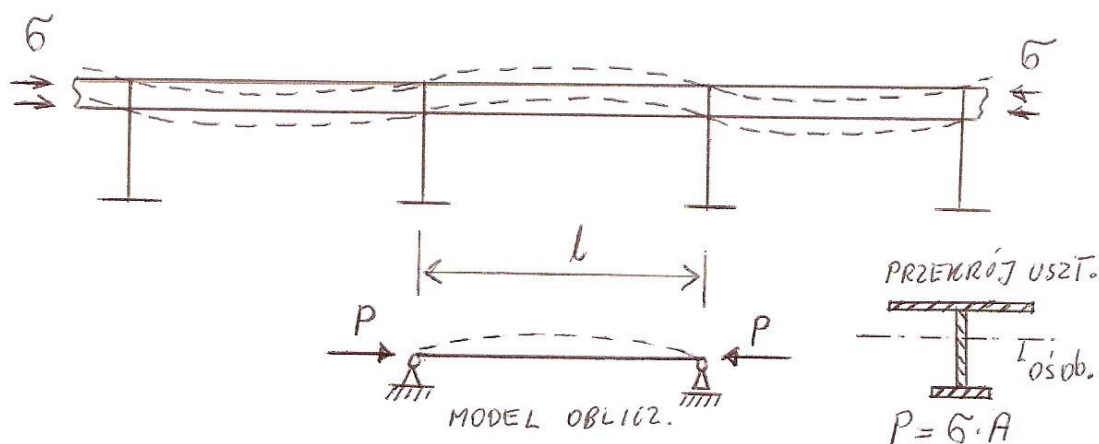
Wyboczenie ww. elementów konstrukcji w warunkach ściskania może wystąpić w następujących formach:

- wyboczenie gięte,
- wyboczenie skrętne,
- wyboczenie środnika,
- zwichrzenie mocnika.

### **Wyboczenie giętne**

Wyboczenie gięte ściskanego usztynnienia poszycia pokazano na rys. VII.14. Usztynwienie wygina się naprzemianlegle pomiędzy wiązarami. Wystarczy więc

rozpatrywać pojedyncze przęsło usztywnienia podparte przegubowo na końcach, pokazane w dolnej części rysunku.



Rys. VII.14. Wyboczenie gięte ściskanego usztywnienia

Wartość teoretycznych naprężeń krytycznych  $\sigma_E$  wyznacza się wg wzoru znanego z kursu *Wytrzymałości Materiałów*:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 EI}{Al^2} \quad (10)$$

gdzie:

- $E$  – moduł Younga materiału ( w przypadku stali  $E = 206000$  MPa);
- $I$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego usztywnienia ( wraz z pasem współpracującym poszycia – patrz prawy dolny róg rys. VII.14);
- $A$  – pole przekroju poprzecznego usztywnienia;
- $l$  - długość przęsła usztywnienia.

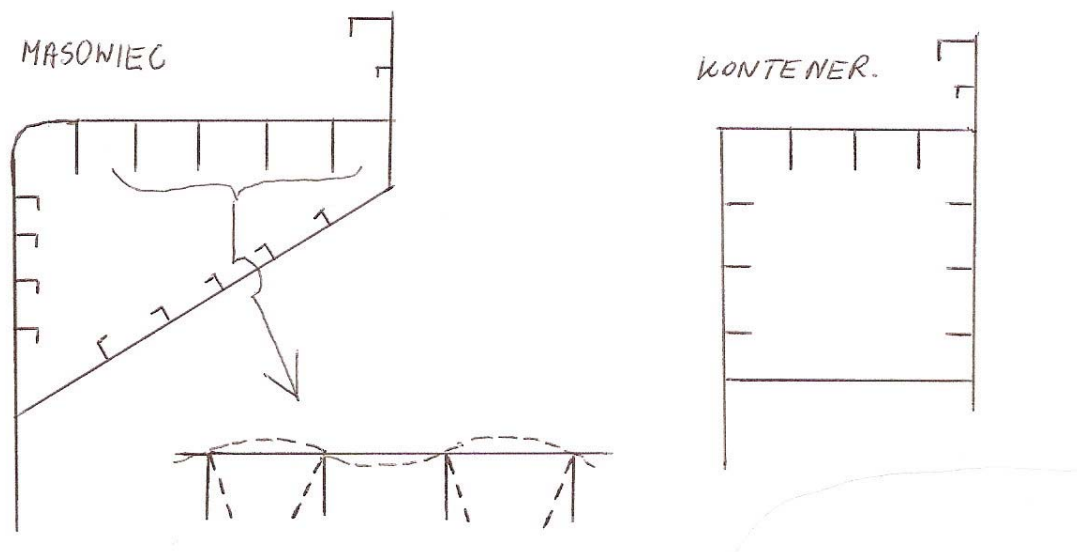
$\sigma_E$  są zamieniane na naprężenia krytyczne wg formuły Johnsona (9) – tak jak w przypadku płyt ściskanych. Usztywnienie lub podpora powinno być skonstruowane w taki sposób aby wartość  $\sigma_c$  była przynajmniej 1,1 razy większa od naprężeń ściskających odpowiadającym obciążeniom obliczeniowym. Takie kryteria jest np. podane w Przepisach [1]. Spełnienie tego kryterium nastąpi przy odpowiednio dużej wartości  $I$  lub małej wartości  $l$ .

Warto zauważyć, że  $\sigma_E$  są wprost proporcjonalne do  $E$ . Oznacza to, że problemy z zapewnieniem stateczności elementów ściskanych dotyczą bardziej konstrukcji ze stopów aluminium niż ze stali. Wytrzymałość niektórych stopów aluminium jest bowiem zbliżona do wytrzymałości stali a moduł Younga jest około 3 razy mniejszy.

Trudniej jest także zapewnić stateczność elementów konstrukcji ze stali o podwyższonych wytrzymałościach ( granica plastyczności o wartości 315 MPa, 355 MPa lub 390 MPa) niż ze stali o normalnej wytrzymałości ( $R_e = 235$  MPa).

### Wyboczenie skrętne

Wyboczenie skrętne polega na skręcaniu ściskanych usztywnień poszycia lub wiązarów wokół osi obrotu usytuowanej w miejscu połączenia środka z poszyciem. Przykład takiego wyboczenia pokazano na rys. VII.15.



Rys. VII.15 Wyboczenie skrętne

Zagrożone tego typu wyboczeniem są zwłaszcza wzdłużne usztywnienia pokładu wytrzymałościowego dużych statków, wykonane w formie płaskowników o znacznej wartości ilorazu wysokości do grubości, w warunkach zginania ogólnego statku. Usztywnienia pokładu wytrzymałościowego dużych statków, w formie płaskowników, są często stosowane przez konstruktorów w celu podwyższenia wartości wskaźnika wytrzymałości kadłuba.

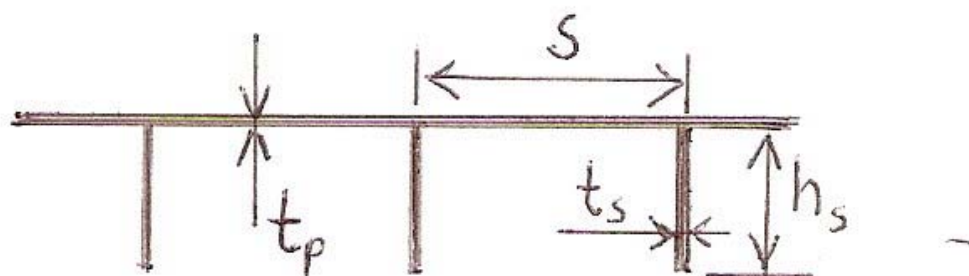
Formuły do obliczania  $\sigma_E$  podawane w Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych są stosunkowo złożone i nie będą tutaj przytaczane.

Wartość  $\sigma_E$  zależy od takich parametrów jak:

- kształt i wymiary przekroju poprzecznego,
- moduł Younga,
- rozpiętość (odległość wiązarów),
- odstęp usztywnień i grubość poszycia,
- poziom naprężeń ściskających poszycie.

Usztywnienia mogą być generalnie uszeregowane według wartości odporności na tego typu wyboczenie, w następującej kolejności : płaskowniki, płaskowniki łebkowe, kątowniki, łebkowniki.

Zapobieganie wyboczeniu polega na stosowaniu odpowiednio małych wartości rozpiętości  $l$  (odstępu wiązarów) lub  $h_s/t_s$  (patrz rys. VII.16).



Rys. VII.16 Wymiary płaskownika i poszycia

Poniższy przykład obliczeń  $\sigma_E$  wg wzorów w Przepisach [1] wykazuje, że usztywnienia pokładu wytrzymałościowego, w formie płaskownika, są rzeczywiście zagrożone wyboczeniem skrętnym.

Do obliczeń przyjęto (rys. VII.16):

$s = 0,8 \text{ m}$ ,

$l = 3,6 \text{ m}$  (odstęp wiązarów; 4 odstępów wręgowe po  $0,9 \text{ m}$ ),

$R_e = 390 \text{ MPa}$ ,

$\sigma = 250 \text{ MPa}$  – dopuszczalny poziom naprężeń poszycia pokładu wytrzymałościowego ze stali  $R_e = 390 \text{ MPa}$ , w warunkach zginania ogólnego.

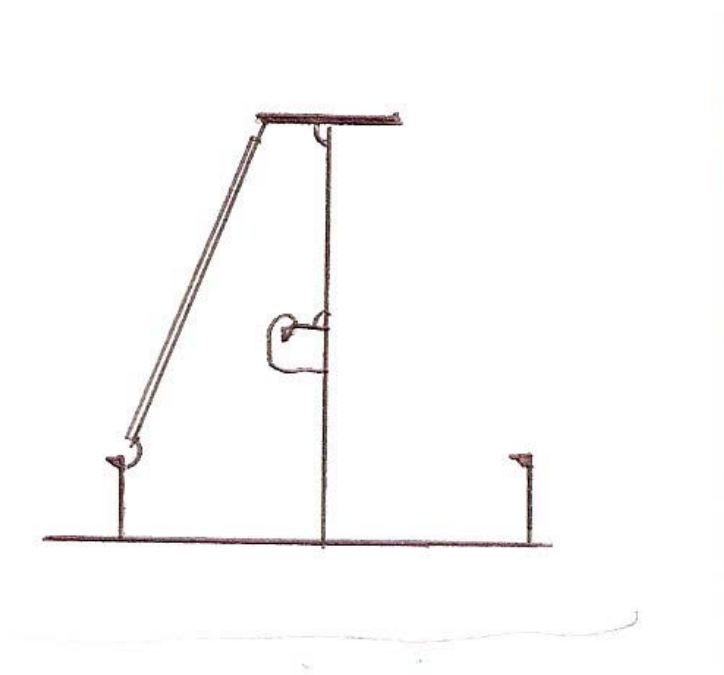
Wyniki obliczeń podano w poniższej tabeli.

Tabela 2. Obliczone wartości  $\sigma_E$  usztywnień w formie płaskownika

Lp.	$t_p$ [mm]	$h_s$ [mm]	$t_s$ [mm]	$\sigma_E$ [MPa]	Uwagi
1	20	300	10	180,3	$\sigma_E < \sigma$ ! – gdyż płaskownik jest smukły
2	20	250	12	346,0	$\sigma_E > \sigma$ ; pole przekroju uszt. jak w p.1 ale mniejsze $h_s/t_s$
3	20	200	15	746,0	$\sigma_E > \sigma$ ; pole przekroju uszt. jak w p.1 ale mniejsze $h_s/t_s$
4	15	300	10	117,5	W stosunku do p.1 zmniejszono $t_p$

Jeżeli płaskownik o wymiarach jak w p. 4 tabeli zastąpić teownikiem o takim samym polu przekroju, o średniku  $200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  i mocniku  $100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , to otrzymamy  $\sigma_E = 522 \text{ MPa}$ .

Wyboczeniu skrętnemu wiązarów zapobiega się poprzez podparcie ich środków węzłówkami przeciwskrętnymi, rozstawionymi w regularnych odstępach (rys. VII.17).



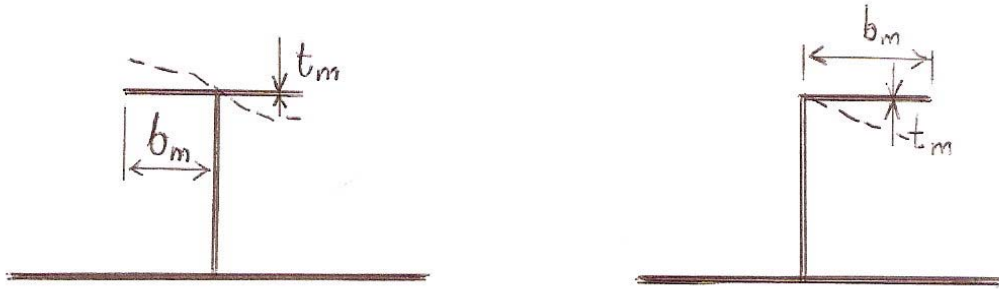
Rys. VII.17 Węzłówka przeciwskrętna wzdluznika dna pojedynczego statku

### Wyboczenie środnika

Zagrożone są zwłaszcza środniki wiązarów, w warunkach ściskania. Do szacowania poziomu  $\sigma_E$  stosowane są metody i wzory omówione wcześniej przy wyboczeniu płyt. Odpowiednio dużą wartość  $\sigma_E$  uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiednio dużej wartości ilorazu grubości środnika do wysokości środnika oraz poprzez usztywnianie środnika ( patrz np. rys. VII.10 i VII.11).

### Zwichrzenie mocnika

W warunkach ściskania może wystąpić wyboczenie mocnika usztywnienia lub wiązara w formie pokazanej na rys. VII.18.

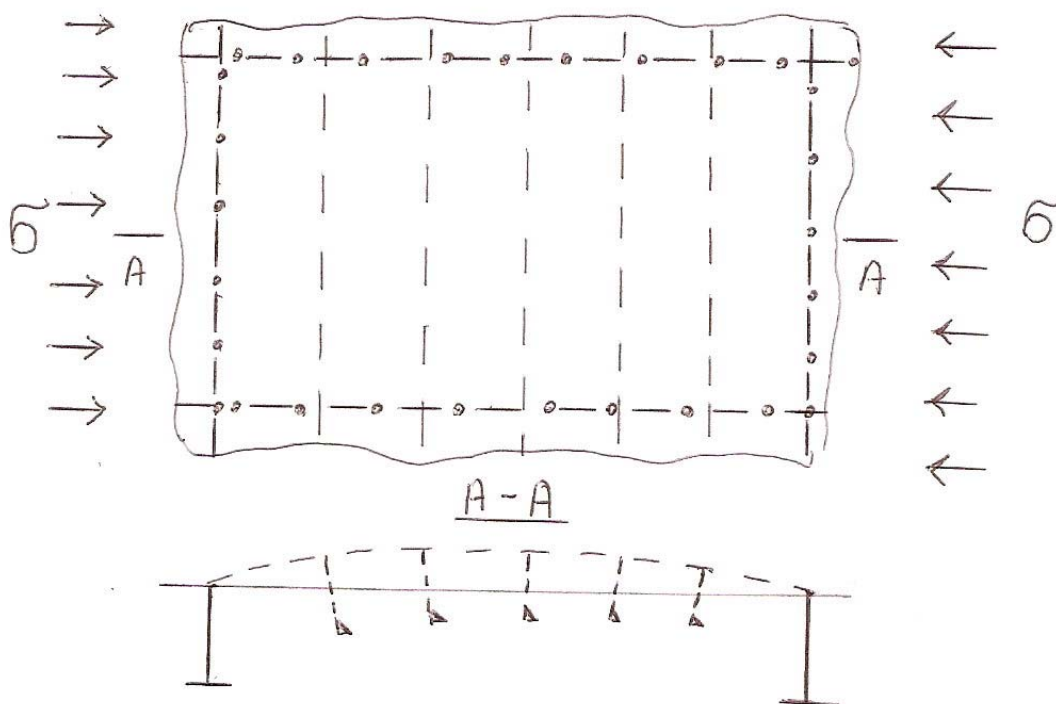


Rys. VII.18 Zwichrzenie mocnika

Zastosowanie mocnika o wymiarach takich, że  $t_m \geq \frac{1}{15} b_m$  zapewni odpowiednią odporność na wyboczenie w konstrukcji stalowej.

### Krytyczna sztywność usztywnień podpierających poszycie

W sytuacji gdy usztywnienia podpierające płat poszycia będą względnie delikatne, to może dojść w warunkach ściskania do wyboczenia płata poszycia pomiędzy wiązarami jak pokazano na rys. VII.19.



Rys. VII.19 Wyboczenie usztywnionego płyta poszycia

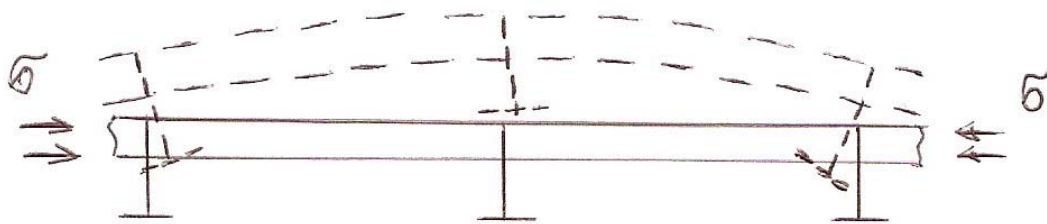
Wyboczeniu zapobiega się poprzez zastosowanie usztywnień o odpowiednio dużej wartości momentu bezwładności  $I$  przekroju poprzecznego wraz z pasem współpracującym poszycia. Formuły do obliczania wymaganej wartości  $I$  są podane w Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych.

Problem zapobieganiu wyboczeniu jak na rys. VII.19 może być istotny np. w przypadku pokładów przenoszących znaczne wartości naprężeń  $\sigma$  a konstruowanych na względnie małe wartości ciśnień obliczeniowych, obciążających pokład lokalnie. Klasyczny przykład to pokłady długich nadbudówek promów pasażersko – samochodowych, ze stopów aluminium.

#### Krytyczna sztywność wiązarów podpierających usztywnienia poszycia

W sytuacji, gdy wiązary podpierające ściskane usztywnienia poszycia są stosunkowo delikatne może dojść do wyboczenia w formie pokazanej na rys. VII.20. Przy wyboczeniu dochodzi do ugięcia wiązarów.





Rys. VII.20 Wyboczenie ściskanych usztywnień z ugięciem wiązarów

Prawidłowo skonstruowane wiazary powinny pozostać nie wygięte – tak jak pokazano na rys. VII.14. Wystąpi to wówczas, gdy ich sztywność ( moment bezwładności  $I$  przekroju poprzecznego wraz z pasem współpracującym poszycia ) będzie większa od tzw. sztywności krytycznej. Oznacza to, że osiągniemy wówczas największy możliwy poziom wartości  $\sigma_E$  usztywnień poszycia, określony wzorem (10). Powiększanie  $I$  ponad jego wartość krytyczną nie spowoduje zwiększenia wartości  $\sigma_E$  usztywnień poszycia.

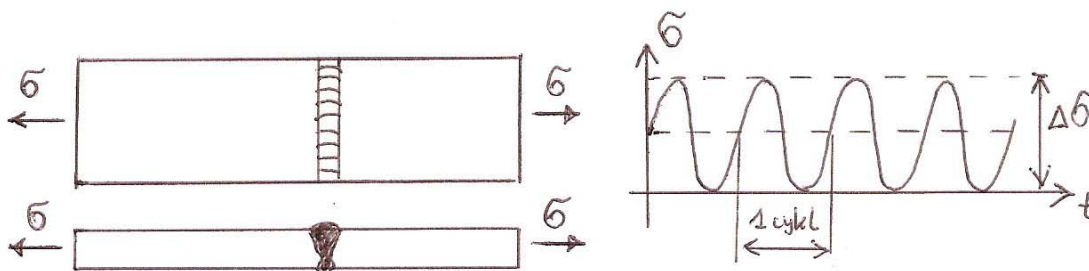
Formuły do obliczania krytycznej wartości  $I$  podane są w Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych.

Omawiany problem może być np. istotny w przypadku wspomnianym wyżej, przy omawianiu problemu krytycznej sztywności usztywnień poszycia.

## VIII. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA ELEMENTÓW KONSTRUKCJI KADŁUBA STATKU

### Wytrzymałość zmęczeniowa a wytrzymałość doraźna

Założmy, że pasek blachy stalowej zawierający spoinę doczołową został poddany zmiennym w czasie naprężeniom ( rys. VIII.1). Na rysunku zdefiniowano cykl naprężeń oraz zakres naprężeń  $\Delta\sigma$ .



Rys. VIII.1 Zmienne w czasie obciążenie blachy zawierającej spoinę

Okazuje się, że element konstrukcji jak na rys. VIII.1 może ulec zniszczeniu po około 2 milionach cykli gdy  $\Delta\sigma = 100$  MPa. Zniszczenie będzie miało formę tzw. przelomu zmęczeniowego. Element zostanie rozdzielony na dwie części w miejscu usytuowania spoiny lub w jej bezpośrednim sąsiedztwie.

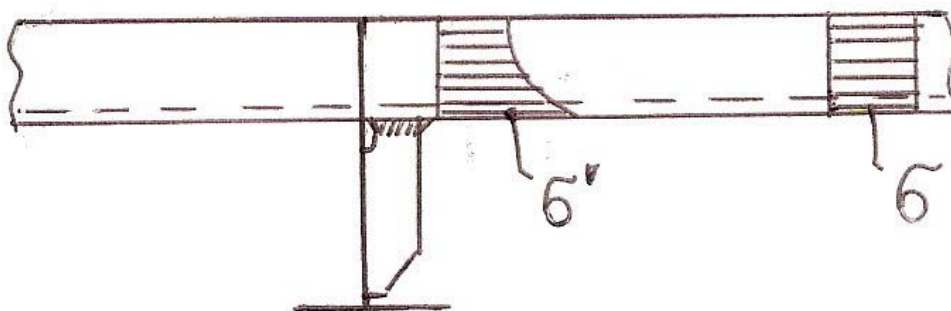
Zauważmy, że zniszczenie lub uszkodzenie ( trwałe wydłużenie ) elementu konstrukcji jak na rys. VIII.1 przy jednorazowym obciążeniu wywołującym stan jednoosiowego naprężenia  $\sigma$  wymaga aby poziom tych naprężeń był równy przynajmniej wartości granicy plastyczności stali  $R_e$ . W przypadku tzw. stali o normalnej wytrzymałości  $R_e = 235$  MPa.

Widzimy więc, że element konstrukcji może ulec zniszczeniu przy ekstremalnych wartościach naprężeń znacznie mniejszych od granicy plastyczności ale wymagane jest wielokrotne zadziaływanie naprężeń. Tego typu zniszczenie nazywamy zmęczeniem elementu konstrukcji. Zjawisko pękania zmęczeniowego elementów konstrukcji ma istotny wpływ na konstrukcję kadłubów statków.

### Mechanizm i przyczyny pękania zmęczeniowego konstrukcji spawanych

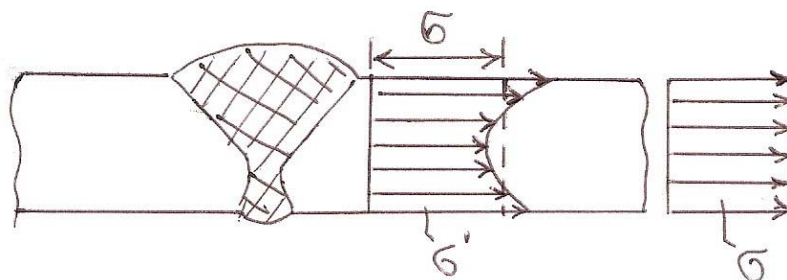
Pękanie zmęczeniowe konstrukcji spawanych zazwyczaj występuje w spoinach lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Im większe wartości  $\Delta\sigma$  tym szybciej ( po mniejszej liczbie cykli naprężeń ) wystąpi pęknięcie. Wynika to z niżej opisanych cech konstrukcji.

- A. Spoiny często usytuowane są tam, gdzie występuje spiętrzenie ( koncentracja ) naprężeń w konstrukcji. Jako przykład rozważmy połączenie wzdłużnego usztywnienia pokładu wytrzymałościowego z wiazarem ( pokładnikiem ramowym ) – poprzez usztywnienie środka pokładnika ramowego, które zapobiega jego wyboczeniu ( rys. VIII.2 ). Naprężenia  $\sigma$  od zginania ogólnego kadłuba, równomiernie rozłożone na wysokości usztywnienia w pewnym oddaleniu od wiazara, ulegają spiętrzeniu w bezpośrednim sąsiedztwie wiazara. W tym miejscu jest natomiast zastosowana spoina.



Rys. VIII.2. Koncentracja naprężeń w pokładniku wzdłużnym

- B.** Same spoiny doczołowe łączące arkusze blach stanowią rodzaj karbu – ze względu na swój kształt. Problem wyjaśnia rys. VIII.3



Rys. VIII.3. Spiętrzenie naprężeń w rejonie spoiny doczołowej

- C.** W samych spoinach są zawsze wady i defekty mikrostruktury takie jak wtrącenia żużla, lokalne braki przetopu, podtopienia, mikropęknięcia. Powyższe wady w każdym cyklu naprężeń powiększają się, mikropęknięcia łączą się w większe pęknięcia. Po pewnym czasie stają się widoczne gołym okiem. Przyrost wymiarów tych mikropęknięć staje się większy z każdym cyklem naprężeń. W końcu pojawia się pęknięcie na wskroś.

W materiale rodzimym ( bez spoin ) pękanie zmęczeniowe także występuje ale jego przebieg w czasie jest nieco inny. W pierwszej fazie zmiennego obciążenia następuje tzw. inicjacja pęknięcia czyli zmiany struktury materiału w skali „mikro”, bez pęknięć. Faza ta może stanowić nawet 50% cykli powodujących zniszczenie zmęczeniowe elementu konstrukcji. Później pojawiają się mikropęknięcia, które powiększają się z każdym cyklem naprężeń. W końcu występuje pęknięcie „na wskroś”.

W opisie procesu zmęczenia konstrukcji stosowane są zamiennie dwa terminy :  
wytrzymałość zmęczeniowa i trwałość zmęczeniowa.

Pierwszy termin oznacza wartość  $\Delta\sigma$  przy której występuje pęknięcie zmęczeniowe przy zadanej liczbie cykli.

Drugi termin należy rozumieć jako liczbę cykli powodującą pęknięcie zmęczeniowe przy zadanym poziomie  $\Delta\sigma$ .

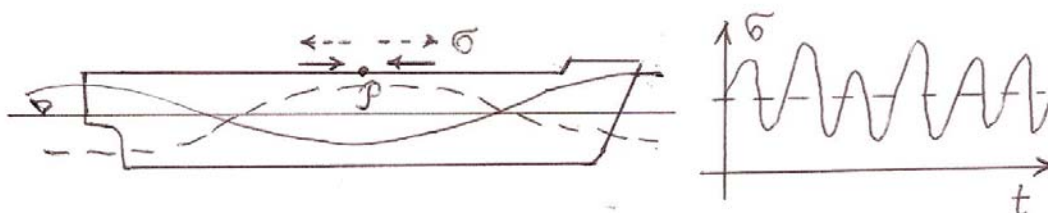
Istotną cechą stalowych konstrukcji spawanych jest to, że wytrzymałość zmęczeniowa w rejonach spoin praktycznie nie zależy od wartości granicy plastyczności stali. W konstrukcji kadłuba statku ze stali PW (o podwyższonej wytrzymałości;  $R_e > 235 \text{ MPa}$ ), projektowanej wg kryterium naprężeń dopuszczalnych, występują większe wartości  $\Delta\sigma$  niż w równoważnej konstrukcji z tzw. stali NW (o normalnej wytrzymałości;  $R_e = 235 \text{ MPa}$ ). Konstrukcja ze stali PW będzie więc bardziej skłonna do pęknięcia zmęczeniowego niż konstrukcja ze stali NW – o ile nie zastosujemy specjalnych zabiegów na etapie projektowania i budowy kadłuba mających na celu zmniejszenie spiętrzenia naprężeń w rejonach spoin.

#### Przykłady obciążeń dynamicznych kadłubów statków

Pęknięcia zmęczeniowe kadłubów statków występują tylko wtedy, gdy w konstrukcji pojawiają się zmienne w czasie naprężenia (cykle naprężeń). Zmienne naprężenia pojawiają się zawsze, gdy statek pływa w pofalowanej wodzie. Jak wiemy, taki stan występuje stosunkowo często.

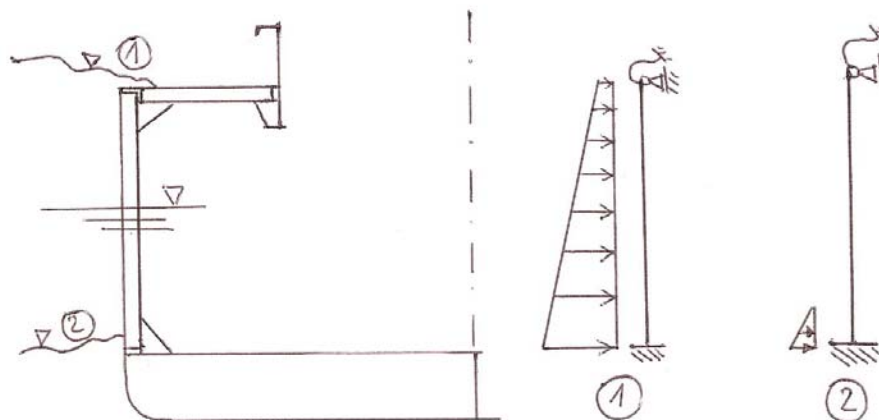
Poniżej podano kilka przykładów obciążeń wywołujących cykle naprężeń w elementach konstrukcji kadłuba.

Na rys. VIII.4 pokazano schematycznie naprężenia  $\sigma$  w pokładzie wytrzymałościowym statku, spowodowane zginaniem ogólnym „na fali”.



Rys. VIII.4 Zginanie ogólne kadłuba statku „na fali”

Na rys. VIII.5 pokazano zmienne obciążenie działające na wręg burtowy statku pływającego na pofalowanej wodzie. Poziom pofalowanej wody zmienia się w danym miejscu w funkcji czasu. Statek dodatkowo wykonuje ruchy oscylacyjne (np. kołysania boczne). Wskutek tego zmienia się chwilowy poziom wody przy burcie, w miejscu wybranego wręgu. Zmienia się więc całkowity napór wody na wręg. Na rys. VIII.5 pokazano to schematycznie na modelu wręgu w formie belki. W materiale wręgu występują więc zmienne w czasie naprężenia. W rejonach węzłówek wystąpi przy tym koncentracja naprężeń.



Rys. VIII.5 Zginanie wręgu statku „na fali”

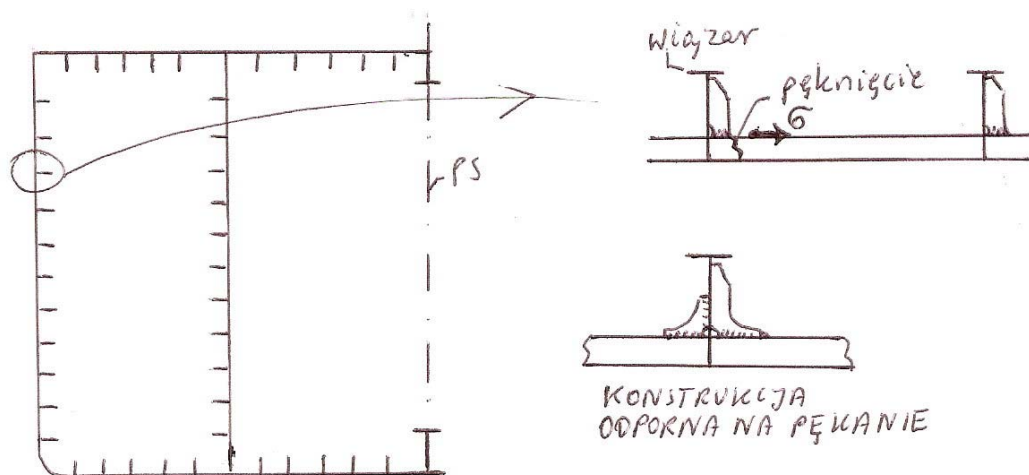
Zmienne w czasie obciążenia konstrukcji kadłuba „na fali” są wywoływane przez siły bezwładności ładunku statku – wskutek przemieszczeń statku z niezerowymi przyspieszeniami. Na rys. VIII.6 pokazano przykład tego typu obciążenia. Element ładunku położony na pokładzie przemieszcza się z pionowymi przyspieszeniami  $a_v$ , których wartości zmieniają się w czasie. Nacisk ładunku na pokład zmienia się więc w funkcji czasu a w elementach zginanego pokładu występują cykle naprężeń.



Rys. VIII.6 Zmienne obciążenie pokładu wywołane ruchami kadłuba statku „na fali”

#### Elementy konstrukcji kadłuba statku zagrożone pękaniem zmęczeniowym

Najbardziej zagrożone pękaniem zmęczeniowym są elementy konstrukcji kadłuba gdzie występują duże wartości zakresów naprężeń  $\Delta\sigma$  ( nominalnych, tzn bez uwzględniania lokalnych spięrzeń naprężeń) i znaczna koncentracja naprężeń. Przykładem takiego miejsca w konstrukcji jest np. połączenie wzdłużnego usztywnienia burty zbiornikowca z wręgiem ramowym ( rys. VIII.7).



Rys. VIII.7 Pęknięcie zmęczeniowe wzdłużnych usztywnień burty

Naprężenia  $\sigma$  w usztywnieniu, w rejonie karbu ( rys. VIII.7) są skutkiem zginania ogólnego kadłuba w płaszczyznach pionowej i poziomej oraz lokalnego zginania usztywnienia pomiędzy wiązarami ciśnieniem wody zaburtowej i ciśnieniem ładunku płynnego lub balastu wodnego w zbiorniku. Na dużych tankowcach zanotowano w przeszłości wiele pęknięć zmęczeniowych pokazanych schematycznie na rys. VIII.7. Zapobiec takim pęknięciom

można np. poprzez złagodzenie karbu, stosując z obu stron środka wiązara węzłówki o „miękkich” zakończeniach ( patrz rys. VIII.7).

Pękaniem zmęczeniowym zagrożone są te elementy konstrukcji okrętowych, gdzie zakresy naprężeń nominalnych osiągają znaczące wartości i występuje koncentracja naprężeń.

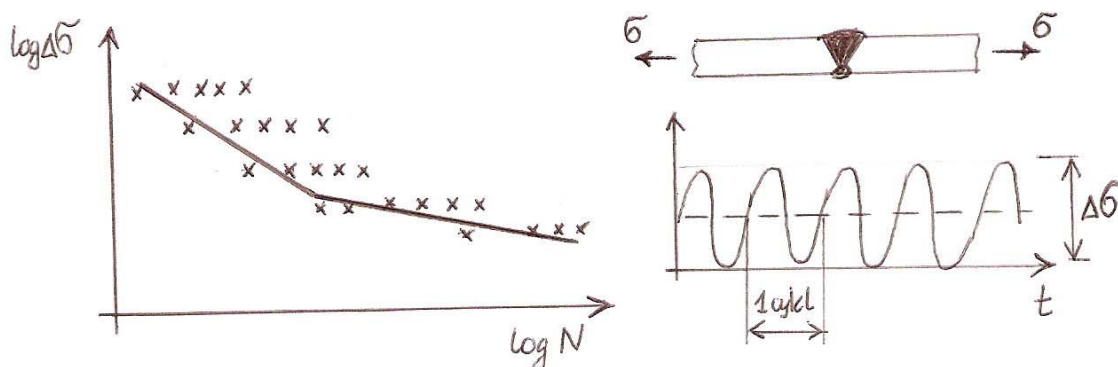
Przykłady takich elementów:

- spoiny przy krawędziach wszelkich wycięć lub otworów w kadłubie lub materiał rodzimy ( stal ) przy krawędziach wycięć/ otworów takich jak : otwory lukowe w pokładach; otwory przelewowe i odpowietrzające w usztywnieniach poszycia i w wiązarach, itp.;
- rejonu połączeń węzłowych elementów konstrukcji.

#### Wykresy Wöhlera. Klasyfikacja połączeń spawanych

Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłubów statków bazują na tzw. wykresach Wöhlera , utworzonych na podstawie wyników obszernych badań eksperymentalnych modeli ( próbek ) odwzorowujących typowe węzły konstrukcyjne konstrukcji spawanych.

Charakterystyczną cechą zjawiska zmęczenia materiału w rejonie spoin jest znaczny rozrzut wyników dla z pozoru identycznych próbek . Wyniki mają charakter losowy. Cechę tą przedstawiono schematycznie na rys. VIII.8, gdzie naniesiono możliwe położenie punktów pomiarowych dotyczących połączenia doczołowego blach, w logarytmicznym układzie współrzędnych. Punkty pomiarowe oznaczono symbolem „x”. Ośiami układu współrzędnych są:  $\log \Delta\sigma$  oraz  $\log N$ .  $\Delta\sigma$  oznacza zakres naprężeń a  $N$  – liczbę cykli do zniszczenia próbki.



Rys. VIII.8 Koncepcja wykresu Wöhlera

Wyniki pomiarów zastępuje się linią ciągłą złożoną z dwóch odcinków linii prostej, która jest niemalże ich dolną obwiednią, tzn. przebiega ona w pobliżu punktów odpowiadających uzyskanym wynikom dla próbek o najmniejszej trwałości zmęczeniowej. Ta linia ciągła nosi nazwę „wykres Wöhlera”. Przebiega ona o dwa odchylenia standardowe poniżej linii odpowiadającej średnim wartościom  $\Delta\sigma$  dla zadanych wartości  $N$ . Oznacza to, że tylko około 5% wyników eksperymentów wykazuje mniejszą trwałość zmęczeniową niż wynika to z wykresu Wöhlera.

W większości Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych stosowany jest pakiet wykresów Wöhlera opracowanych przez brytyjską instytucję ‘Department of Energy’. Poszczególne wykresy oznaczono symbolami: B, C, D, E, F, F2, G, W. Poszczególne wykresy są przyporządkowane do różnych węzłów konstrukcji spawanych. Każdy z wykresów składa się z dwóch prostoliniowych gałęzi, które można opisać równaniem:



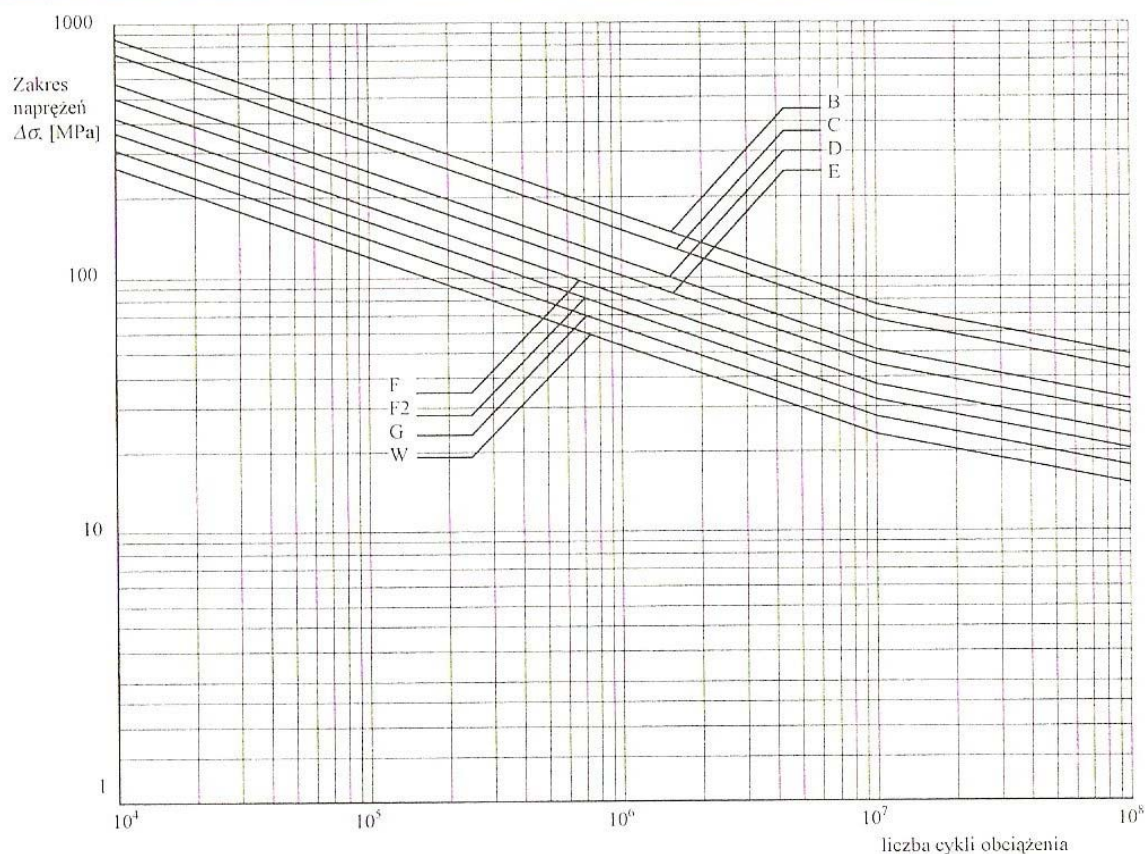
$$N = \frac{K}{\Delta\sigma^m} \quad (1)$$

gdzie:

$K$  – współczynnik liczbowy o różnych wartościach dla poszczególnych wykresów;

$m = 3$  dla  $N < 10^7$ ;  $m = 5$  – dla  $N \geq 10^7$ .

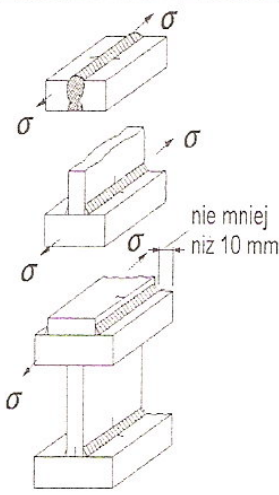
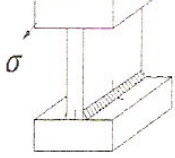

Pakiet tych wykresów pokazano na rys VIII.9.



Rys.VIII.9 Pakiet wykresów Wöhlera

Wykresy Wöhlera dobiera się do poszczególnych węzłów konstrukcji na podstawie tzw. tabeli klasyfikacji węzłów spawanych ( patrz rys. VIII.9 – fragment tabeli z Przepisów PRS [7]). W tabeli takiej ( w kolejnych kolumnach ) znajdują się szkice różnych węzłów konstrukcji, wykresy Wöhlera, które mają zastosowanie, opis węzła i uwagi na temat sposobu pęknięcia zmęczeniowego oraz objaśnienia dodatkowe ( w ostatniej kolumnie).



<p>2a</p>		<p>B</p>	<p>Spoiny czołowe, z pełnym przetopem, nadlewy spoiny zeszlifowane do poziomu powierzchni elementów, w kierunku naprężeń. Jakość spoin sprawdzona badaniami nieniszczącymi.</p>	<p>Wielkość dopuszczalnych minimalnych wymiarów defektów spoin należy określać metodami mechaniki pękania. Zastosowana metoda badań nieniszczących musi wykrywać defekty o wymiarach jak wyżej.</p>
<p>2b</p>		<p>C</p>	<p>Spoiny czołowe lub pachwinowe, wykonane automatycznie z płytkami wybiegowymi.</p>	<p>Jeżeli przy wykonaniu połączenia wystąpi przypadkowe przerwanie spawania, należy zapewnić podobną jakość i kształt spoiny jak przy spawaniu ciągłym.</p>
<p>2c</p>		<p>D</p>	<p>Jak 2b, gdy w procesie spawania występują przerwy.</p>	<p>Dla zakończeń płyt nakładkowych na mocnikach obowiązuje wariant 12.</p>
<p>III. Drobne elementy spawane do powierzchni lub krawędzi elementów (płyt) obciążonych – patrz uwaga 3) poniżej tabeli</p>				
<p>3</p>		<p>—</p>	<p>Pęka materiał rodzimy płyty obciążonej, w sąsiedztwie spoiny, niezależnie od usytuowania spoiny względem kierunku naprężeń i od typu spoin (ciągła albo przerywana).</p>	<p>Złącza wykonywane z pełnym przetopem lub częściowym przetopem powinny mieć kształt powierzchni zewnętrznej spoiny podobny do spoiny pachwinowej.</p>
<p>3a</p>		<p>F</p>	<p>Długość elementu przyspawanego równoległego do kierunku naprężeń nie większa niż 150 mm, a odległość od brzegu płyty większa niż 10 mm.</p>	
<p>3b</p>		<p>F2</p>	<p>Długość elementu przyspawanego równoległego do kierunku naprężeń większa niż 150 mm, a odległość od brzegu spoiny &gt; 10 mm.</p>	

pęknięcia zmęczeniowego. Zjawisko koncentracji naprężeń uwzględnia się poprzez wartość współczynnika  $K$  wykresu Wöhlera.

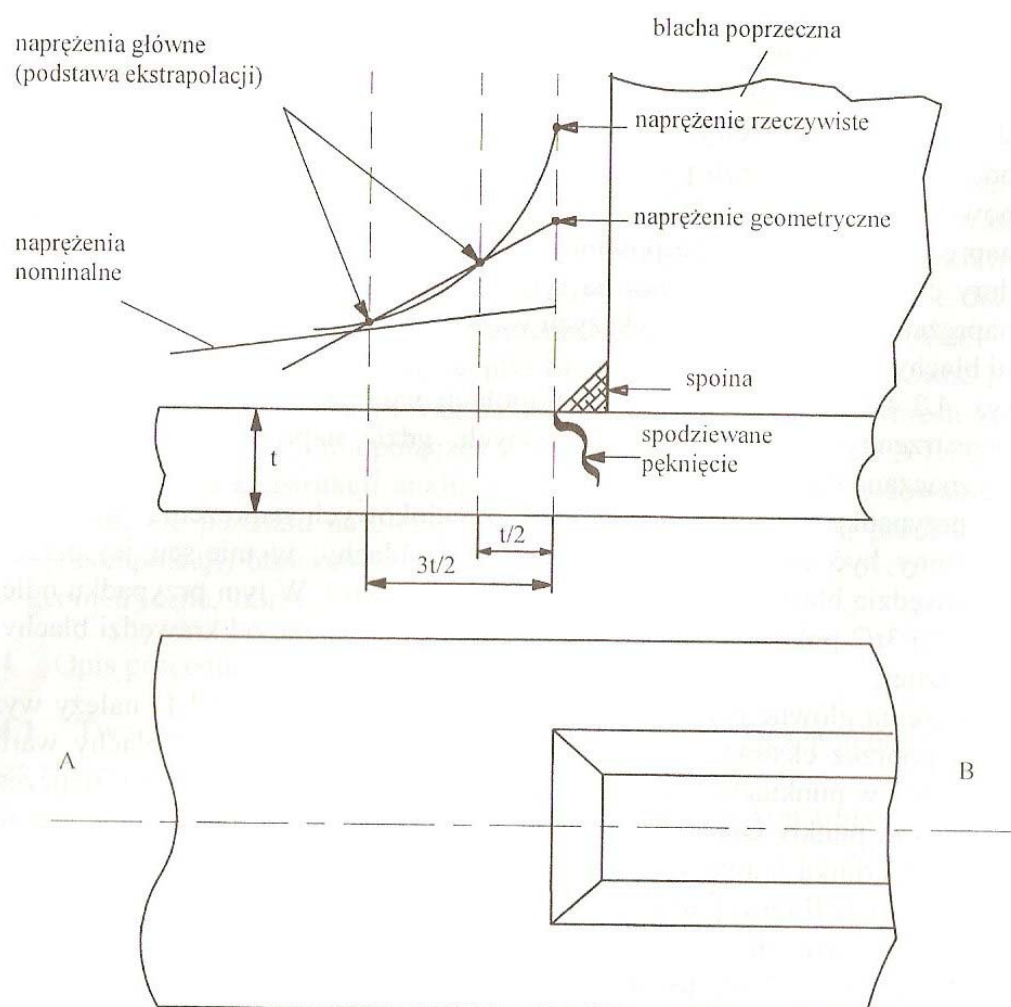
#### Naprężenia geometryczne

Tabele klasyfikacji węzłów konstrukcyjnych nie obejmują wszelkich przypadków, które można spotkać w konstrukcji kadłubów statków. W związku z tym opracowano metodę szacowania wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie wartości tzw. zakresów naprężeń geometrycznych i jednego wykresu Wöhlera ( w przepisach PRS [7] stosowany jest wykres „D” ).

Naprężenia geometryczne różnią się od naprężeń nominalnych i od rzeczywistych naprężeń w miejscu potencjalnego pęknięcia zmęczeniowego ( rys.VIII.10 ). Są one wyznaczane na podstawie wartości naprężeń w modelu konstrukcji obliczanych metodą elementów skończonych ( MES ). Stosowane są tzw. powłokowe lub bryłowe elementy skończone o ściśle określonych wymiarach, zależnych od grubości blach tworzących analizowany węzeł konstrukcji. Aby wyznaczyć naprężenia geometryczne należy dokonać ekstrapolacji naprężeń obliczonych MES w ściśle określonych miejscach kadłuba, w kierunku miejsca zakładanego pęknięcia zmęczeniowego ( rys. VIII.10 ). Ekstrapolacji podlegają naprężenia główne o największych wartościach.

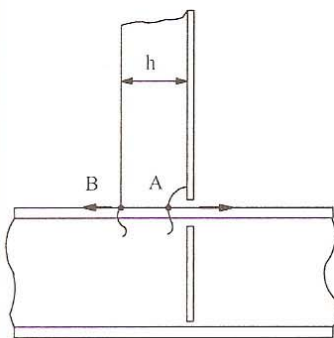
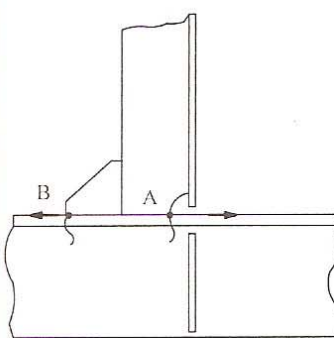
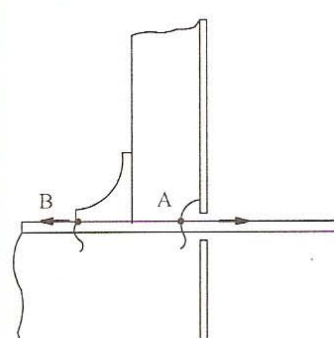
Więcej szczegółów można będzie usłyszeć na wykładzie z zakresu wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji kadłuba statku.

W wielu przypadkach wartości naprężeń geometrycznych można wyznaczyć poprzez pomnożenie naprężeń nominalnych przez współczynnik koncentracji naprężeń. Wartości współczynników koncentracji naprężeń dla wielu popularnych węzłów konstrukcyjnych można znaleźć w Przepisach towarzystw klasyfikacyjnych. Przykład zaczerpnięty z przepisów PRS [7] pokazano na rys. VIII.11.



Rys. VIII.10 Definicja naprężeń geometrycznych

**Tabela 2.2.8.3**  
Wartości współczynników koncentracji naprężeń  $C_W$

Nr	Rodzaj połączenia	$C_W$																																
		Rozciąganie (ściskanie)	Zginanie	Uwagi																														
1	2	3	4	5																														
1		<table><tr><th><math>h</math> [mm]</th><th colspan="2"><math>C_W</math></th></tr><tr><th></th><th>p. A</th><th>p. B</th></tr><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></table>	$h$ [mm]	$C_W$			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><tr><th><math>h</math> [mm]</th><th colspan="2"><math>C_W</math></th></tr><tr><th></th><th>p. A</th><th>p. B</th></tr><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></table>	$h$ [mm]	$C_W$			p. A	p. B	100	2,07	1,04	200	2,18	1,36	(1), (2)
$h$ [mm]	$C_W$																																	
	p. A	p. B																																
100	1,33	1,22																																
140	1,38	1,28																																
180	1,43	1,33																																
220	1,46	1,37																																
$h$ [mm]	$C_W$																																	
	p. A	p. B																																
100	2,07	1,04																																
200	2,18	1,36																																
2		p. A: $C_W = 1,72$ p. B: $C_W = 1,60$	p. A: $C_W = 2,20$ p. B: $C_W = 1,75$	(1), (2)																														
3		p. A: $C_W = 1,65$ p. B: $C_W = 1,50$	p. A: $C_W = 2,20$ p. B: $C_W = 1,60$	(1), (2)																														

Rys. VIII.11 Przykładowe wartości współczynników koncentracji naprężeń

### Opis losowych wartości $\Delta\sigma$

Zakresy naprężeń  $\Delta\sigma$  mają charakter losowy, ponieważ są one wynikiem działania na kadłub statku obciążeń od falowania morza, które ma charakter losowy. Powinny więc być opisywane z zastosowaniem metod teorii prawdopodobieństwa. Towarzystwa klasyfikacyjne zgromadziły bogatą wiedzę na temat obciążeń kadłubów statków w warunkach falowania morza i wywoływanych przez nie naprężeń w kadłubach statków. Zgodnie z tą wiedzą dobrym przybliżeniem dla rozkładu prawdopodobieństwa wartości  $\Delta\sigma$  w całym okresie eksploatacji statku ( 20 do 30 lat ) jest tzw. rozkład Weibulla. Wg rozkładu Weibulla prawdopodobieństwo zdarzenia, że zakres naprężeń  $\Delta\sigma$  przekroczy zadany poziom  $\Delta\sigma_0$  dane jest wzorem:

$$\Pr(\Delta\sigma \geq \Delta\sigma_0) = e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{a}\right)^\xi} \quad (2)$$

gdzie:

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

$\Delta\sigma_R$  – zakres naprężeń przekraczany z prawdopodobieństwem  $1/N_R$  ; zwykle przyjmuje się  $N_R = 10^4$ ;

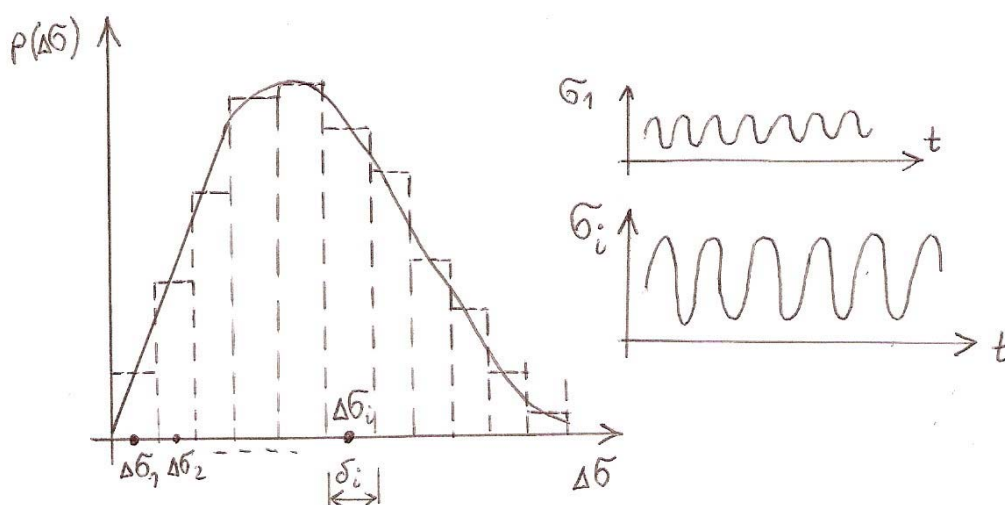
$\xi$  – współczynnik liczbowy o wartości zbliżonej do 1,0, zależny od typu statku.

Wartości  $\Delta\sigma_R$  są wyznaczane na podstawie wartości obciążeń falowych globalnych ( momenty zginające kadłub w płaszczyznach pionowej i poziomej) i lokalnych ( ciśnienia na poszyciu kadłuba; siły bezwładności ładunku ) zdefiniowanych w Przepisach ( np. w [1]).

Są to te same obciążenia, które stosowane są do sprawdzania wytrzymałości doraźnej kadłuba.

### Hipoteza Palmgren – Minera. Kryterium trwałości zmęczeniowej.

Losowe przebiegi  $\Delta\sigma$  przybliża się w obliczeniach skończoną liczbą stałych wartości  $\Delta\sigma$  – patrz rys. VIII.12. Jest to tzw. blokowa metoda obliczeń.



Rys. VIII.12 Przybliżenie losowych zakresów naprężeń w formie skończonej liczby bloków  $\Delta\sigma = const$

Istotą hipotezy Palmgrena – Minera jest założenie, że efekty zmęczenia od działania poszczególnych bloków sumują się wprost a kolejność działania poszczególnych  $\Delta\sigma$  nie ma znaczenia. Zgodnie z tą hipotezą obliczany jest tzw. stopień zużycia zmęczeniowego  $D$ :

$$D = \sum_{i=1}^{I_B} \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

gdzie:

$I_B$  – założona liczba bloków naprężeń;

$n_i$  – liczba cykli naprężeń w  $i$ -tym bloku  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_i$ ;

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

$p(\Delta\sigma_i)$ ,  $\delta_i$  – patrz rys. VIII.12;

$N_L$  – liczba wszystkich cykli naprężeń, które wystąpią w ciągu całego okresu eksploatacji statku;  $N_L$  wyznacza się wg Przepisów ( np. [7]) – w zależności od długości statku; dla 20 lat eksploatacji dużego statku

$N_L \approx 5 \cdot 10^7$ .

$N_i = \frac{K}{\Delta\sigma_i^m}$  - liczba cykli do zmęczenia przy  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_i$ , określana wg wykresu

Wöhlera o parametrach  $K$  i  $m$ .

Konstrukcja kadłuba powinna być zaprojektowana tak, aby  $D \leq 1,0$ .

Gdy  $D > 1,0$  to spodziewane są pęknięcia zmęczeniowe.

Istotną cechą zjawiska zmęczenia elementów konstrukcji kadłuba statku jest to, że małe i umiarkowane wartości  $\Delta\sigma$  ( tzn. przekraczane z prawdopodobieństwem  $10^{-4}$  do  $10^{-1}$  ), „odpowiadają za ok. 90% wartości  $D$ . Oznacza to, że na zmęczenia konstrukcji kadłuba niewielki wpływ mają obciążenia ekstremalnie duże, które mogą spowodować przekroczenie doraźnej wytrzymałości konstrukcji.

#### Metody zapewniania odpowiedniej trwałości zmęczeniowej konstrukcji kadłuba statku

Jeżeli obliczenia trwałości zmęczeniowej omówione wyżej dają wynik  $D > 1$  dla pewnego elementu konstrukcji, to skutecznym sposobem poprawy sytuacji jest zmniejszenie wartości  $\Delta\sigma$  – np. poprzez zgrubienie blachy, zastosowanie usztywnienia poszycia o większym wskaźniku przekroju, itp.

Inna skuteczna opcja to zmniejszenie koncentracji naprężeń poprzez np. zastosowanie węzłówki o „miękkim” zakończeniu, zastosowanie wycięć w elementach konstrukcji o „lepszem” kształcie, itp.

Należy pamiętać, że w konstrukcjach ze stali o podwyższonej wytrzymałości spełnienie kryterium trwałości zmęczeniowej jest trudniejsze niż w przypadku konstrukcji ze stali o normalnej wytrzymałości.

## IX. KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE ( PODSUMOWANIE )

Po zapoznaniu się z problemem wytrzymałości kadłuba statku podsumujemy kryteria wytrzymałościowe, które powinna spełniać konstrukcja kadłuba.

### A. Kryterium naprężeń dopuszczalnych ( uplastycznienie materiału )

Konstrukcja powinna być taka, że naprężenia w jej elementach nie powinny przekraczać poziomu dopuszczalnego, określonego w Przepisach klasyfikacji i budowy statków. Powyższe naprężenia są obliczane dla tzw. obciążeń obliczeniowych, podanych w Przepisach j.w.  
Stosowane są kryteria dla naprężeń normalnych, stycznych i zredukowanych.

### B. Kryterium stateczności

Elementy konstrukcji kadłuba nie powinny ulegać wyboczeniu w warunkach ekstremalnych obciążeń. Oznacza to, że naprężenia krytyczne elementów konstrukcji poddanych jednoosiowemu ścisnaniu, czystemu ścinaniu lub złożonym stanom naprężeń ( jednocześnie ścisnienie w jednym lub dwóch kierunkach i ścinanie ) powinny być odpowiednio większe od naprężeń wywoływanych przez obciążenia obliczeniowe.

### C. Kryterium trwałości zmęczeniowej

Elementy konstrukcji kadłuba statku nie powinny ulegać pękaniu zmęczeniowemu w ciągu założonego okresu eksploatacji statku ( zwykle 20 lub 25 lat ).

### D. Kryterium sztywności konstrukcji

Kryterium to ma znaczenie w przypadku konstrukcji ze stopów aluminium lub z laminatów. Odształcenia konstrukcji ( ugięcia ) pod wpływem obciążeń obliczeniowych nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych.  
Zwykle stosowane jest kryterium:

$$f < \frac{l}{100} \quad (1)$$

gdzie:

$f$  – ugięcie ( np. przęsła usztywnienia pomiędzy wiazarami );  
 $l$  – rozpiętość ( boku płyty poszycia, usztywnienia lub wiazara ).

### E. Kryterium nośności granicznej

Termin „nośność graniczna” oznacza wartość obciążenia, przy którym element konstrukcji traci zdolność równoważenia obciążenia, tzn. zamienia się w „mechanizm” – odształcenia stają się duże wskutek płynięcia plastycznego materiału lub wskutek wyboczenia. Nośność graniczna elementów konstrukcji kadłuba powinna więc być odpowiednio większa od ekstremalnych obciążeń.

Kryteria nośności granicznej są stosowane w niżej podanych wymaganiach Przepisów klasyfikacji i budowy statków ( E1 do E3).

E1. Wymagane grubości poszycia mniej odpowiedzialnych rejonów kadłuba ( np. ściany nadbudówek, poszycie kadłuba w częściach skrajnych, itp.) są obliczane wg wzoru, który wynika z opisu wyczerpania nośności granicznej płyty zginanej walcowo.

E2. Usztywnienia grodzi wodoszczelnych. Dopuszcza się niewielkie odształcenia plastyczne w warunkach awaryjnego zatopienia przedziału wodoszczelnego kadłuba.



E3. W warunkach zginania ogólnego większość towarzystw klasyfikacyjnych stosuje w swych Przepisach Kryterium:

$$M_{gr} \geq c \cdot M \quad (2)$$

Gdzie:

$M_{gr}$  – wartość momentu zginającego, przy której następuje utrata sztywności kadłuba w warunkach zginania ogólnego;

$M$  – obliczeniowa wartość momentu zginającego ( suma momentu na wodzie spokojnej i falowego );

$c$  – współczynnik bezpieczeństwa o wartości rzędu 1,15.

## **X. OCHRONA PRZED KOROZJĄ. NADDATKI KOROZYJNE**

Niektóre z elementów konstrukcji kadłubów statków intensywnie korodują wraz z upływem czasu. Dotyczy to zwłaszcza wiązań w zbiornikach balastowych, w zbiornikach tankowców i w ładowniach masowców.

Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych wymagają malowania konstrukcji w zbiornikach balastowych oraz fragmentów konstrukcji ładowni masowców. Stosowane są farby epoksydowe lub równoważne.

Należy pamiętać, że kryteria wytrzymałościowe omówione w rozdziałach VI do IX dotyczą tzw. grubości netto elementów konstrukcji.

Grubości netto blach poszycia, ścianek usztywnień i wiązarów należy powiększyć o tzw. naddatki korozyjne. Dotyczy to rejonów konstrukcji wymienionych wyżej.

Naddatki korozyjne stanowią zapas grubości elementów konstrukcji. Ich zastosowanie oznacza, że konstrukcja będzie jeszcze wystarczająco wytrzymała po względnie długim okresie eksploatacji, gdy naddatki korozyjne ulegną degradacji przez korozję.

W praktyce towarzystwa klasyfikacyjne dopuszczają zazwyczaj skorodowanie konstrukcji większe niż zastosowane naddatki korozyjne. Konstrukcje kadłubów starych statków są więc bardziej naprężone niż konstrukcje nowe.

Wartości naddatków korozyjnych są określone w Przepisach klasyfikacji i budowy statków. W zależności od rejonu konstrukcji przybierają one wartości rzędu 0,5 mm do 5 mm.

## XI. MATERIAŁY NA KADŁUBY STATKÓW

Na konstrukcje kadłubów statków stosowana jest stal o normalnej wytrzymałości ( oznaczana dalej symbolem „NW”; granica plastyczności  $R_e = 235 \text{ MPa}$  ) i stale o podwyższonej wytrzymałości ( oznaczane niżej symbolem „PW” ).

W tabeli XI-1 podano przyjęte oznaczenia stali kadłubowych, podział na kategorie i odpowiadające im wartości granicy plastyczności  $R_e$  , zgodnie z oznaczeniami w Przepisach [1]. Współczynnik  $k$  podany w tabeli służy do wyznaczania wartości naprężeń dopuszczalnych ( patrz rozdział VI ).

Kategoria stali jest natomiast miarą jej jakości. Im wyższy symbol literowy tym większa ciągliwość stali i niższa temperatura przejścia w stan kruchy ( większa odporność na tzw. „kruche pękanie”). Większa jest przy tym cena tony takiej stali.

**Tabela XI-1**

Oznaczenie	Kategoria stali				$R_e$ [MPa]	$k$
NW	A	B	D	E	235	1,00
PW32	AH32	–	DH32	EH32	315	1,28
PW36	AH36	–	DH36	EH36	355	1,39
PW40	AH40	–	DH40	EH40	390	1,43

O tym czy zastosować stal NW czy PW decyduje projektant statku w porozumieniu z Armatorem. Pozostaje natomiast problem doboru odpowiedniej kategorii stali na poszczególne elementy konstrukcji kadłuba. W tym przypadku należy spełnić wymagania Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych. Wg Przepisów [1] , przed dobraniem kategorii stali należy ustalić przynależność elementu konstrukcji do tzw. grupy wiązań. W tym celu wykorzystywana jest poniższa tabela XI-2, cytowana za [1], gdzie oprócz grup I,II,III podano w niektórych przypadkach wprost wymaganą kategorię stali.

**Tabela XI-2**  
**Grupy wiązań i kategorie materiałów**

Elementy konstrukcyjne	Grupa wiązań / kategoria materiału	
	W rejonie 0,4 $L$ w środkowej części statku	W pozostałych rejonach statku
<b>DRUGORZĘDNE:</b> A1. Pasy poszycia grodzi wzdłużnej inne niż należące do elementów głównych A2. Poszycie pokładu otwartego inne niż należące do elementów głównych lub specjalnych A3. Poszycie burt	I	A/AH
<b>GLÓWNE:</b> B1. Poszycie dna łącznie ze stępką płaską B2. Poszycie pokładu wytrzymałościowego, wyłączając poszycie należące do elementów specjalnych B3. Ciągłe elementy wzdłużne powyżej pokładu wytrzymałościowego, wyłączając zrzębnice luków B4. Górny pas poszycia grodzi wzdłużnej B5. Pas pionowy oraz górny pas pochylej ściany poszycia zbiornika szczytowego	II	A/AH

SPECJALNE: C1. Mocnica burtowa przy pokładzie wytrzymałościowym [1], [8] C2. Mocnica pokładowa pokładu wytrzymałościowego [1], [8] C3. Pas pokładu przy grodzi wzdłużnej [2], [8] C4. Poszycie pokładu wytrzymałościowego w zewnętrznych narożach otworów lukowych na kontenerowcach i innych statkach posiadających podobny układ otworów lukowych [3] C5. Poszycie pokładu wytrzymałościowego w narożach otworów lukowych na masowcach, rudowcach, statkach kombinowanych i innych statkach posiadających podobny układ otworów lukowych [4] C6. Pas obłowy poszycia [5], [6], [8] C7. Wzdłużne zrębnie luków o długości większej niż $0.15L_0$ [7] C8. Węzłówki na końcach wzdłużnych zrębnie luków oraz elementy przejściowe w przypadkach, gdy ciągła zrębnieca wzdłużna jest połączona z pokładówką [7]	III	II (I poza $0.6L$ )
---	-----	------------------------

**Uwagi** do tabeli XI-2:

- [1] Na statkach o długości obliczeniowej przekraczającej 250 m, na długości  $0.4L_0$  w środkowej części statku, kategoria materiału nie może być niższa od E/EH.  
[2] Wyłączając poszycie pokładu w rejonie burty wewnętrznej na statkach o podwójnym kadłubie.  
[3] W rejonie ładunkowym nie może być kategorii niższej od odpowiadającej grupie wiązań III.  
[4] Na długości  $0.6L_0$  w środkowej części statku nie może być kategorii niższej od odpowiadającej grupie III wiązań; w pozostałej części rejonu ładunkowego nie może być kategorii niższej od odpowiadającej grupie II wiązań.  
[5] Może być kategorii odpowiadającej II grupie wiązań na statkach o długości mniejszej niż 150 m, z podwójnym dnem na całej szerokości.  
[6] Na statkach o długości przekraczającej 250 m, na długości  $0.4L_0$  w środkowej części statku, kategoria materiału nie może być niższa niż D/DH.  
[7] Kategoria materiału nie może być niższa od D/DH.  
[8] Pojedyncze pasy poszycia, które zgodnie z wymaganiami powinny być grupy III lub kategorii E/EH, w rejonie  $0.4L_0$  śródkręcia powinny mieć szerokość nie mniejszą niż  $800+5L_0$  mm; szerokość ta nie musi być większa niż 1800 mm. Jeżeli powyższe wymaganie nie jest możliwe do spełnienia ze względu na wymiary (geometrię) projektowanego statku – podlega ono odrębnemu rozpatrzeniu przez PRS.

Wymagania [1]dotyczące kategorii materiału na elementy konstrukcji kadłuba w zależności od grupy wiązań i grubości elementu zostały określone w tabeli XI-3.

W przypadku elementów wytrzymałościowych nie wymienionych w tabeli XI-3 można generalnie stosować materiał kategorii A/AH.

**Tabela XI-3**  
**Wymagania dotyczące kategorii materiałów dla grup wiązań I, II i III**

Grupa wiązań	I		II		III	
Grubość elementu [mm]	NW	PW	NW	PW	NW	PW
$t \leq 15$	A	AH	A	AH	A	AH
$15 < t \leq 20$	A	AH	A	AH	B	AH
$20 < t \leq 25$	A	AH	B	AH	D	AH
$25 < t \leq 30$	A	AH	D	AH	D	AH
$30 < t \leq 35$	B	AH	D	DH	E	EH
$35 < t \leq 40$	B	AH	D	DH	E	EH
$40 < t \leq 50$	D	DH	E	EH	E	EH

W przypadku konstrukcji narażonych na oddziaływanie niskich temperatur ( $\leq -20^{\circ}\text{C}$ ) wymagana kategoria stali wg [1] zależy dodatkowo od tzw. projektowej temperatury konstrukcji. Zagadnienie to pomijamy w niniejszym wykładzie.

W przypadku płyt poddanych działaniu naprężeń rozciągających w kierunku prostopadłym do ich powierzchni należy stosować tzw. stal typu Z. Jest to stal odporna na rozwarstwienie.

### Celowość stosowania stali PW

Stal PW jest stosowana ze względów ekonomicznych, tzn. konstrukcja ze stali PW jest zazwyczaj tańsza w wykonaniu niż równoważna konstrukcja ze stali NW – zwłaszcza w przypadku środkowych części kadłubów dużych statków, gdzie występuje problem zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości w warunkach zginania ogólnego.

Cena tony stali PW32 jest ok. 15% większa niż cena tony stali NW. Zastosowanie tej stali w konstrukcji kadłuba pozwala przy projektowaniu konstrukcji zastosować naprężenia dopuszczalne 1,28 razy większe ( patrz  $k$  w tabeli XI-1) a więc np. znacznie cieńsze blachy pokładu wytrzymałościowego, które zapewnią odpowiednią wartość wskaźnika przekroju kadłuba – ze względu na problem zginania ogólnego. Oszczędność na kosztach stali jest w tym przypadku oczywista. Należy jednak pamiętać o większych kosztach spawania konstrukcji ze stali PW i o problemach z zapewnieniem odpowiedniej trwałości zmęczeniowej konstrukcji ze stali PW ( patrz r. VIII ).

W przypadku zastosowania stali PW36 lub PW40 pozytywny efekt ekonomiczny w pewnych sytuacjach może być jeszcze większy.

### Wymiary blach

Wymiary blach na kadłuby statków dostarczane przez huty są oczywiście ograniczone. Wynika to głównie z ograniczeń związanych z transportem kolejowym i drogowym i dostosowanym do tych ograniczeń wyposażeniem produkcyjnym hut.

Dostępne grubości blach na ogół zmieniają się co 0,5 mm w przypadku blach o grubości do 10mm; co 1,0 mm – dla blach o grubości od 10 mm do 20 mm i co 2,0 mm – dla blach grubszych niż 20 mm.

Szerokość dostępnych arkuszy blach zawiera się w przedziale od 1000 mm do 3500 mm i zmienia się z krokiem 250 mm.

Długość arkuszy blach nie przekracza na ogół 18 m.

### Kształtowniki stalowe

Usztywnienia poszycia dna, burt, pokładów, grodzi, itp. kadłuba są zazwyczaj wykonywane z kształtowników walcowanych dostarczanych przez huty.

Dostępne są następujące rodzaje kształtowników:

- płaskowniki;
- płaskowniki łebkowe;
- kątowniki nierównoramienne;
- kątowniki równoramienne.

Wymiary przekrojów poprzecznych tych kształtowników są znormalizowane.

W przypadku dużych statków często stosowane są usztywnienia prefabrykowane w stoczni, w formie teowników.

Wiązary są zazwyczaj prefabrykowane w stoczni. Mają formę teowników w konstrukcjach jednoposzyciowych lub ścianek pomiędzy płatami poszyc konstrukcji dwuposzyciowych.

### Stopy aluminium

Stosowane są często na całe kadłuby niewielkich statków – zgłasza gdy potrzebne jest uzyskanie małej masy konstrukcji ( np. kutry patrolowe ).

Ze stopów aluminium wykonywane bywają nadbudówki lub pokładówki statków o kadłubach stalowych, pokrywy lukowe, drzwi wodoszczelne, itp.

Wytrzymałość niektórych stopów aluminium osiąga poziom zbliżony do wytrzymałości stali.

Moduł Younga stopów aluminium jest natomiast około 3 razy mniejszy niż w przypadku stali. Wynikają stąd problemy z zapewnieniem odpowiedniej sztywności konstrukcji i odporności na wyboczenie.

Pozytywną cechą stopów aluminium jest ich odporność na korozję.

Konstrukcję stalową łączy się z konstrukcją aluminiową za pomocą specjalnych łączników stalowo – aluminiowych ( prętów ) wytwarzanych metodą „wybuchową” lub śrubami.

W tym drugim wariancie trzeba zapobiec korozji elektrochemicznej w miejscu styku tych dwóch materiałów – poprzez zastosowanie specjalnych przekładek izolacyjnych.

## XII. POŁĄCZENIA SPAWANE ELEMENTÓW KONSTRUKCJI

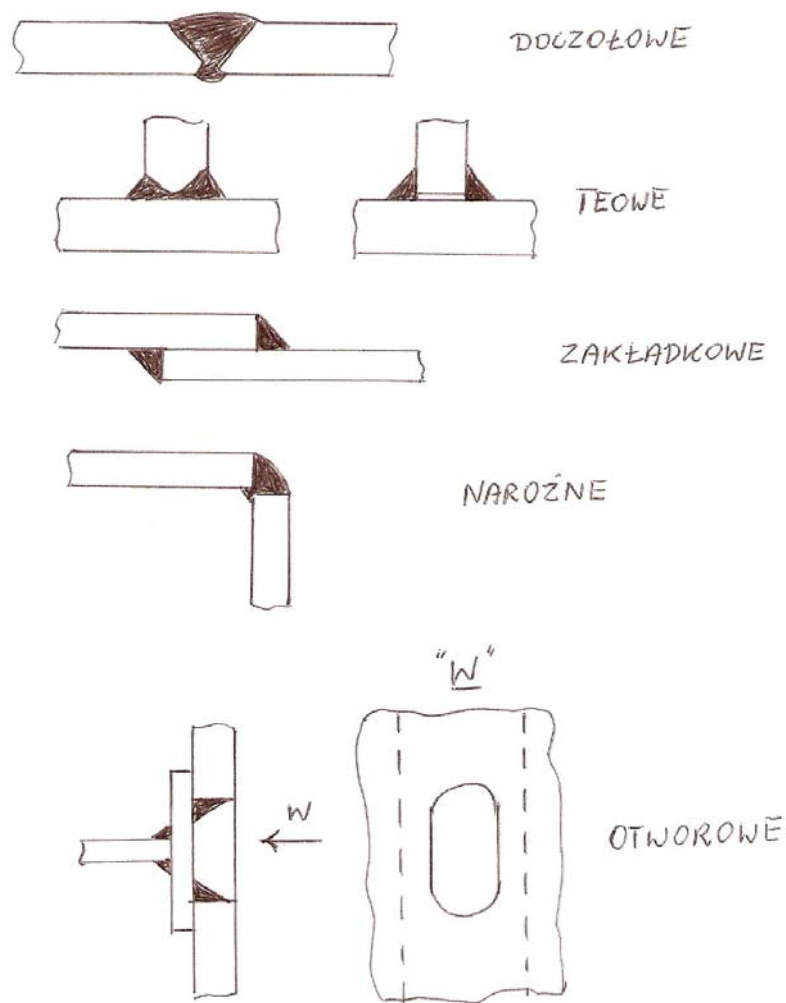
Elementy konstrukcji stalowych kadłubów statków są łączone za pomocą spawania. Przed powszechnym wdrożeniem technologii spawania stosowane było nitowanie (orientacyjnie do 1960 roku).

Spawanie może być wykonywane ręcznie (przy użyciu elektrod) lub automatycznie (drutem w osłonie).

Jakość spoiny decyduje o bezpieczeństwie kadłuba statku. W związku z powyższym towarzystwa klasyfikacyjne opracowały Przepisy dotyczące spawania i materiałów do spawania. W przypadku PRS jest to cz. IX Przepisów.

W ramach niniejszego wykładu interesuje nas przede wszystkim konstrukcja połączeń spawanych. Projektowane spoiny powinny być oczywiście możliwe do wykonania. Nie unikniemy więc całkowicie zagadnień technologii spawania.

Podstawowe typy konstrukcyjne połączeń spawanych, które są stosowane w konstrukcji kadłubów statków, pokazano na rys. XII.1.



Rys. XII.1 Podstawowe typy połączeń spawanych



Połączenia doczołowe są stosowane przy łączeniu arkuszy blach poszycia, odcinków usztywnień poszycia, wiązarów, itp.

Połączenia teowe stosuje się do łączenia usztywnień lub wiązarów z poszyciem, wzajemnie prostopadłych arkuszy blach, itp.

Połączenia zakładkowe mogą być stosowane do łączenia arkuszy poszycia na małych statkach lub w innych wyjątkowych sytuacjach.

Połączenia narożne bywają stosowane np. do łączenia mocnicy burtowej z mocnicą pokładową.

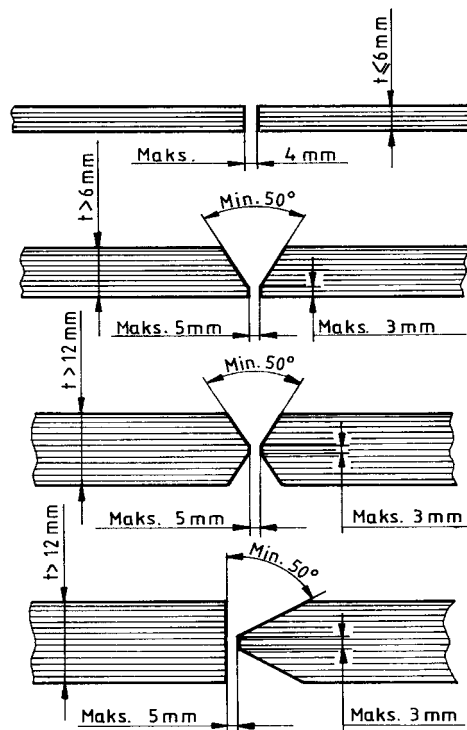
Połączenia otworowe stosowane są tam, gdzie nie ma możliwości zastosowania np. połączenia doczołowego – np. w przypadku spawania poszycia płetwy steru.

Orientacyjny udział długości poszczególnych typów połączeń w konstrukcji typowego kadłuba statku jest następujący:

- teowe – do 80%;
- doczołowe – do 20%;
- pozostałe – do 3%.

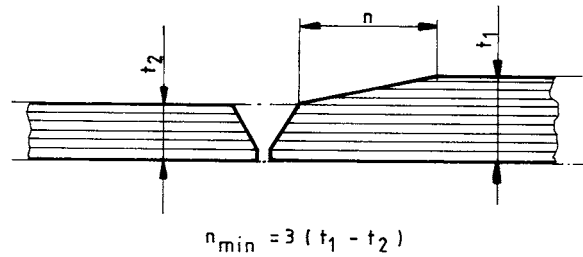
#### Połączenia doczołowe

Spoiny są zawsze ciągłe. Ich grubość wynika z grubości łączonych blach. Dla zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości połączenia wymagane jest odpowiednie przygotowanie krawędzi łączonych blach. Na rys. XII.2 pokazano wymagane przez Przepisy [1] sposoby przygotowania krawędzi blach do spawania w przypadku łączenia blach o równych grubościach.



Rys. XII.2 Przygotowanie krawędzi blach do spawania ręcznego

Jeżeli różnica grubości łączonych blach przekracza 3 mm, to Przepisy [1] dodatkowo wymagają aby zastosować ukosowanie grubszej blach w sposób pokazany na rys. XII.3.



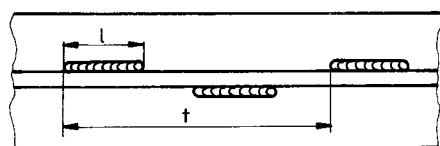
Rys. XII.3 Przygotowanie krawędzi do spawania blach o różnych grubościach

#### Spoiny pachwinowe

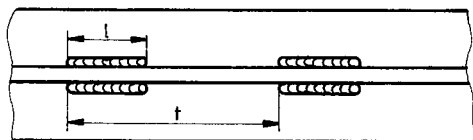
Typy spoin pachwinowych pokazano na rys. XII.4 zaczerpniętym z [1].

Widzimy, że spoiny pachwinowe mogą być ciągłe lub przerywane oraz jednostronne lub obustronne.

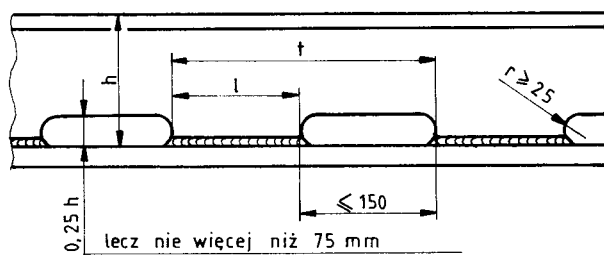
Na rys. XII.4 – f zdefiniowano grubość „a” spoiny pachwinowej.



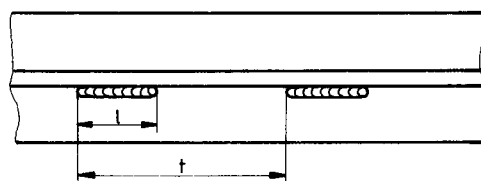
a) spoina przestawna



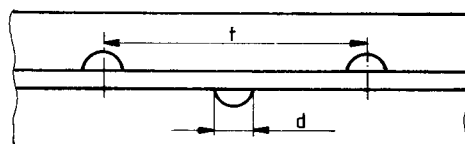
b) spoina symetryczna przerywana



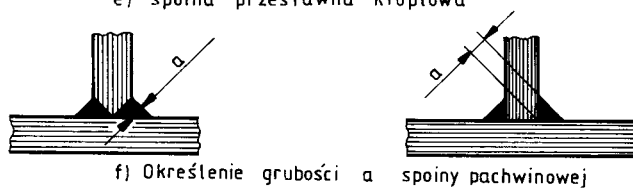
c) spoina z podkrojami



d) spoina jednostronna przerywana



e) spoina przestawna kropłowa



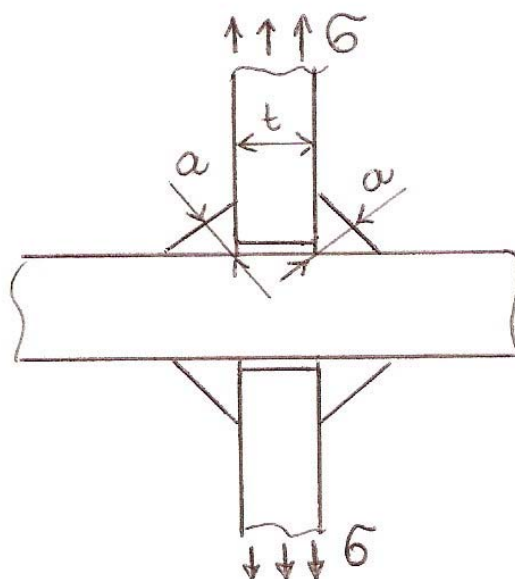
f) Określenie grubości  $a$  spoiny pachwinowej

Rys. XII.4 Typy spoin pachwinowych

Warto wiedzieć, że aby połączenie krzyżowe pokazane na rys. XII.5 miało wytrzymałość nie mniejszą niż wytrzymałość rozciąganej blachy o grubości  $t$ , to grubość spoiny powinna spełniać warunek :

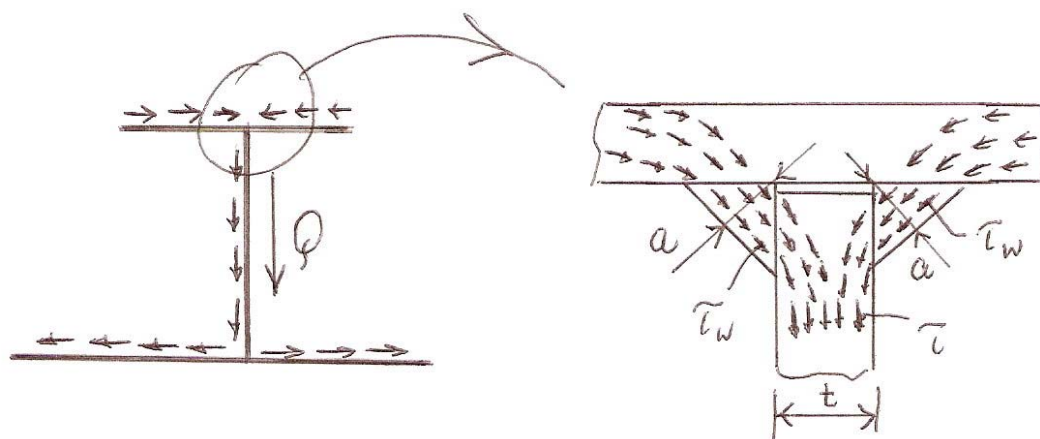
$$a \geq 0,6t$$

(1)



Rys. XII.5 Połączenie krzyżowe blach

Spoiny pachwinowe są powszechnie stosowane do łączenia środników i mocników usztywnień oraz wiązarów. Grubość tych spoin powinna być odpowiednio duża aby przenosiły one naprężenia styczne wynikające ze ścinania usztywnienia lub wiązara siłą  $Q$ . Problem wyjaśnia rys. XII.6.



Rys. XII.6 Naprężenia styczne w spoinie wskutek ścinania usztywnienia lub wiązara

Warunek ciągłości strumienia naprężeń stycznych prowadzi do następującej zależności pomiędzy średnimi naprężeniami stycznymi w spoinach i w środniku usztywnienia lub wiązara ( symbole użyte w poniższym wzorze zdefiniowano na rys. XII.6):

$$\tau_w = \frac{t}{2a} \tau \quad (2)$$

Widzimy, że zastosowanie zbyt cienkich spoin spowoduje ich przeciążenie. Potrzebna jest więc metoda określania odpowiedniej grubości spoin. Metoda taka jest określona w Przepisach [1]. Niżej ( do końca rozdziału XII ) przytoczony jest wprost odpowiedni fragment [1].

#### 4.1.1 Spoiny pachwinowe

**4.1.1.1** Grubość obliczeniowa  $a$  spoin pachwinowych (patrz rys. 4.2.3.1= rys. XII.4)) powinna być nie mniejsza od określonej wg wzoru:

$$a = \alpha \beta s [\text{mm}] \quad , \quad (4.2.3.1)$$

$\alpha$  – współczynnik wytrzymałości spoiny według tabeli 4.2.3.1-1;

$\beta$  – współczynnik dobierany według tabeli 4.2.3.1-2;

$s$  – grubość cieńszego elementu dostawianego, [mm].

Grubość spoiny pachwinowej,  $a$ , powinna być także nie mniejsza niż:

$$\begin{aligned} &2,5 \text{ mm dla } s = 4 \text{ mm}, \\ &3,0 \text{ mm dla } 4 < s \leq 10 \text{ mm}, \\ &3,5 \text{ mm dla } 10 < s \leq 15 \text{ mm}, \\ &0,25s \text{ dla } s > 15 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Typy spoin Rys. 4.2.3.1 pachwinowych

**Tabela 4.2.3.1-1**

Lp.	Określenie połączenia	$\alpha^{1)}$
1	2	3
<b>1.</b>	<b>Konstrukcja dna</b>	
1.1	Wzdłużnik środkowy z poszyciem dna zewnętrznego i wewnętrznego, dno wewnętrzne z poszyciem zewnętrznym	0,40
1.2	Denniki szczelne i części wzdłużników dennych ograniczających zbiorniki	0,35
1.3	Denniki i denne wzdłużniki boczne między sobą oraz z poszyciem dna zewnętrznego i wewnętrznego – w rejonie $0,25 L_0$ od pionu dziobowego oraz w obrębie maszynowni	0,25
1.4	Denniki i denne wzdłużniki boczne między sobą oraz z poszyciem dna zewnętrznego i wewnętrznego – w pozostałych rejonach	0,20
<b>2</b>	<b>Zład burtowy</b>	
2.1	Wręgi (w tym ramowe) i wzdłużniki burtowe z poszyciem zewnętrznym w rejonie $0,25 L_0$ od pionu dziobowego, w zbiornikach, w maszynowni, w obrębie wzmocnień lodowych oraz w rejonie wzmocnień burtowych okrętów cumujących w morzu	0,17
2.2	Jak wyżej – w pozostałych rejonach, poza skrajnikiem rufowym	0,13
2.3	Jak wyżej – w skrajniku rufowym	0,25
2.4	Wzdłużniki burtowe z wręgami ramowymi	0,25
<b>3</b>	<b>Zład pokładu i pokład</b>	
3.1	Pokładniki ramowe i wzdłużniki pokładowe z poszyciem	0,17
3.2	Środniki pokładników ramowych ze wzdłużnikami pokładowymi i z grodziami	0,25
3.3	Pokładniki i usztywnienia	0,15
3.4	Pokładniki wspornikowe z poszyciem	0,35
3.5	Mocnica pokładu wytrzymałościowego z mocnicą burtową	$0,45^{2)}$
3.6	Mocnice innych pokładów i platform z poszyciem zewnętrznym	$0,35^{3)}$
3.7	Zrębnice luków z pokładem w narożach luków	$0,45^{2)}$
3.8	Mocniki zrębnic luków ze środkami zrębnic	0,25
3.9	Ściany zewnętrzne i grodzie zewnętrzne nadbudówek i pokładówek z pokładem górnym	$0,35^{3)}$

3.10	Podpory z pokładami i dnem wewnętrznym, węzłówki podpór z podporami, pokładami, dnem wewnętrznym i innymi wiązaniami	0,35
<b>4.</b>	<b>Grodzie, przegrody</b>	
4.1	Grodzie ograniczające zbiorniki do przewozu zapasów ciekłych lub balastu – wzdłuż obwodu	0,35 <sup>3)</sup>
4.2	Usztywnienia grodzi z poszyciem – poza skrajnikami	0,15
4.3	Jak wyżej – w skrajnikach	0,25
4.4	Ramy pionowe i poziome z poszyciem – poza skrajnikami	0,17
4.5	Jak wyżej – w skrajnikach	0,30 <sup>3)</sup>
4.6	Grodzie poprzeczne z grodziami wzdłużnymi	0,35 <sup>3)</sup>
<b>5</b>	<b>Fundamenty głównych mechanizmów i kotłów oraz uzbrojenia</b>	
5.1	Środniki usztywnień fundamentów z poszyciem zewnętrznym, dnem podwójnym i pokładem	0,35 <sup>2)</sup>
5.2	Główne płyty nośne (mocniki) ze środnikiem	0,45 <sup>2)</sup>
5.3	Węzłówki fundamentów ze środnikami usztywnień, z poszyciem zewnętrznym, z dnem wewnętrznym i z pokładem	0,35 <sup>2)</sup>
5.4	Węzłówki z ich mocnikami	0,25
1	2	3
<b>6</b>	<b>Inne połączenia</b>	
6.2	Węzłówki łączące ze sobą elementy zładu	0,35
6.1	Końce dźwigarów w obrębie 0,15 ich rozpiętości od podparcia	0,25

1) Wszystkie połączenia spawane konstrukcji wodoszczelnych należy wykonywać dwustronną spoiną ciągłą.

2) Należy zastosować spoiny z pełnym przetopem.

3) Wymagana jest dwustronna spoina ciągła.

**Tabela 4.2.3.1-2**

Lp.	Typ spoiny pachwinowej	$\beta$
1	Dwustronna ciągła	1.0
2	Przestawna przerywana, symetryczna przerywana, z podkrojami	$t/l$
3	Jednostronna ciągła	2.0
4	Jednostronna przerywana	$2 t/l$

$t$  – podziałka spoiny,

$l$  – długość spoiny (patrz rys. 4.2.3.1).

**4.1.1.2** W połączeniach silnie obciążonych krawędzie płyt powinny być ukosowane dla zapewnienia spawania z pełnym przetopem lub głębokim wtopem. Pełny przetop należy zastosować na przykład w następujących połączeniach:

- mocnicy pokładu wytrzymałościowego z mocnicą burtową,
- w rejonie fundamentów mechanizmów i uzbrojenia (patrz tabela 4.2.3.1-1),
- zrębnic luków z pokładem w narożach luków,
- wsporników steru i wsporników wału śrubowego z poszyciem kadłuba,
- poszycia płetwy steru z kołnierzem łączącym płetwę steru z trzonem sterowym.

**4.1.1.3** W takich połączeniach, jak:

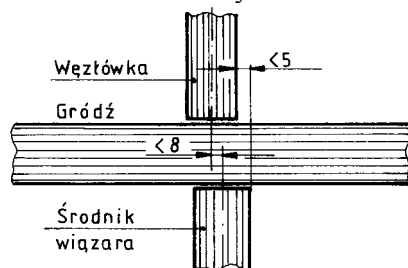
- połączenie grodzi poprzecznej z dnem podwójnym,
- wiązania dna podwójnego pod grodzią,
- połączenie wiązań (w celu uzyskania ich ciągłości) ze środnikami konstrukcji, na której są przerwane,

należy zwiększyć grubość spoiny pachwinowej lub zastosować spoinę z pełnym przetopem.

**4.1.1.4** Grubość spoiny i przekrój połączeń spawanych silnie obciążonych podlega odrębnemu rozpatrzeniu przez PRS.

**4.1.1.5** Elementy konstrukcyjne i części wiązań przerwane na poszyciu lub na krzyżujących się z nimi konstrukcjach powinny znajdować się w jednej płaszczyźnie. Maksymalne przesunięcie płaszczyzn

przerwanych elementów konstrukcyjnych i wiązań nie powinno być większe od połowy ich grubości i nie powinno wynosić więcej niż jest to określone na rys. 4.2.3.5.



Rys. 4.2.3.5 Przesunięcie płaszczyzn

**4.1.1.6** Spoiny obustronnie ciągłe wymagane są:

- dla połączeń wodoszczelnych, olejoshzczelnych, strugoshzczelnych;
- w rejonie  $0,25 L_0$  od pionu dziobowego – do spawania elementów zładu z poszyciem dna;
- w obrębie pasa lodowego okrętów ze wzmocnieniami lodowymi **L1A**, **L1** i **L2** (patrz C-p. 11.1.2.2);
- do spawania zładu burtowego z poszyciem zewnętrznym;
- w rejonie podpór i na końcach elementów;
- w konstrukcjach fundamentowych i podporowych dla urządzeń maszynowych i uzbrojenia;
- dla wszystkich połączeń w skrajniku rufowym;
- dla połączeń w płetwie sterowej, z wyjątkiem przypadków, gdzie konieczne jest zastosowanie spawania otworowego;
- dla połączenia dennego wzdłużnika środkowego z płytą stępki.

**4.1.1.7** Spoiny przerywane mogą być stosowane w połączeniach mniej obciążonych – w przestrzeniach suchych i zbiornikach paliwowych.

**4.1.1.8** W zbiornikach balastowych lub wody słodkiej, w przestrzeniach, gdzie woda może się gromadzić lub skraplać, a także w przestrzeniach pustych, zamkniętych, zagrożonych korozją (np. stery) należy stosować spoiny ciągłe – dla połączeń mocno lub dynamicznie obciążonych, albo spoiny podkrojowe – dla połączeń mniej obciążonych.

**4.1.1.9** Długość  $l$  spoiny przerywanej (patrz rys. 4.2.3.1 = rys. XII.4) powinna być nie mniejsza niż  $15a$  i powinna wynosić co najmniej 50 mm. Odstęp między odcinkami spoin (wynoszący  $t - l$  dla spoin symetrycznych i podkrojowych, a  $\frac{t - 2l}{2}$  dla spoin przestawnych) powinien być nie

większy niż  $25s$  lub 150 mm – w zależności od tego, która z tych wielkości jest mniejsza ( $s$  – grubość cieńszego z łączonych elementów, [mm]). Wysokość podkroju w spoinach podkrojowych powinna być nie większa niż 0,25 wysokości kształtownika i nie większa niż 75 mm. Promień zaokrąglenia naroża podkroju powinien być nie mniejszy niż 25 mm.

**4.1.1.10** W rejonie podpór, na końcach elementów zładu, przy przejściach elementów zładu przez wiązania podpierające je (pokładniki ramowe, wzdłużniki pokładowe, denniki itp.) należy stosować dwustronne spoiny ciągłe. Długość odcinków dwustronnych spoin ciągłych powinna być nie mniejsza od:

- długości węzłówki – w przypadku gdy takową zastosowano;
- podwójnej wysokości elementu – w przypadku braku węzłówek.

**4.1.1.11** Podkroje we wręgach, pokładnikach, usztywnieniach itp. powinny być oddalone od końców tych elementów i podpór (dźwigarów je podpierających) co najmniej na odległość równą podwójnej wysokości kształtownika, a od końców węzłówek – co najmniej na odległość równą połowie wysokości kształtownika.



**4.1.1.12**Przestawne spoiny kropłowe oraz jednostronne spoiny przerywane można stosować w połączeniach drugiej i wyższych kondygnacji nadbudówek oraz pokładówek, a także w połączeniach elementów w zamkniętych rejonach pokładów pierwszej kondygnacji nadbudówek. Jeżeli grubość elementu profilowanego lub płyty jest mniejsza niż 7 mm, to można stosować spoiny kropłowe w połączeniach konstrukcji szybów i ścian w tych rejonach kadłuba, gdzie nie występują obciążenia zmienne lub udarowe albo czynniki wywołujące wzmożoną korozję.

## **XIII. KONSTRUKCJA POSZCZEGÓLNYCH REJONÓW KADŁUBA STATKU**

### **A. WSTĘP**

W niniejszym rozdziale omówiono konstrukcję poszczególnych rejonów kadłuba statku morskiego takich jak: dno, pokłady, burty, itd. Rozważania dotyczą przede wszystkim typowego drobnicowca aczkolwiek są także sporadycznie podawane przykłady konstrukcji pewnych rejonów innych typów statków. W rozdziale XIV omówiono natomiast pobieżnie konstrukcję kadłubów typowych statków śródlądowych.

### **B. DNO PODWÓJNE**

Dno podwójne możliwe do wykonania ma wysokość nie mniejszą niż 650 mm. Zastosowanie dna podwójnego na małych statkach ( o długości do 40 m ) jest więc niemożliwe. Na dużych statkach wysokość dna podwójnego może osiągać nawet wartość rzędu 2,5 m.

#### Wymagania Przepisów [1] dotyczące stosowania dna podwójnego

Dno podwójne jest wymagane w rejonie maszynowni na statkach o długości większej niż 90 m.

Zalecane jest zastosowanie dna podwójnego, o ile jest to możliwe, w rejonie od grodzi skrajnika rufowego do grodz skrajnika dziobowego na statkach o długości większej niż 61 m. Pamiętajmy, że konwencja MARPOL wymusza zastosowanie dna podwójnego na zbiornikowcach.

#### Rola dna podwójnego

Dno podwójne zabezpiecza statek przed zalaniem przestrzeni powyżej dna wewnętrznego w warunkach awaryjnych, gdy dojdzie do zetknięcia dna statku z dnem akwenu lub zderzenia z innym obiektem pływającym.

#### Zalety dna podwójnego

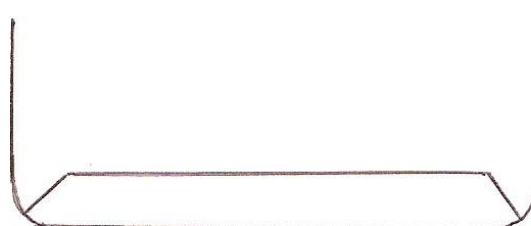
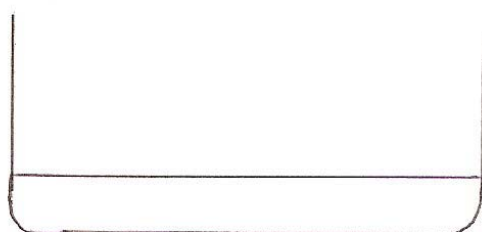
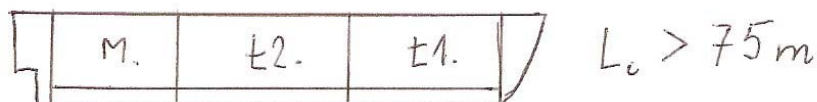
Dzięki zastosowaniu dna podwójnego uzyskuje się gładką powierzchnię podłogi w ładowniach statku.

Dno podwójne zwiększa bezpieczeństwo statku zwiększając jego odporność na zatonięcie w warunkach awaryjnych.

W dnie podwójnym powstaje użyteczna przestrzeń, w której są usytuowane zbiorniki balastu wodnego, paliwa, wody pitnej, itp.

#### Stosowane konfiguracje dna podwójnego

Spotykane w praktyce konfiguracje statku wzdłuż statku i w kierunku poprzecznym pokazano na rys. XIII.1.  $L_c$  oznacza długość całkowitą statku; M – maszynownia; Ł – ładownia.



Rys. XIII.1 Możliwe konfiguracje dna podwójnego

Dno wewnętrzne może być płaskie ( pokazano z lewej strony rys. XII.1) lub z pochyłą płytą krawędziową ( z prawej strony rys. XIII.1).

Dno z pochyłą płytą krawędziową pozwala głębiej usytuować zęzę – bez konieczności wykonywania wnęk w dnie wewnętrznym.

Dno płaskie jest łatwiejsze pod względem technologicznym i zapewnia większą objętość zbiorników w dnie podwójnym.

#### Wymagana pojemność przestrzeni statku w dnie podwójnym.

Potrzebne są odpowiednio duże przestrzenie w statku przeznaczone na zbiorniki paliwa i zbiorniki balastu wodnego.

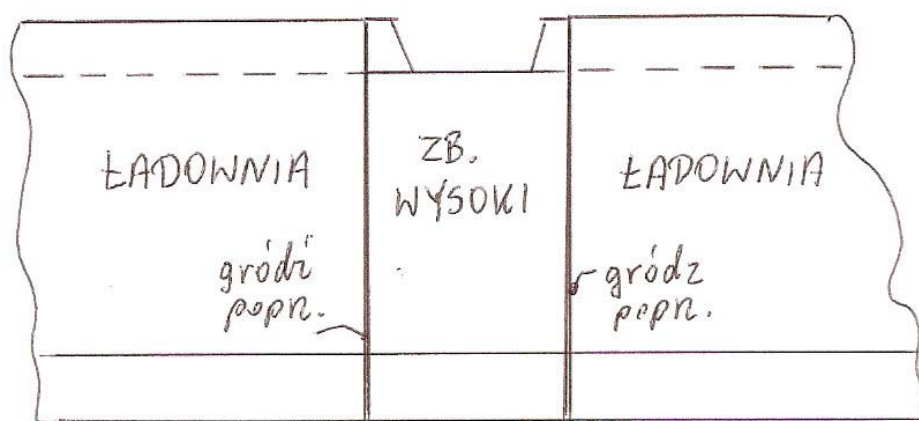
Wymagana pojemność zbiorników paliwa wynika z zakładanego zasięgu statku i mocy silników głównych i pomocniczych.

Wymagana objętość wszelkich zbiorników balastowych na statku ma zapewnić zanurzenie w stanie balastowym o wartości rzędu 40% do 50% zanurzenia przy pełnej nośności.

Wymagana pojemność zbiorników balastowych może okazać się większa niż pojemność w dnie podwójnym o racjonalnej wysokości. W takiej sytuacji projektant statku poszukuje dodatkowych przestrzeni ( poza dnem podwójnym ) na zbiorniki balastowe.

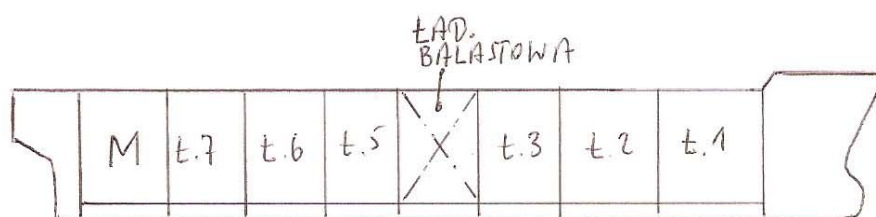
Klasycznie zbiornik balastu jest usytuowany w przestrzeni skrajnika dziobowego.

Dodatkowo mogą być zastosowane tzw. zbiorniki wysokie, najczęściej pomiędzy ładowniami statku ( rys. XIII.2 ). Jest to popularne rozwiązanie stosowane np. na kontenerowcach.



Rys. XIII.2 Zbiornik wysoki

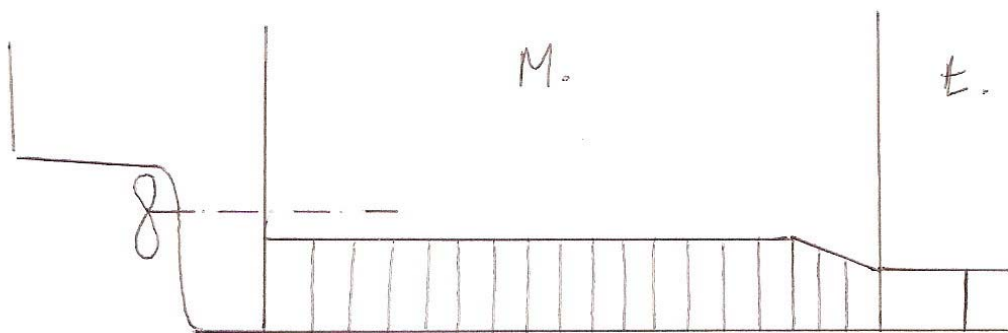
Na masowcach jedna lub dwie ładownie statku pełnią jednocześnie rolę zbiorników balastowych, tzn. ich konstrukcja jest przystosowana do zapewniania ładowni wodą (rys. XIII.3).



Rys. XIII.3 Ładownia balastowa na masowcu

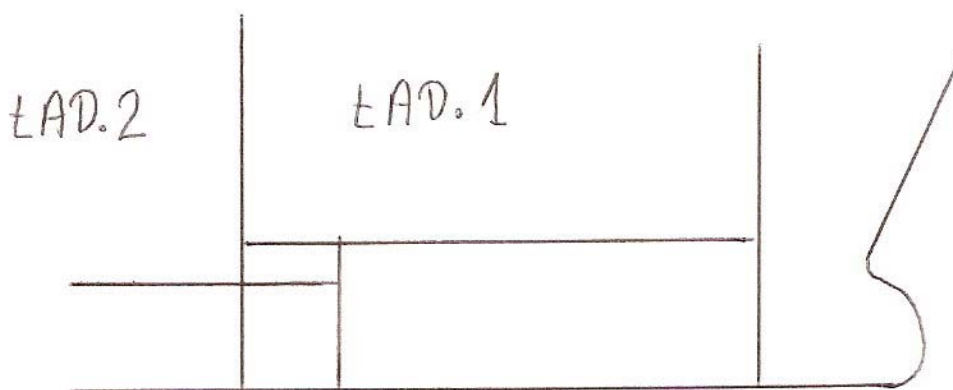
Rolę zbiorników balastowych pełnią także przestrzenie w podwójnych burtach, stosowane na takich statkach jak zbiornikowce, kontenerowce, niektóre masowce, statki wielozadaniowe, itp.

Na niektórych statkach stosowane jest dno podwójne o zmiennej wysokości wzdłuż statku. Popularne rozwiązanie to wyższe dno podwójne w maszynowni (rys. XIII.4). Rozwiązanie takie może być np. wymuszone poprzez konieczność dostosowania poziomu wału silnika do położenia śruby napędowej. Dodatkowo uzyskuje się większą objętość zbiorników paliwa w rejonie maszynowni.



Rys. XIII.4 Podwyższone dno podwójne w maszynowni statku

Wyższe dno podwójne bywa często stosowane w pierwszej ładowni statku (dziobowej), gdzie kształt kadłuba jest smukły (rys. XIII.5). Dno wewnętrzne przy zachowaniu stałej wysokości dna podwójnego byłoby tam bardzo wąskie.



Rys. XIII.5 Podwyższone dno podwójne w ładowni dziobowej

#### Uwagi na temat wytrzymałości dna podwójnego

Dno podwójne, jak każdy płat konstrukcji okrętowej 2-poszyciowej, składa się z poszyc, usztywnień poszyc i wiązarów poprzecznych i wzdłużnych mających formę pionowych ścianek łączących poszycia.

Poszycie dna zewnętrznego jest obciążone ciśnieniem wody zewnętrznej. Od wewnątrz jest obciążone ciśnieniem cieczy w zbiornikach dna podwójnego. Poszycie jest podpierane przez usztywnienia, które opierają się na wiązarach.

Poszycie dna wewnętrznego jest obciążone ciśnieniem ładunku lub balastu, który wypełnia ładownie lub zbiorniki powyżej dna podwójnego. Poszycie to opiera się na usztywnieniach, które z kolei są podpierane przez wiązary.

Wiązary poprzeczne są nazywane dennikami a wzdłużne – wzdłużnikami dna.

Całkowite obciążenie dna podwójnego w przedziale pomiędzy sąsiednimi grodziami poprzecznymi nie jest na ogół zrównoważone, tzn. całkowity napór wody od zewnątrz nie równoważy obciążenia dna wewnętrznego ( np. naciskiem ładunku ). W takiej sytuacji dno

podwójne ugina się pomiędzy sąsiednimi grodziami poprzecznymi i burtami. Wiazary dna podlegają zginaniu.

Przekroje poprzeczne wiazarów mają formę dwuteowników, których półki są utworzone przez pasy współpracujące poszycia. W obszarze pasa współpracującego leżą usztywnienia poszycia równoległe do osi wiazara.

Potrzebne są odpowiednie wartości wskaźnika przekroju wiazarów, które można uzyskać dzięki odpowiednio dużej wysokości dna podwójnego i odpowiednio grubym blachom poszyć. Potrzebne jest także odpowiednio duże pole przekroju poprzecznego wiazarów ( denników i wzdłużników dna ), uzyskiwane dzięki odpowiednio dużej grubości blach, z których są one budowane.

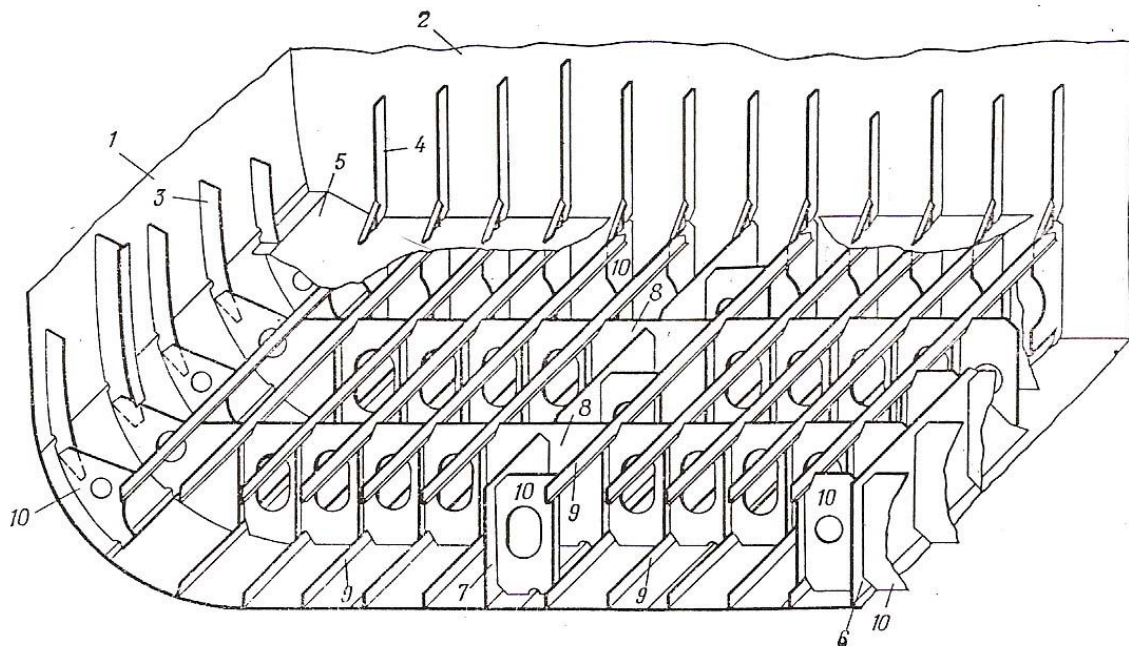
Pamiętajmy, że blachy poszyć dna wewnętrznego i dna zewnętrznego oprócz naprężeń od zginania lokalnego ciśnieniem ładunku lub wody zewnętrznej, przenoszą także naprężenia o charakterze membranowym związane z wyżej omówionym zginaniem płata dna i ze zginaniem ogólnym lub skręcaniem kadłuba.

Podobnie jest z usztywnieniami – podlegają one zginaniu lokalnemu pomiędzy wiazarami i przenoszą naprężenia od zginania płata dna ( leżą w obszarze pasów współpracujących wiazarów ) i od zginania ogólnego lub skręcania kadłuba statku.

### Dno podwójne w układzie wzdłużnym

Dno podwójne usztywnione wzdłużne jest zazwyczaj stosowane na statkach większych, gdyż wzdłużne usztywnienia dna powiększają wartość wskaźnika przekroju poprzecznych przekrojów kadłuba i łatwiej można spełnić kryterium wytrzymałości kadłuba w warunkach zginania ogólnego.

Przykładowe dno podwójne usztywnione wzdłużnie oraz fragment burty i grodzi poprzecznej pokazano na rys. XIII.6.

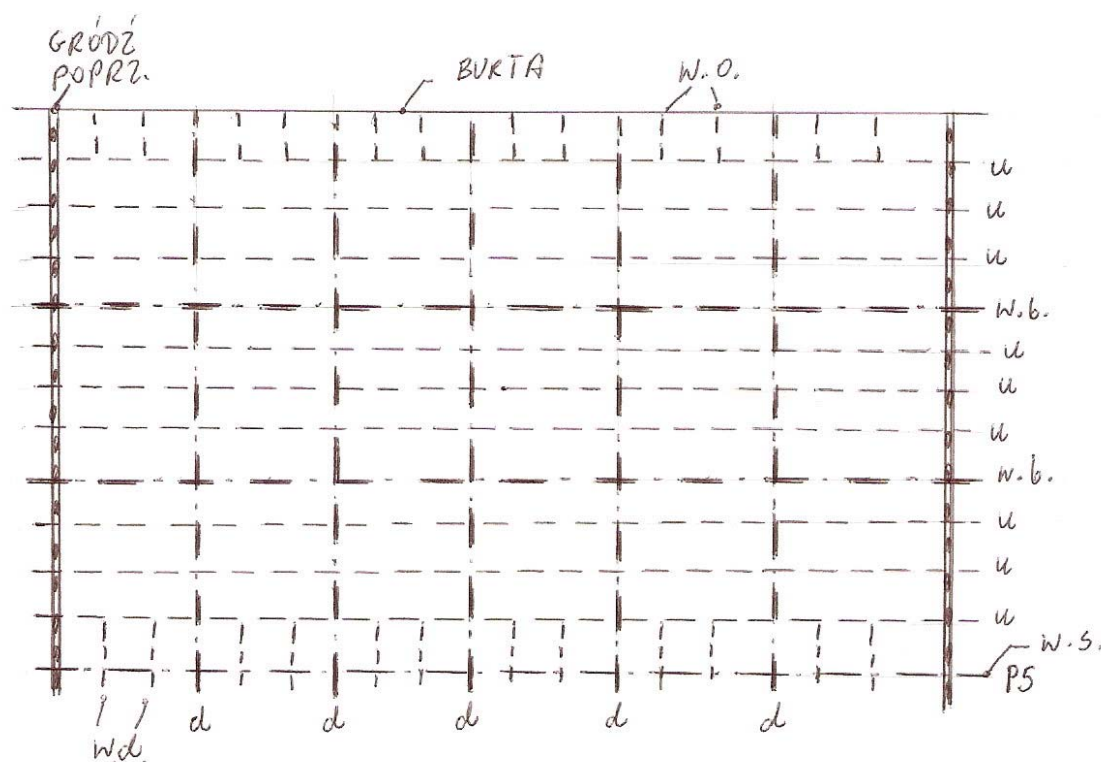


Rys. XIII.6 Przykładowe dno podwójne usztywnione wzdłużnie

Elementy dna ponumerowane na rys. XIII.6 mają nazwy podane niżej.

- 1 – poszycie burty;
- 2 – gródź poprzeczna;
- 3 – wręg;
- 4 – usztywnienie grodzi poprzecznej;
- 5 – płyta poszycia tzw. zbiornika obłowego ( zbiorniki obłowe są typowe dla masowców );
- 6 – denny wzdłużnik środkowy;
- 7 – wzdłużnik boczny;
- 8 – dennik;
- 9 – wzdłużne usztywnienie dna;
- 10 – węzłówki ( dokowe, obłowe, płyty wspornikowe ).

Typową budowę dna podwójnego na długości przedziału pomiędzy sąsiednimi grodziami poprzecznymi pokazano na rys. XIII.7. Jest to widok z góry na dno wewnętrzne. Odstęp usztywnień wzdłużnych jest rzędu 600 mm do 900 mm. Odstęp denników jest rzędu od 2 do 4 odstępów wręgowych ( orientacyjnie od 1200 mm do 3600 mm ).



Rys. XIII.7 Widok z góry na dno wewnętrzne

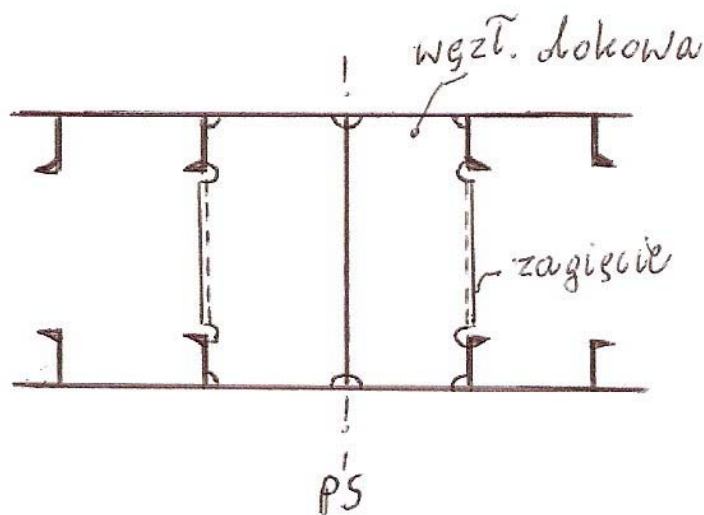
Oznaczenia zastosowane na rys. XIII.7:

- w.o. – węzłówka obłowa;
- u – wzdłużne usztywnienie dna wewnętrznego;
- w.b. – wzdłużnik boczny;
- w.s. – denny wzdłużnik środkowy;
- d – dennik;
- w.d. – węzłówka dokowa.



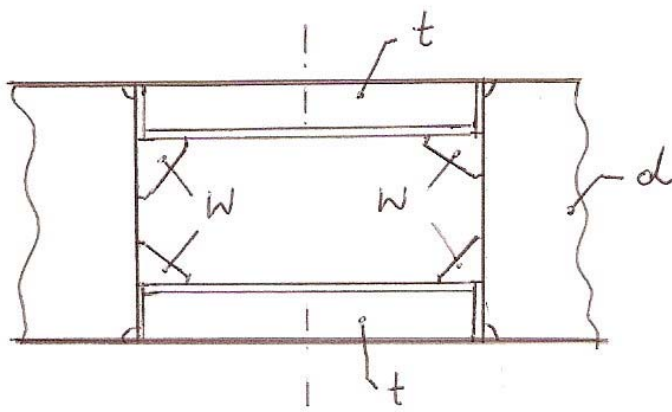
### Denny wzdłużnik środkowy

Denny wzdłużnik środkowy (rys. XIII.8) powinien przebiegać na całej długości dna podwójnego. Jest on wymagany przez Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych, gdyż służy on do podparcia statku na podporach stępkowych doku pływającego podczas dokowania statku. Z tego względu wymagane jest także zastosowanie węzłówek dokowych (rys. XIII.8), które przejmują obciążenie od podpór stępkowych i usztywniają wzdłużnik środkowy zabezpieczając go przed wyboczeniem. Denny wzdłużnik środkowy często pełni także rolę szczelnej ściany zbiorników w dnie podwójnym. Jego grubość, w zależności od wielkości statku, ma orientacyjną wartość od 12 mm do 20 mm.



Rys. XIII.8 Denny wzdłużnik środkowy i węzłówki dokowe

Zamiast klasycznego wzdłużnika środkowego może być zastosowany wzdłużnik tunelowy (rys. XIII.9). Ma on formę tunelu ograniczonego dwoma szczelnymi wzdłużnikami dna rozstawionymi w orientacyjnej odległości rzędu 1,2 m do 1,6 m. Dzięki temu możliwe jest podparcie statku na podporach stępkowych przy dokowaniu. Zaletą wzdłużnika tunelowego jest możliwość wykorzystania jego przestrzeni do prowadzenia rurociągów systemu balastowego statku. Rury i zawory tego systemu są łatwe w montażu i dostępne do przeglądów.



Rys. XIII.9 Wzdłużnik tunelowy

Oznaczenia na rys. XIII.9:

t – dźwigar o przekroju teowym;

d – dennik lub płyta wspornikowa ( połączona z najbliższymi usztywnieniami dna wewnętrznego i zewnętrznego;

w – węzłówka.

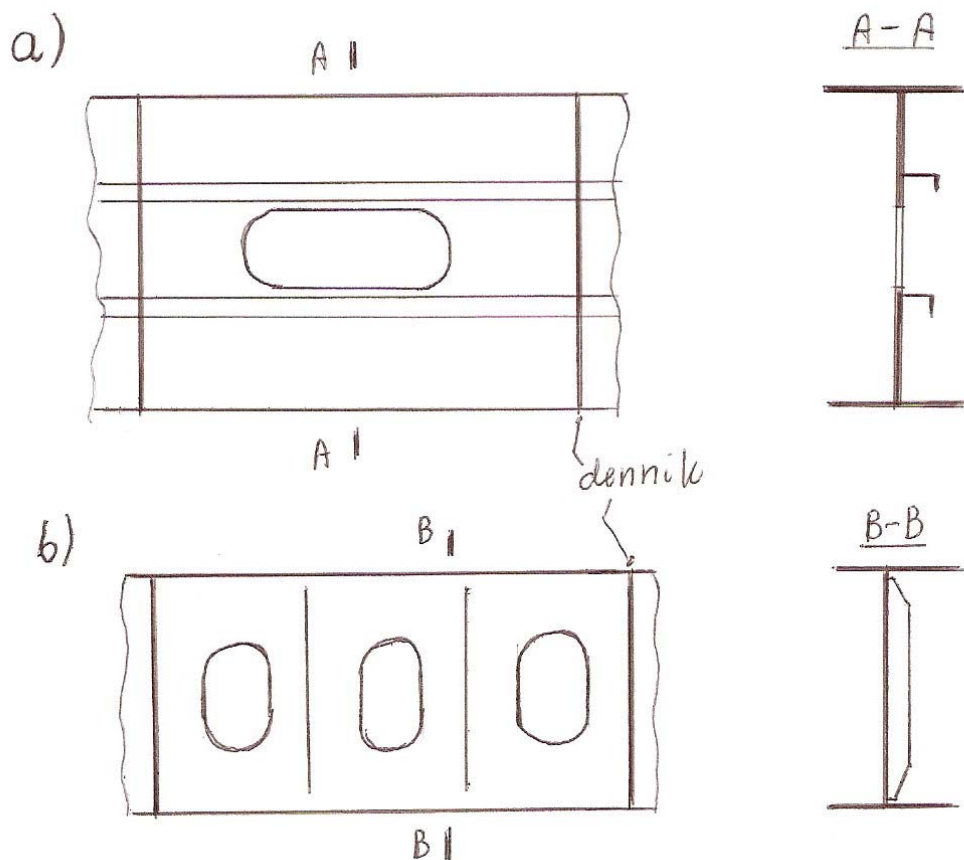
### Wzdłużniki boczne

Zastosowanie wzdłużników bocznych jest wymagane przez Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych. Wg [1] odstęp wzdłużników bocznych lub odległości pomiędzy wzdłużnikiem bocznym a PS lub burtą nie powinna przekraczać 5 m. Oznacza to, że na statku o szerokości od 10 m do 20 m wymagane jest zastosowanie po jednym wzdłużniku bocznym z każdej strony PS.

Wzdłużnik boczny ma formę pionowej płyty o grubości rzędu 10 mm do 20 mm ( w zależności od wielkości statku ), z otworami komunikacyjnymi i usztywnionej wzdłuż statku lub pionowo – aby zapobiec wyboczeniu ( rys. XIII.10 , a i b).

Wzdłużnik boczny może być szczelny – aby stanowić ścianę zbiornika w dnie podwójnym. Wówczas jego usztywnienia mają zapewnić także odpowiednią wytrzymałość płyty wzdłużnika obciążonej z jednej strony ciśnieniem cieczy w zbiorniku.

Wzdłużnik boczny najczęściej jest ciągły a denniki są do niego spawane w formie płyt pomiędzy wzdłużnikiem środkowym a wzdłużnikiem bocznym, itd.



Rys. XIII.10 Wzdłużnik boczny

W rejonie dziobowym wzdłużnik boczny może kończyć się na denniku – ze względu na zmniejszającą się szerokość dna wewnętrznego.

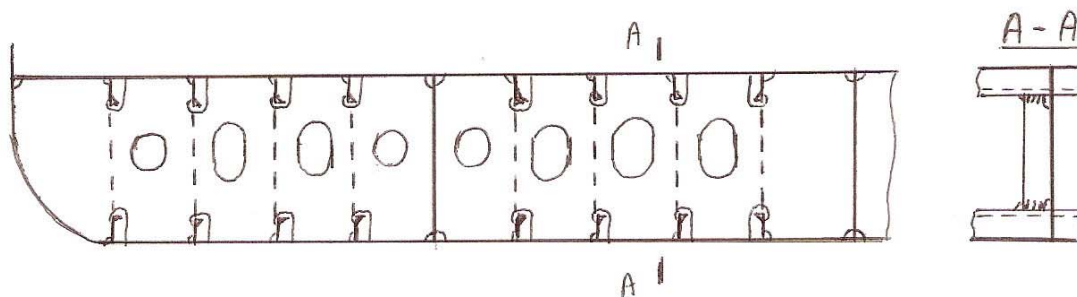
Wzdłużniki boczne „przenoszą” część obciążenia netto ( wypadkowe obciążenie na dno zewnętrzne i dno wewnętrzne ) dna w przedziale pomiędzy grodziami poprzecznymi – na grodzie. Przyczyniają się także do zapewnienia odpowiedniej wartości wskaźnika wytrzymałości przekroju kadłuba, wynikającej z kryterium wytrzymałości w warunkach zginania ogólnego. Pozwalają one także „rozprowadzać” skoncentrowane obciążenia na dno wewnętrzne od ładunku, na kilka denników w pobliżu miejsca takiego obciążenia.

### Denniki

Denniki są stosowane w odstępach od 2 do 4 odstępów wręgowych – w zależności od obciążenia dna wewnętrznego. Podpierają one wzdłużne usztywnienia dna zewnętrznego i dna wewnętrznego. „Przenoszą” one także część obciążenia netto dna do burt lub grodzi wzdłużnych.

Dennik ma formę płyty z otworami komunikacyjnymi, usztywnionej pionowymi płaskownikami w celu zapewnienia odporności na wyboczenie ( rys. XIII.11). Dennik zazwyczaj jest wykonany z blach wstawianych pomiędzy wzdłużniki dna. Grubość blach tworzących dennik, w zależności od wielkości statku i obciążeń na dno wewnętrzne zawiera się orientacyjnie w przedziale od 10 mm do 20 mm.

Dennik może także stanowić ścianę końcową zbiornika w dnie podwójnym. Wówczas otwory dla przejścia wzdłużnych usztywnień dna zewnętrznego i wewnętrznego są odpowiednio zaślepione a usztywnienia pionowe zapewniają odpowiednią wytrzymałość blach obciążonych ciśnieniem cieczy w zbiorniku.

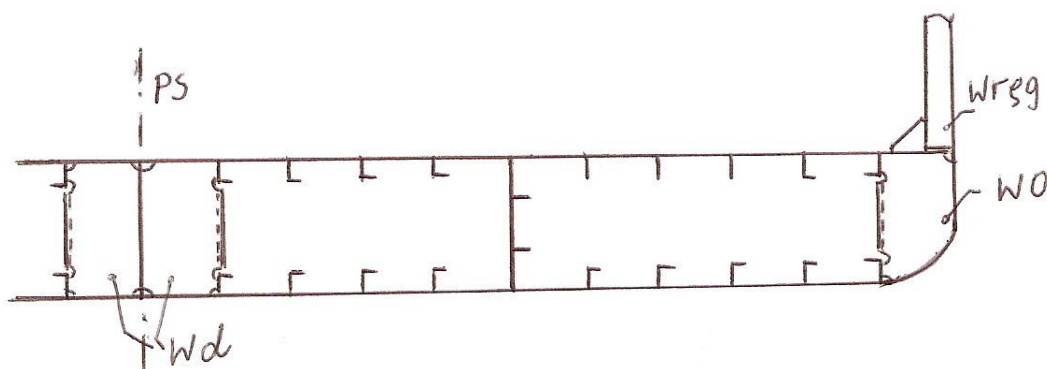


Rys. XIII.11 Konstrukcja dennika

Otwory w dennikach to tzw. otwory komunikacyjne ( umożliwiają przemieszczanie się w obszarze zbiornika przy budowie statku, przeglądach okresowych, itp.) oraz otwory dla przejść usztywnień. Otworów komunikacyjnych nie powinno się wykonywać w rejonach zwiększonych wartości sił ścinających a więc w rejonach burt lub grodzi wzdłużnych, w rejonie podpór postawionych na dnie, itp. Poza obszarem tych zwiększonych sił otwory komunikacyjne są jednocześnie tzw. otworami ulżeniowymi, tzn. pozwalają zmniejszyć ciężar denników tam, gdzie jest to możliwe, przy zachowaniu stałej grubości płyty dennika na całej szerokości dna.

Przekrój poprzeczny przez typowe dno podwójne pomiędzy dennikami, na tzw. wręgu zwykłym, pokazano na rys. XIII.12. Widoczne są takie charakterystyczne elementy konstrukcji jak węzłówki dokowe ( symbol „wd” na rys. XIII.12 ) i węzłówki obłowe ( symbol „wo”). Węzłówki dokowe podpierają płytę dennego wzdłużnika środkowego i przejmują obciążenie od podpór stopkowych przy dokowaniu statku.

Węzłówki obłowe usztywniają obło i zapewniają łatwe i odpowiednio wytrzymałe zamocowanie dolnego końca wręgu.



Rys. XIII.12 Przekrój przez dno na wręgu zwykłym

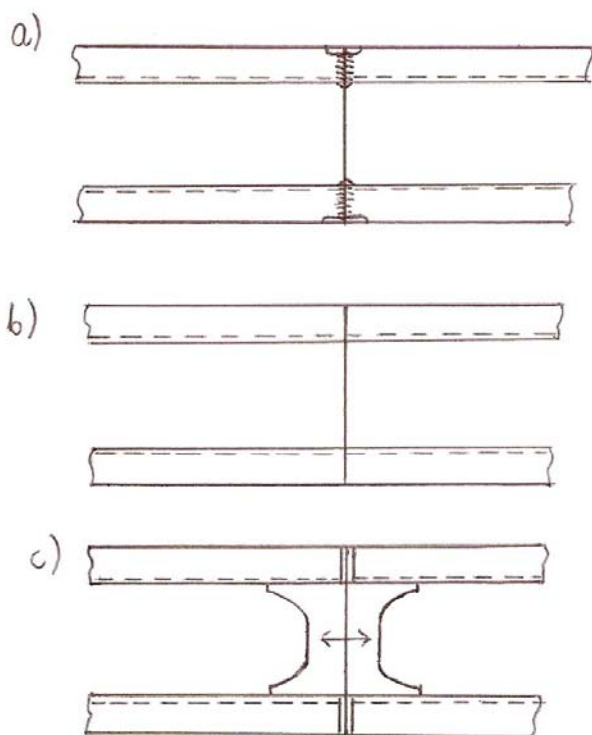
#### Usztywnienia wzdłużne dna i dna wewnętrznego

Usztywnienia dna są także zwane dennymi wręgami wzdłużnymi. Powyższe usztywnienia podpierają płyty poszycia dna i dna wewnętrznego. Opierają się one na dennikach dzięki spawaniu ich środków do płyt denników. Jeden z możliwych wariantów takiego połączenia widać na rys. XIII.11. Inne stosowane warianty są pokazane w dalszej części niniejszego rozdziału.

Wzdłużne usztywnienia dna i dna wewnętrznego przenoszą naprężenia normalne od zginania ogólnego statku. W związku z powyższym, w części środkowej stosunkowo dużego statku powinny one przechodzić przez denniki w sposób ciągły a poszczególne odcinki tych usztywnień powinny być spawane ze sobą doczołowo. Dzięki takim rozwiązaniom uzyskujemy konstrukcję wystarczająco odporną na pękanie zmęczeniowe.

Na statkach mniejszych lub w skrajnych częściach statków większych usztywnienia mogą być przerywane na dennikach.

Możliwe warianty połączeń usztywnień z dennikami pokazano na rys. XIII.13



Rys. XIII.13 Połączenia usztywnień wzdłużnych z dennikami

Wariant „a” z rys. XIII.13 jest dopuszczalny wg [1] na statkach o długości obliczeniowej  $L_0 < 50$  m oraz poza częścią środkową na statkach większych. W tym wariantie końce odcinków usztywnień są spawane spoiną pachwinową do płyt denników.

Wariant „b” (ciągłe przejście usztywnień przez denniki) jest wymagany w środkowej części (tzn. na długości  $0,5 L_0$ ) statków o długości  $L_0 > 150$  m.

Wariant „c” jest dopuszczalny w środkowych częściach statków o długościach  $50 \text{ m} < L_0 < 150 \text{ m}$ . Węzłówka łącząca przęsła usztywnień jest „przewleczona” przez dennik. Fragmenty końcowe usztywnień są spawane spoiną pachwinową do tej węzłówki.

#### Poszycie dna wewnętrznego

Arkusze blach układa się wzdłuż osi statku.

Grubsze od pozostałych arkusze blach są stosowane na:

- płyty krawężnicowe (patrz rys. XIII.1); są one pogrubione o 1 do 2 mm;
- pod lukami w pokładach, na statkach przystosowanych do rozładunku chwytakami.

Na masowcach dostosowanych do naprzemiennego załadowania grubsze blachy poszycia dna wewnętrznego są stosowane w tych ładowniach, które są zapełniane ciężkim ładunkiem masowym w stanach naprzemiennego załadowania. W tych ładowniach jest większe ciśnienie ładunku na dno wewnętrzne niż w ładowniach sąsiednich.

#### Wzmocnienia dna w dziobowej części statku

Przepisy [1] wymagają aby w części dziobowej statku przy obliczaniu wymaganych wymiarów elementów konstrukcji (grubość poszycia, wskaźnik przekroju usztywnień poszycia) uwzględnić ciśnienia udarowe od slemingu. Zazwyczaj konieczne jest zastosowanie grubszego poszycia i mocniejszych usztywnień poszycia niż w pozostałej części kadłuba. Aby uzyskać lżejszą konstrukcję często stosuje się w części dziobowej statku mniejszy odstęp wręgów (mniejszy odstęp denników) niż w pozostałej części kadłuba statku.

#### Przykładowe wymiary elementów konstrukcji dna podwójnego

Niżej podano niektóre parametry konstrukcji dna podwójnego we wzdłużnym systemie wiązań, ze stali o normalnej wytrzymałości, dwóch typowych statków.

*Drobnicowiec o długości ok. 150 m, z 4 ładowniami.*

- wysokość dna podwójnego : 1,4 m;
- odstęp wręgów 750 mm; denniki co 4 odstępy wręgowe;
- poszycie dna :  $t=12$  mm w części środkowej statku;  $t = 16$  do 18 mm w części dziobowej;
- poszycie dna wewnętrznego :  $t = 12$  mm;
- grubość denników i wzdłużników dna :  $t = 11$  do 13 mm;
- wzdłużne usztywnienia dna i dna wewnętrznego : płaskowniki łebkowe 260 x 50 x 10;
- otwory komunikacyjne w dennikach : owalne, o wymiarach 400/700 mm.

*Masowiec wielkości ‘panamax’.*

- wysokość dna podwójnego : 1,9 m;
- odstęp wręgów 850 mm;
- poszycie dna :  $t=12$  mm (w części środkowej statku);
- poszycie dna wewnętrznego :  $t = 24$  mm;
- grubość denników:  $t = 15$  mm.

## Dno podwójne w układzie poprzecznym

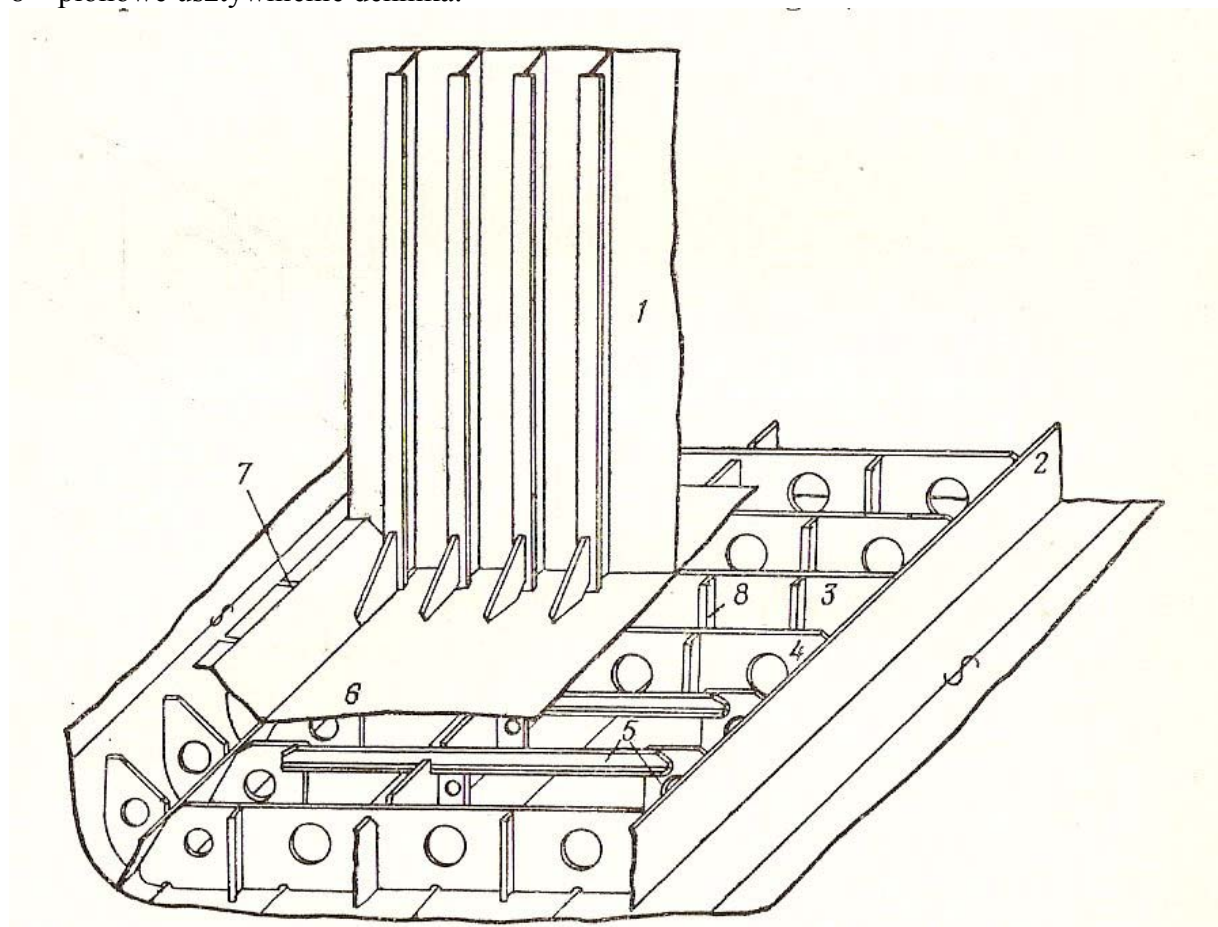
Dno podwójne w układzie poprzecznym zazwyczaj jest stosowane na statkach stosunkowo małych, gdzie problem wytrzymałości kadłuba w warunkach zginania ogólnego ma znaczenie drugorzędne. Wymiary wiązań dobrane wg kryteriów wytrzymałości lokalnej zapewniają w przypadku takich statków nadmiar wytrzymałości ogólnej.

Dno podwójne w układzie poprzecznym jest w przypadku takich statków łatwiejsze do wykonania, gdyż wstawka cylindryczna kadłuba tutaj jest zazwyczaj bardzo krótka lub nie ma jej w ogóle. Zastosowanie wzdłużnych usztywnień dna byłoby trudne do wykonania.

Przykładową konstrukcję dna podwójnego pokazano na rys. XIII.14.

Znaczenie cyfrowych oznaczeń na tym rysunku:

- 1 – gródź poprzeczna;
- 2 – denny wzdłużnik środkowy;
- 3 – dennik szczelny;
- 4 – dennik pełny;
- 5 – dennik otwarty;
- 6 – poszycie dna wewnętrznego;
- 7 – wycięcie dla wręgu;
- 8 – pionowe usztywnienie dennika.



Rys. XIII.14 Przykładowa konstrukcja dna podwójnego w układzie poprzecznym

Typową budowę dna podwójnego na długości przedziału pomiędzy sąsiednimi grodziami poprzecznymi pokazano na rys. XIII.15. Jest to widok z góry na dno wewnętrzne.



Symbole „w.b.” i „w.s.” na rys. XIII.16 mają takie znaczenie jak na rys. XIII.15 a symbol „u” oznacza pionowe usztywnienie płyty dennika pokazane na przekroju A-A, zabezpieczające płytę dennika przed wyboczeniem. Jest to najczęściej płaskownik lub kątownik; nie łączy się on z poszyciem dna i z poszyciem dna wewnętrznego – jego końce są ukosowane. W płycie



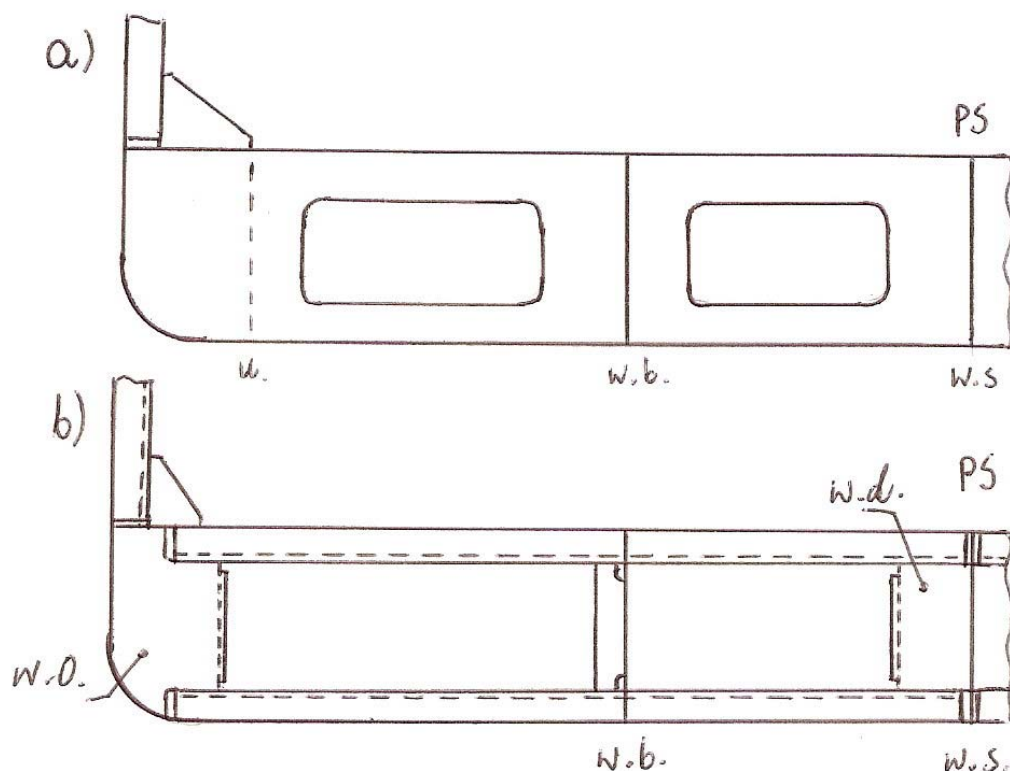
dennika zastosowane są otwory komunikacyjne o wysokości nie przekraczającej 60% wysokości dennika.

Dennikami pełnymi są także denniki szczelne zastosowane na końcach zbiorników w dnie podwójnym. Mają one konstrukcję podobną do pokazanej na rys. XIII.16 ale nie zawierają otworów.

Zadaniem denników otwartych jest podpieranie blach poszycia dna wewnętrznego i dna zewnętrznego. Stosowane są 2 podstawowe typy konstrukcyjne:

- dennik otwarty płytowy ( rys. XIII.17 – a );
- dennik z kształtowników ( rys. XIII.17 – b ).

Symbole na tym rysunku mają takie same znaczenie jak na rys. XIII.16 i XIII.12.



Rys. XIII.17 Konstrukcja denników otwartych

Wycięcia w płytach denników otwartych są tak duże, że na ogół nie ma potrzeby ich usztywniania gdyż pozostałe fragmenty tych płyt przypominają płaskowniki o wymiarach zapewniających odporność na wyboczenie.

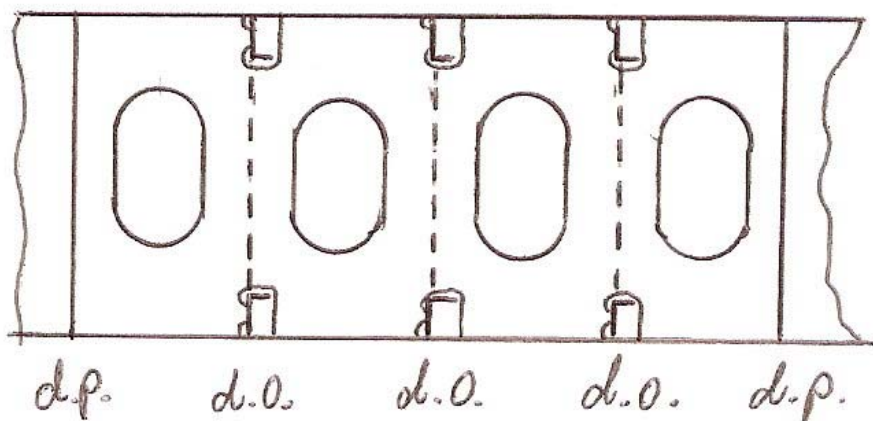
Integralne części denników otwartych z kształtowników ( płaskowników łebkowych lub kątowników ) to węzłówki obłowe i dokowe widoczne na rys. XIII.17 – b. Ich rolę omówiono wcześniej – przy opisie konstrukcji dna w układzie wzdłużnym. Dodatkowo podpierają one usztywnienia dna wewnętrznego i dna zewnętrznego. Swobodne krawędzie węzłówek obłowych i dokowych są zagięte – aby zapobiegać ich wyboczeniu.

Płyta wzdłużnika bocznego jest usztywniona pionowymi płaskownikami.

#### Wzdłużniki dna

Denny wzdłużnik środkowy ma formę płyty pionowej. Płyta ta jest usztywniona przez węzłówki dokowe i płyty denników pełnych.

Wzdłużniki boczne podpierają kształtowniki denników otwartych. Biorą one także udział w przenoszeniu obciążenia netto dna podwójnego na grodzie poprzeczne. Typową budowę fragmentu wzdłużnika takiego wzdłużnika pomiędzy sąsiednimi dennikami pokazano na rys. XIII.18. Znaczenie symboli jest takie jak na rys. XIII.15. Usztywnienia pionowe płyty wzdłużnika zabezpieczają ją przed wyboczeniem. Typowe usztywnienie jest widoczne na rys. XIII.17.



Rys. XIII.18 Konstrukcja wzdłużnika bocznego

#### Dno podwójne w maszynowni statku

Nawet na dużych statkach dno podwójne w maszynowni jest zazwyczaj zbudowane w układzie poprzecznym a wszystkie denniki są pełne. Konstrukcja taka zapewnia dużą sztywność dna i dzięki temu zapobiega drganiom wymuszonym o znacznych amplitudach, powodowanych przez układ napędowy statku.

Niektóre wzdłużniki boczne pełnią tam rolę wzdłużników fundamentowych silnika lub silników głównych.

Więcej informacji podano w rozdziale wykładu poświęconego fundamentom.

### **Szczegóły konstrukcyjne**

W ściankach usztywnień, wiązarów i przegród często trzeba wycinać różne otwory, takie np. jak:

- otwory ulżeniowe i komunikacyjne;
- wycięcia ściekowe i montażowe ( umożliwiają one przepływ cieczy i powietrz w zbiornikach kadłuba statku lub są pomocne w procesie montażu konstrukcji );
- wycięcia dla przejść usztywnień przez środki wiązarów.

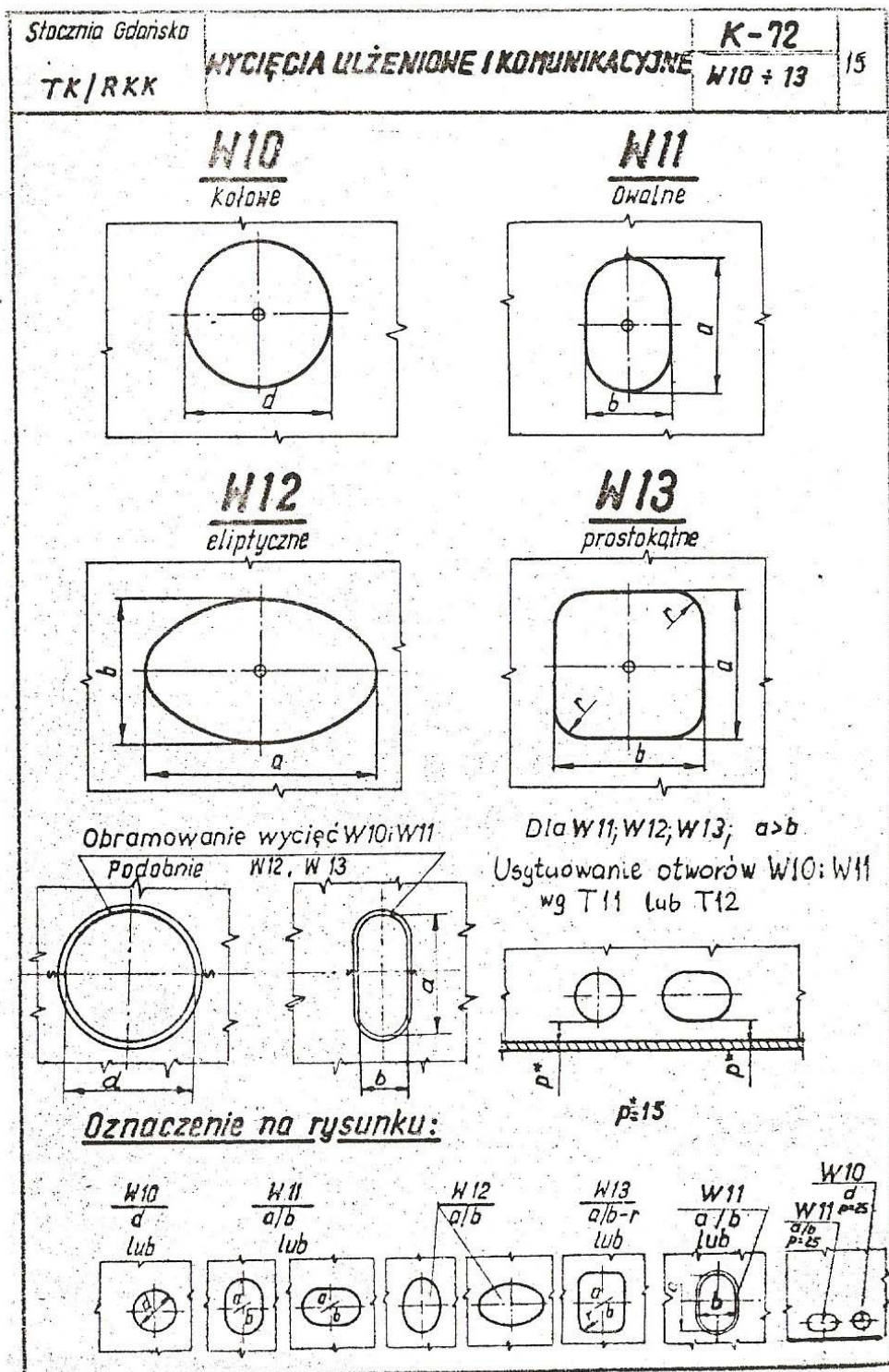
W rejonach takich wycięć występuje koncentracja naprężeń. Może to prowadzić do wystąpienia pęknięć zmęczeniowych. W związku z powyższym należy stosować wymienione wyżej wycięcia o odpowiednich kształtach. Stocznie rozwiązały ten problem w ten sposób, że stosują tylko sprawdzone rozwiązania konstrukcyjne, uporządkowane w wewnętrznych dokumentach jak np. katalog Stoczni Gdańskiej [10]. Stosowanie innych wycięć jest niedozwolone.

Zaletą takiego rozwiązania jest także ułatwienie tworzenia rysunków konstrukcyjnych, gdzie często podaje się tylko nazwę katalogową szczegółu konstrukcji oraz charakterystyczne wymiary a samo wycięcie zaznacza się w sposób uproszczony.

Przykłady różnych wycięć i połączeń usztywnień z wiązarami, zaczerpnięte z [10], podano niżej.

Należy zauważyć, że podane niżej przykłady mają nie tylko zastosowanie do konstrukcji dna podwójnego kadłuba statku. Stosują się one także do omawianych w dalszych rozdziałach konstrukcji pokładów burt, pokładów, itp.

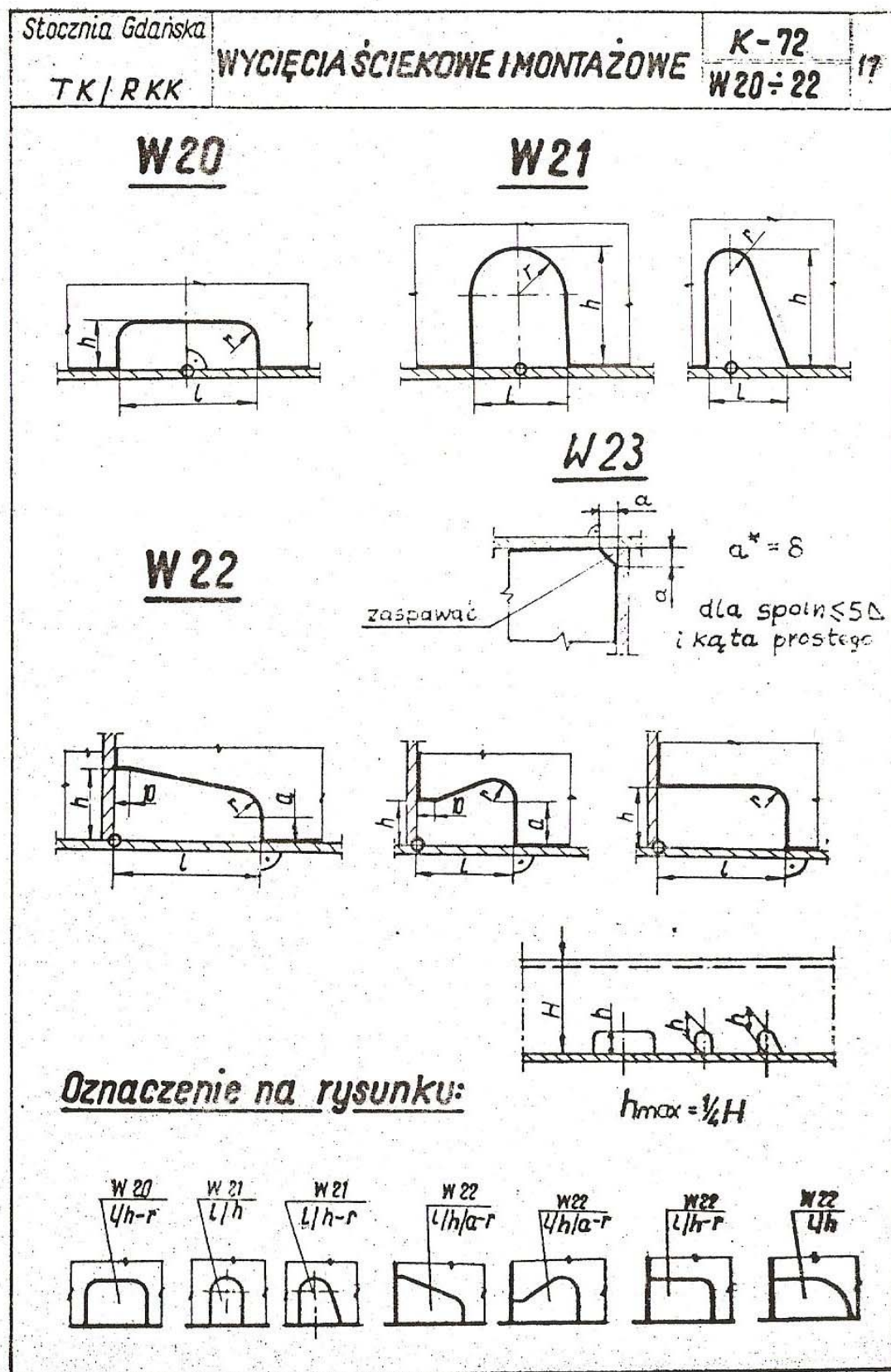
Przykłady wycięć ulżeniowych lub komunikacyjnych wg [10] podano na rys. XIII.19.



Rys. XIII.19 Przykładowe wycięcia ulżeniowe lub komunikacyjne

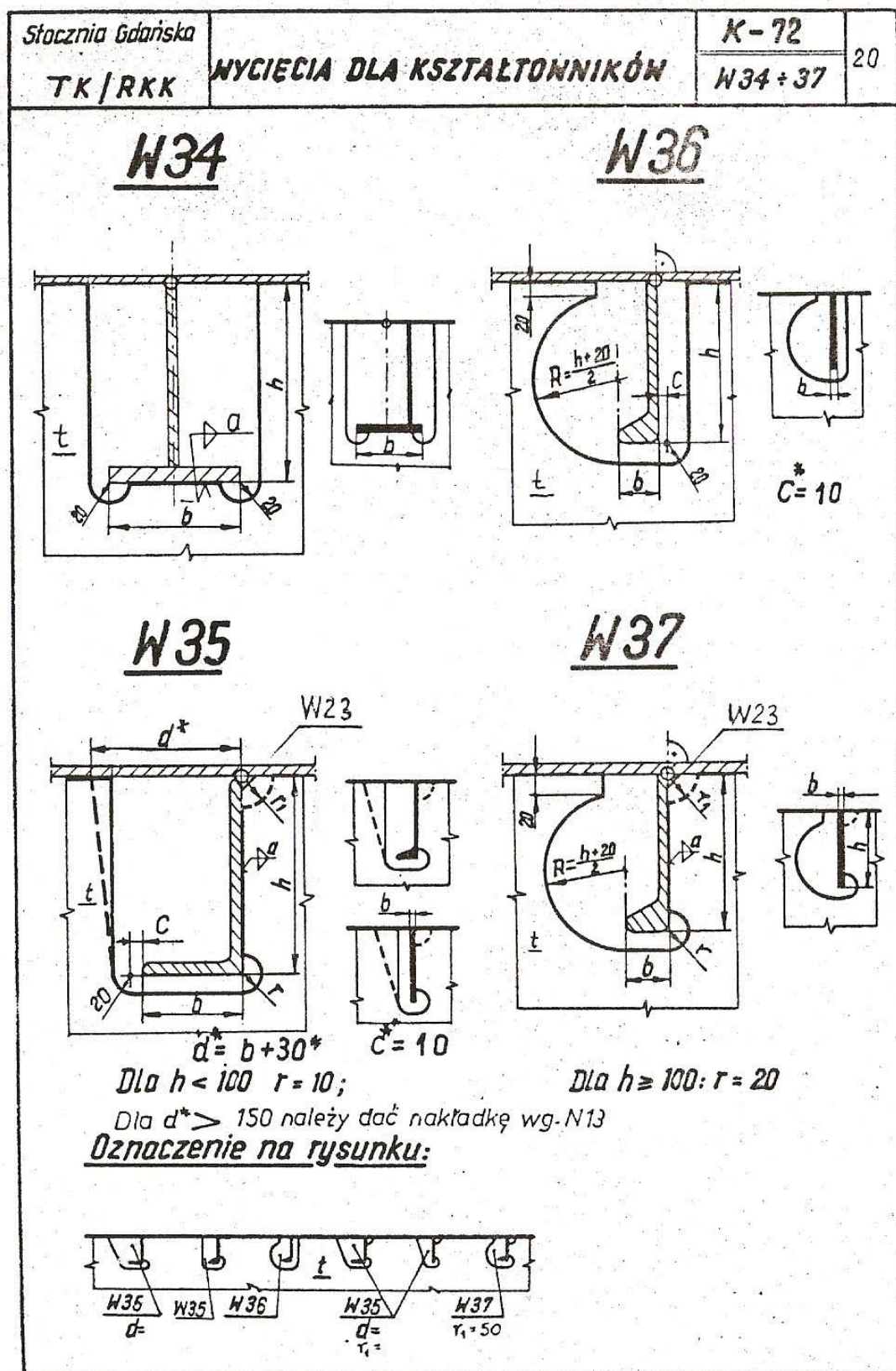


Przykłady wycięć ściekowych i montażowych pokazano na rys. XIII.20.



Rys. XIII.20 Przykładowe wycięcia ściekowe i montażowe

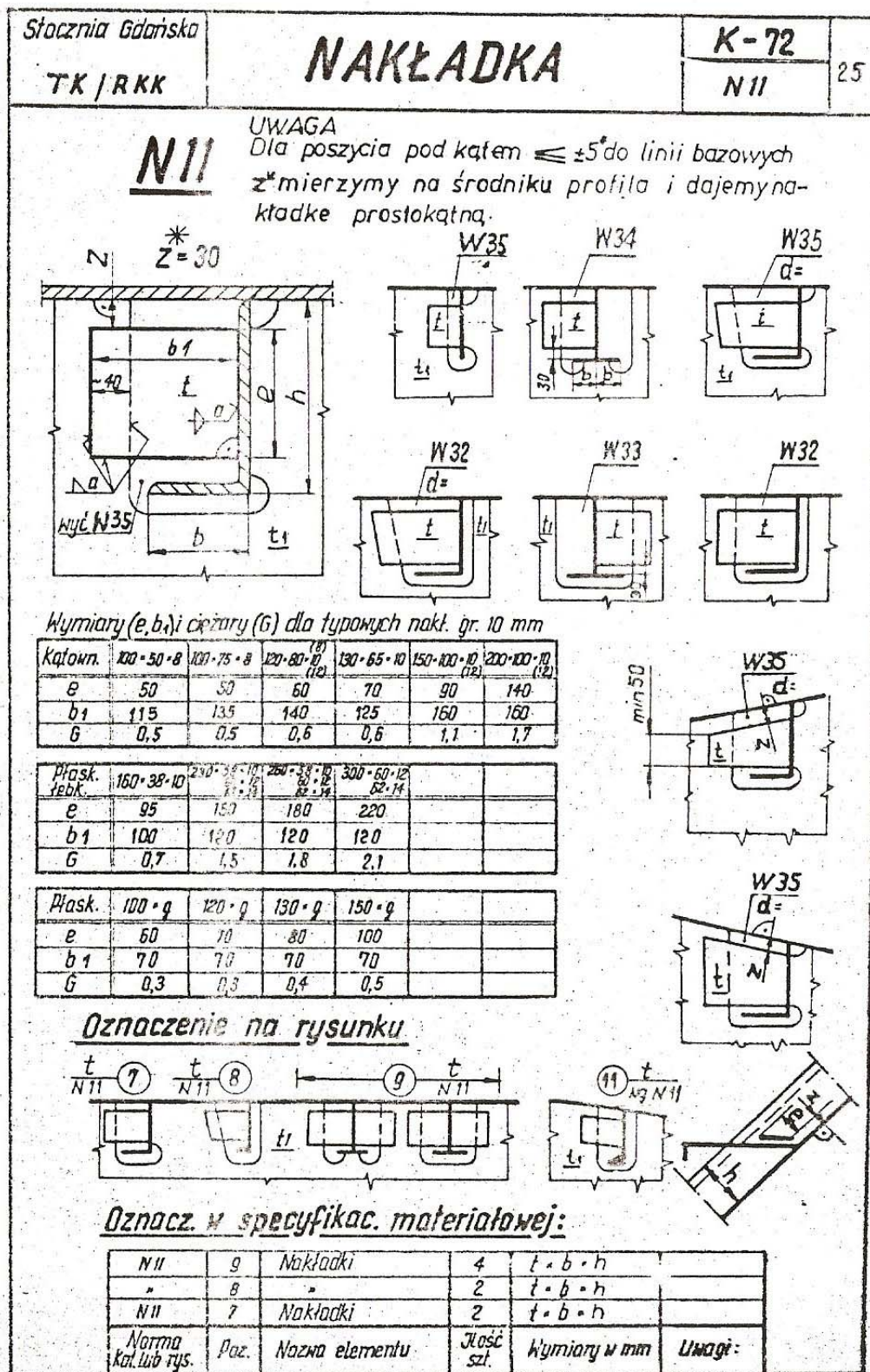
Skromny przykład z licznej w [10] reprezentacji wycięć dla prowadzenia usztywnień np. przez wiązary w [10] pokazano na rys. XIII.21.



Rys. XIII.21 Przykładowe wycięcia dla usztywnień



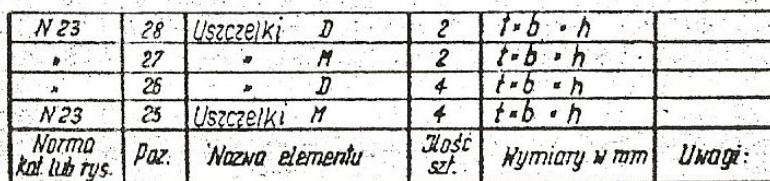
Przykład dostępnych wg [10] płyt nakładkowych, służących do wzmacniania ścianek wiązarów osłabionych wycięciami dla usztywnień lub ułatwiających montaż konstrukcji (możliwy jest brak bezpośredniego połączenia środka usztywnienia ze środkiem wiązara), pokazano na rys. XIII.22.



Rys. XIII.22 Przykładowe połączenia nakładkowe usztywnień z wiązarami



22



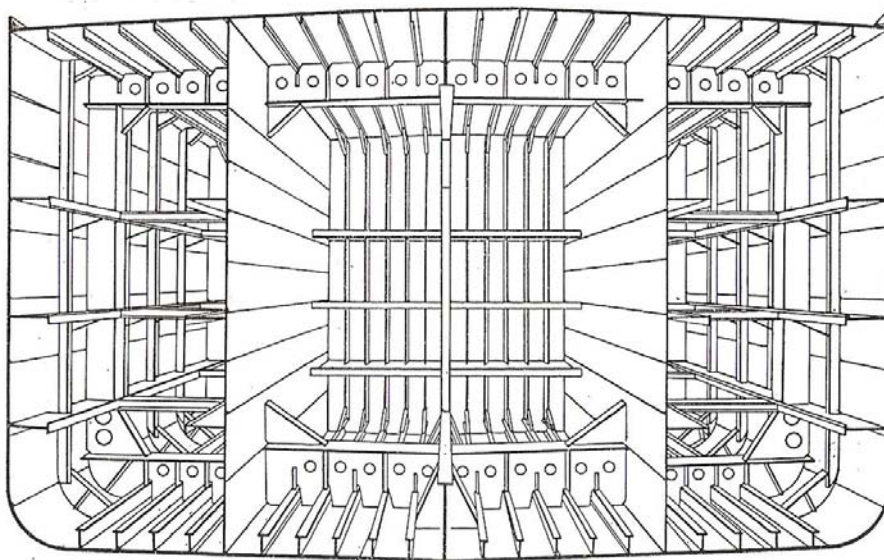
Rys. XIII.23 Przykłady nakładek uszczelniających



## C. DNO POJEDYNCZE

Dno pojedyncze jest najczęściej stosowane na mniejszych statkach, gdzie zastosowanie dna podwójnego nie jest możliwe ( małe statki rybackie, holowniki, barki, itp. ). Spotykane są także sytuacje, gdzie dno pojedyncze jest zastosowane na części długości statku a na pozostałej części – dno podwójne ( patrz rys. XIII.1).

Dno pojedyncze było dawniej powszechnie stosowane na zbiornikowcach – nawet bardzo dużych ( przed wdrożeniem wymagań konwencji MARPOL ). Przykład takiej konstrukcji pokazano na rys. XIII.24.



Rys. XIII.24 Kadłub dużego zbiornikowca z dnem pojedynczym

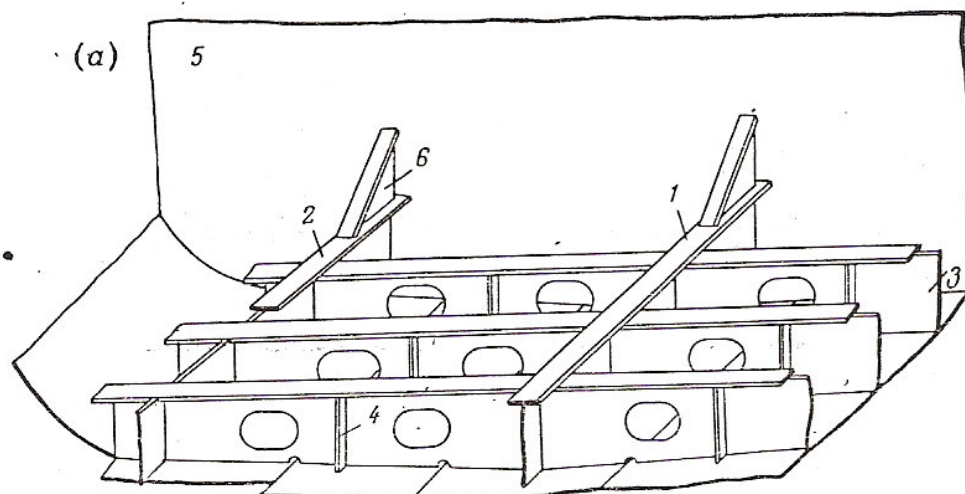
Na małych statkach dno podwójne jest zazwyczaj konstruowane w poprzecznym systemie wiązań, gdyż jest łatwiejsze do wykonania niż dno w układzie wzdłużnym i nie ma na ogół problemów z zapewnieniem odpowiedniej wytrzymałości ogólnej kadłuba.

Fragment takiej konstrukcji pokazano na rys. XIII.25.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – denny wzdłużnik środkowy;
- 2 – wzdłużnik boczny;
- 3 – dennik;
- 4 – usztywnienie środnika dennika;
- 5 – gródź poprzeczna;
- 6 – węzłówka.

Wzdłużniki dna i denniki najczęściej mają formę dźwigarów teowych ale mogą być wykonywane z profili walcowanych.



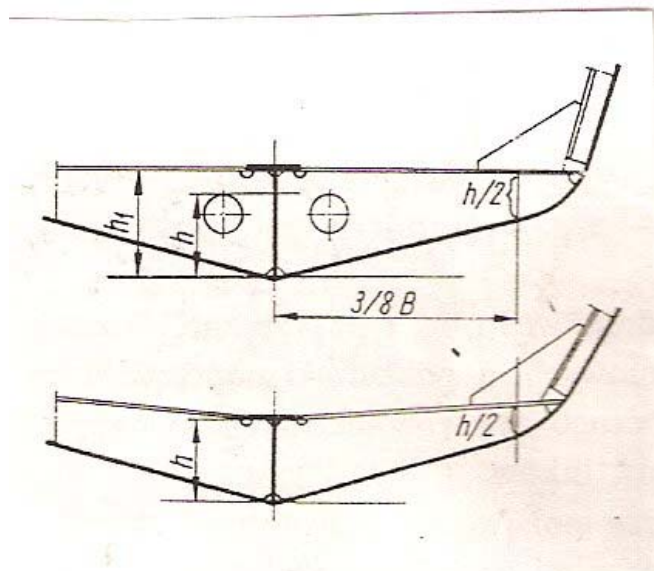
Rys. XIII.25 Fragment typowej konstrukcji dna małego statku

#### Wymiarowanie wiązań dna

Przepisy [1] zawierają wymagania dotyczące minimalnych wartości grubości ścianek wzdłużników dennych i denników oraz ich wskaźników wytrzymałości przekroju. Ostatecznie przyjęte w projekcie wymiary wiązań podlegają zazwyczaj weryfikacji poprzez bezpośrednie obliczenia wytrzymałości z zastosowaniem np. modelu rusztu.

#### Szczegóły konstrukcji

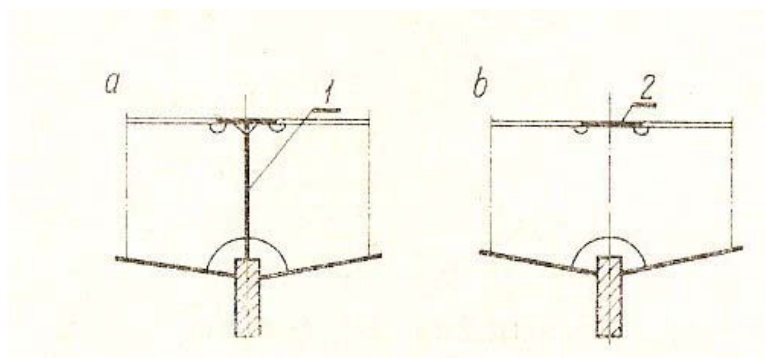
Przykładową konstrukcję dennika na statku z dnem typu „V” oraz sposób połączenia dennika z dennym wzdłużnikiem środkowym i z wręgą pokazano na rys. XIII.26.



Rys. XIII.26 Konstrukcja dennika statku z dnem typu „V”

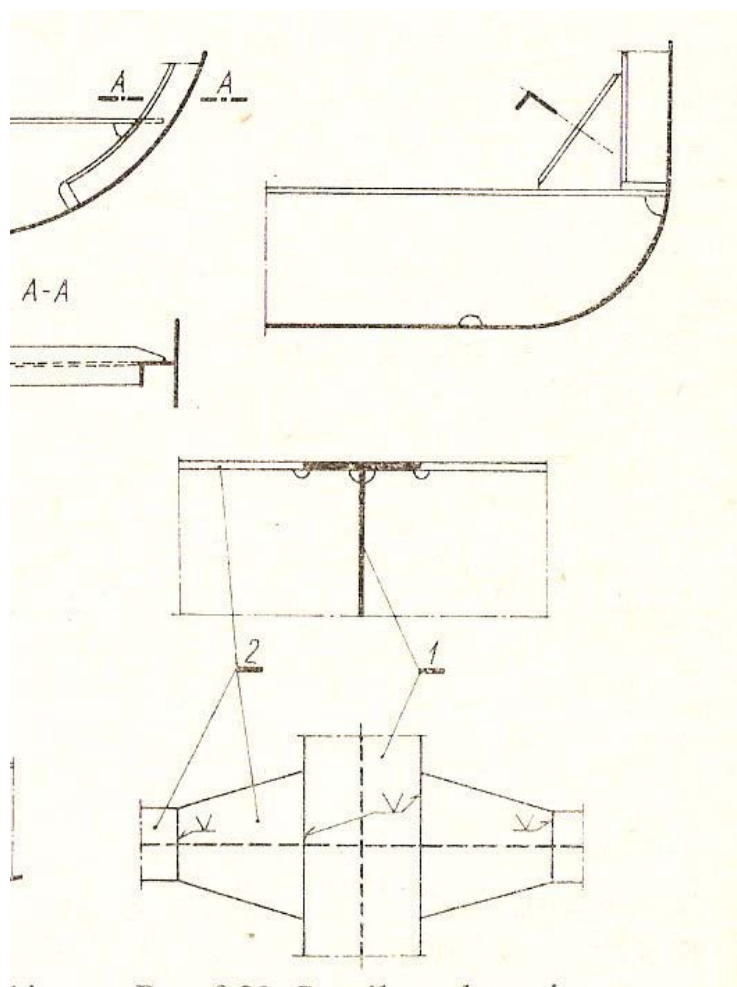
Konstrukcję dna ze stępką belkową pokazano na rys. XIII.27.

Symbol „1” oznacza tam denny wzdłużnik środkowy a „2” – nadstępkę.



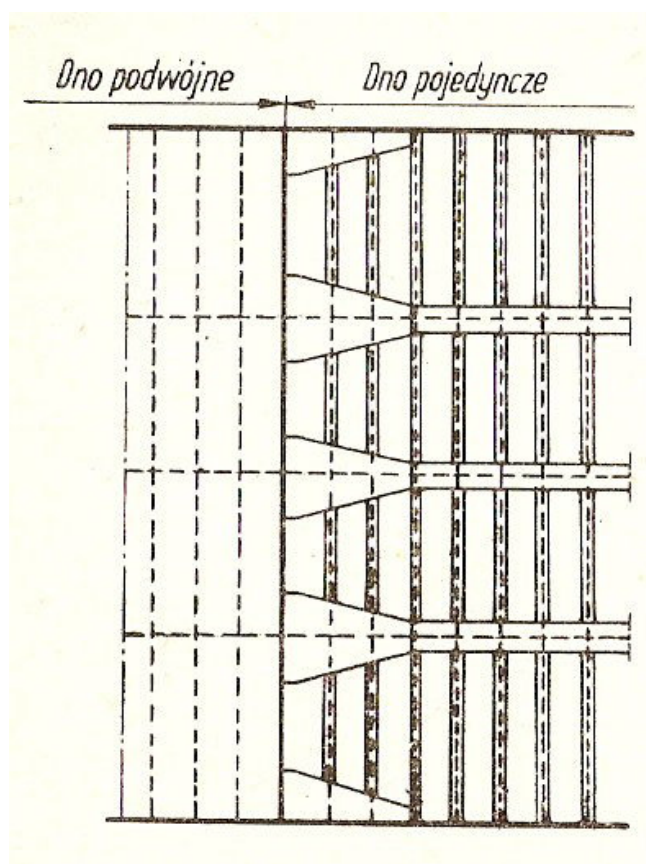
Rys. XIII.27 Dno ze stępką belkową

Możliwe sposoby połączenia dennika z wręgiem burtowym oraz połączenie mocników dennego wzdłużnika środkowego z mocnikiem dennika pokazano na rys. XIII.28.  
„1” oznacza tam denny wzdłużnik środkowy a „2” – dennik.



Rys. XIII.28 Konstrukcja połączenia dennika z wręgiem burtowym i mocników dennego wzdłużnika środkowego z mocnikiem dennika

W konstrukcji gdzie zastosowane jest jednocześnie dno podwójne ( na części długości kadłuba ) i dno pojedyncze ważne jest zapewnienie płynnego przejścia z jednego typu konstrukcji w drugi. Przykład poprawnej konstrukcji ( zapobiegającej nadmiernej koncentracji naprężeń ) pokazano na rys. XIII.29.



Rys. XIII.29 Poprawne przejście od dna podwójnego do dna pojedynczego

## D. POKŁADY

Definicje różnych pokładów podano w rozdziale III.

### Funkcja pokładów

#### ***Pokład górny.***

Stanowi on wodoszczelne zamknięcie kadłuba. Podlega więc obciążeniu lokalnemu od wody przelewającej się po nim w warunkach sztormowych. Może także podlegać obciążeniu od ładunku ( kontenery na kontenerowcach i drobnicowcach, drewno transportowane luzem, nacisk kół pojazdów na statkach Ro – Ro).

#### ***Pokład wytrzymałościowy.***

Wiązania wzdłużne tego pokładu ( jest to najczęściej pokład górny ) mają największy wpływ na wartość wskaźnika wytrzymałości przekroju kadłuba wynikającą z kryterium wytrzymałości w warunkach zginania ogólnego.

#### ***Pokłady dolne.***

Dzielią one przestrzeń kadłuba w kierunku pionowym na funkcjonalne przedziały. Przejmują obciążenie pionowe od ciężaru ładunku lub wyposażenia statku.

#### ***Pokłady nadbudówek i pokładówek.***

Dzielią przestrzeń w nadbudówkach i pokładówkach na funkcjonalne przedziały. Przejmują obciążenie od ciężaru wyposażenia, itp.

Wszystkie pokłady stanowią podparcie dla wiązań burt statku lub ścian nadbudówek/ pokładówek.

Podpierają one np. wręgi burtowe burt usztywnionych pionowo lub wręgi ramowe burt usztywnionych wzdłużnie.

Pokłady przejmują także obciążenie od grodzi poprzecznych lub wzdłużnych statku ( w kierunku poprzecznym do grodzi ), które mogą podlegać obciążeniu od ładunku płynnego lub od wody w warunkach awaryjnego zatopienia wodoszczelnego przedziału kadłuba statku.

### Sposoby zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości pokładów

Lokalne obciążenie pokładów ( ciśnienie wody w sztormie, nacisk ładunku ) powoduje zginania ich wiązań. Wymagane jest odpowiednio grube poszycie, mocne usztywnienia pokładu ( zwane pokładnikami ) i mocne wiązary ( pokładniki ramowe i wzdłużniki pokładowe ).

Zginanie ogólne kadłuba statku w płaszczyznach pionowej i poziomej lub skręcanie kadłuba statku z szerokimi otworami lukowymi wymusza zastosowanie odpowiednio grubego poszycia i masywnych usztywnień wzdłużnych i wiązarów wzdłużnych pokładu wytrzymałościowego. Wiązania te muszą także spełniać kryteria stateczności w warunkach ściskania wywołowanego przez zginanie ogólne.

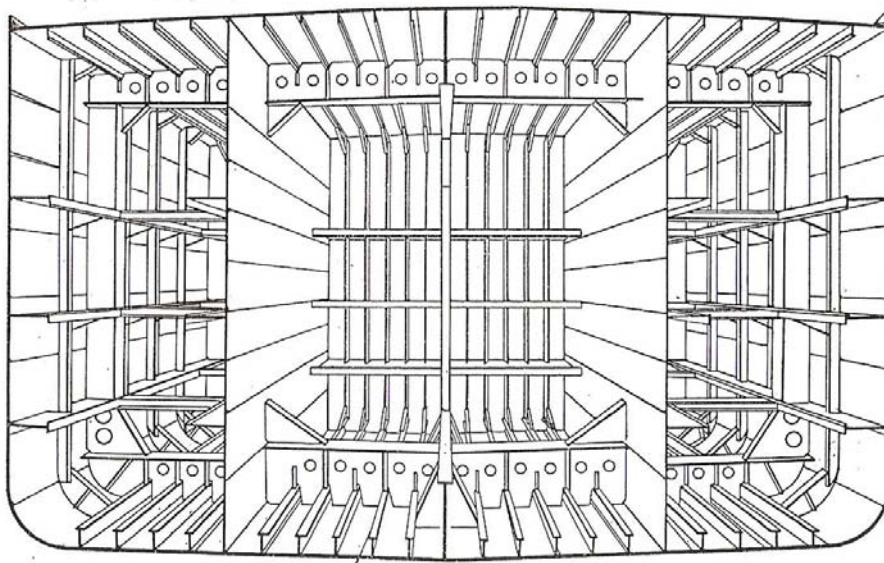


## Pokłady statków bez otworów lukowych

Pokłady tego typu są charakterystyczne dla zbiornikowców i statków typu Ro – Ro. W tych pokładach występują tylko niewielkie otwory wjazdów do zbiorników, otwory na przejścia rur systemu ładunkowego i odpowietrzającego, itp.

Zazwyczaj stosowany jest wzdłużny system usztywnienia.

Klasyczny przykład takiego pokładu to pokład górny zbiornikowca „starego typu” (o pojedynczym kadłubie) pokazany na rys. XIII.30. Widać wzdłużne pokładniki opierające się na pokładnikach ramowych. Pokładniki są połączone z wiązarami w sposób pokazany w p.C – szczegóły konstrukcyjne.



Rys. XIII.30 Zbiornikowiec o pojedynczym kadłubie

W przypadku chemikaliowców pożądanym jest zapewnienie gładkich powierzchni ścian zbiorników ładunkowych. Warunek ten wymusza takie rozwiązanie konstrukcji pokładu górnego, że wzdłużne usztywnienia i pokładniki ramowe są usytuowane na zewnątrz poszycia pokładu. Konstrukcja takiego pokładu będzie więc podobna do pokazanej na rys. XIII.30 po jego obroceniu wokół osi wzdłużnej o 180 stopni.

Pokłady bez otworów lukowych to także pokłady ładunkowe i pokład górny statków Ro – Ro. Mają one regularną budowę, gdzie wzdłużne pokładniki opierają się na regularnie rozstawionych pokładnikach ramowych. Stosowane są także wiązary w formie wzdłużników pokładowych, które „pomagają” rozprowadzić skupione obciążenia od kół pojazdów lub kontenerów na kilka sąsiednich pokładników ramowych.

Charakterystyczny jest względnie mały odstęp pokładników, który może wynosić np. zaledwie 500 mm na statku o długości ok. 150 m. Spowodowane to jest dążeniem do zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości płyt poszycia poddawanych zginaniu znacznym ciśnieniem nacisku kół pojazdów rozłożonych na względnie małych powierzchniach odcisków.

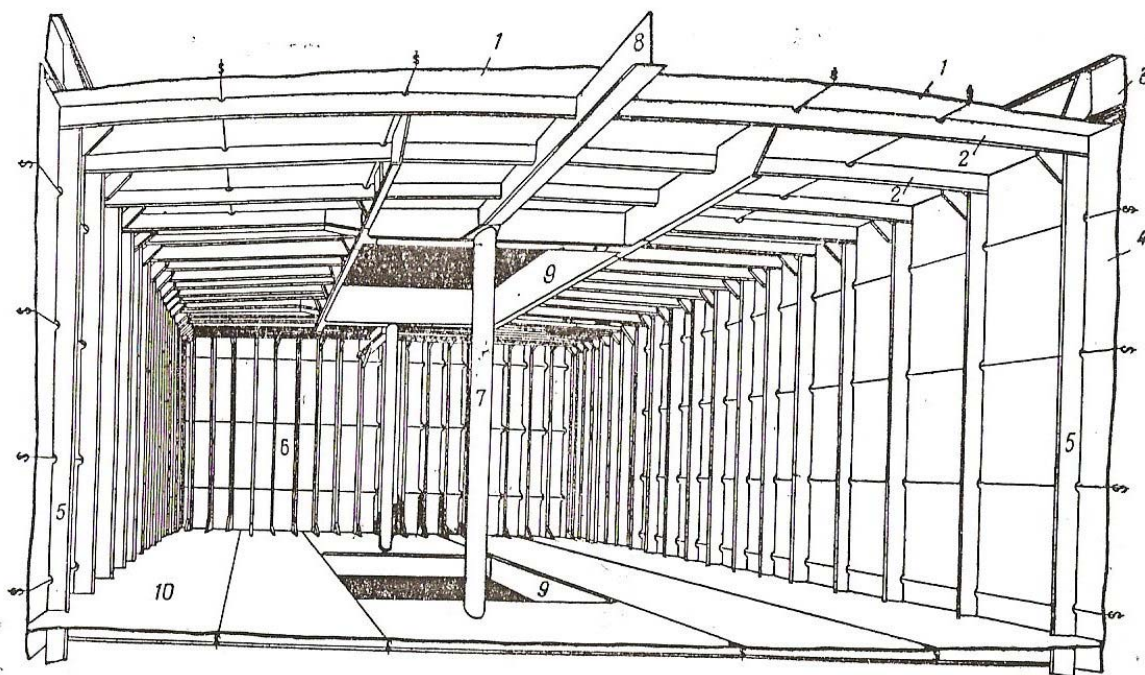
## Pokłady statków z pionowym systemem załadunku

Charakterystyczną cechą takich pokładów są otwory lukowe, których rozmiary mogą być względnie duże. Ich szerokość w skrajnych przypadkach może osiągać nawet 90% szerokości statku. Otwory lukowe są zakrywane pokrywami lukowymi o wytrzymałości odpowiedniej do przeniesienia obciążenia od ładunku lub od wody na pokładzie w warunkach sztormowych.

Fragment konstrukcji pokładu górnego klasycznego drobnicowca jest widoczny na rys. XIII.31.

Znaczenie cyfrowych oznaczeń na tym rysunku:

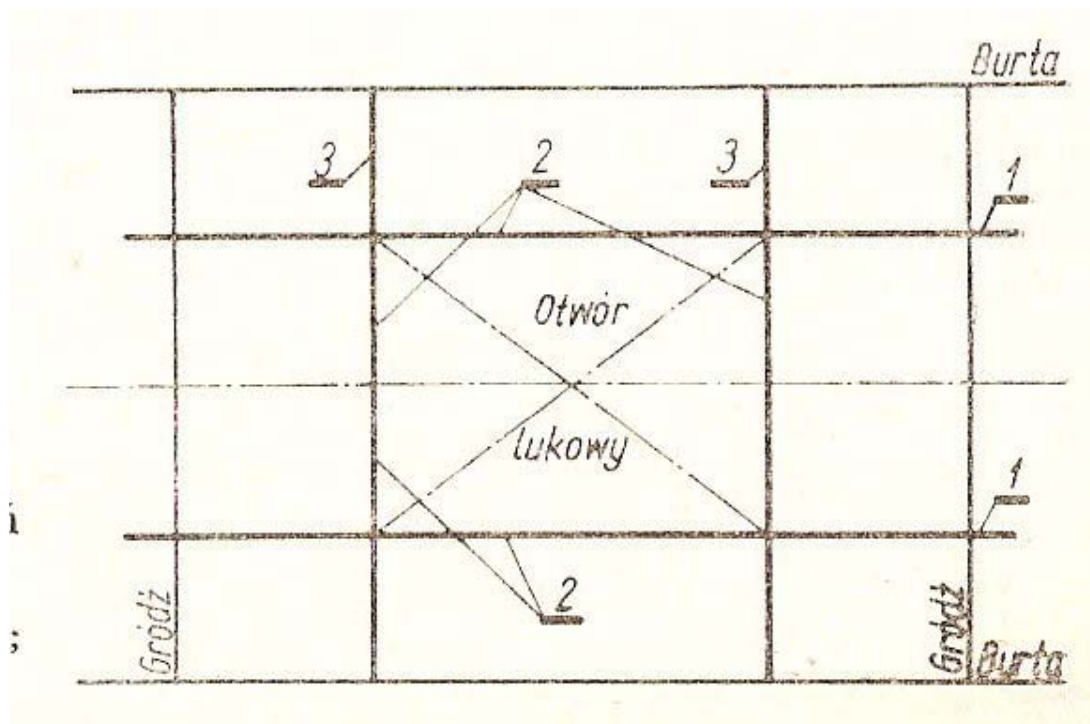
- 1 – poszycie pokładu górnego;
- 2 – pokładnik;
- 3 – nadburcie;
- 4 – poszycie burty;
- 5 – wręg;
- 6 – gródź poprzeczna;
- 7 – podpora pokładowa ( pilers );
- 8 – wzdluznik pokładowy;
- 9 – zrębnica luku ładunkowego;
- 10 – poszycie pokładu dolnego.



Rys. XIII.31 Konstrukcja górnej części kadłuba klasycznego drobnicowca

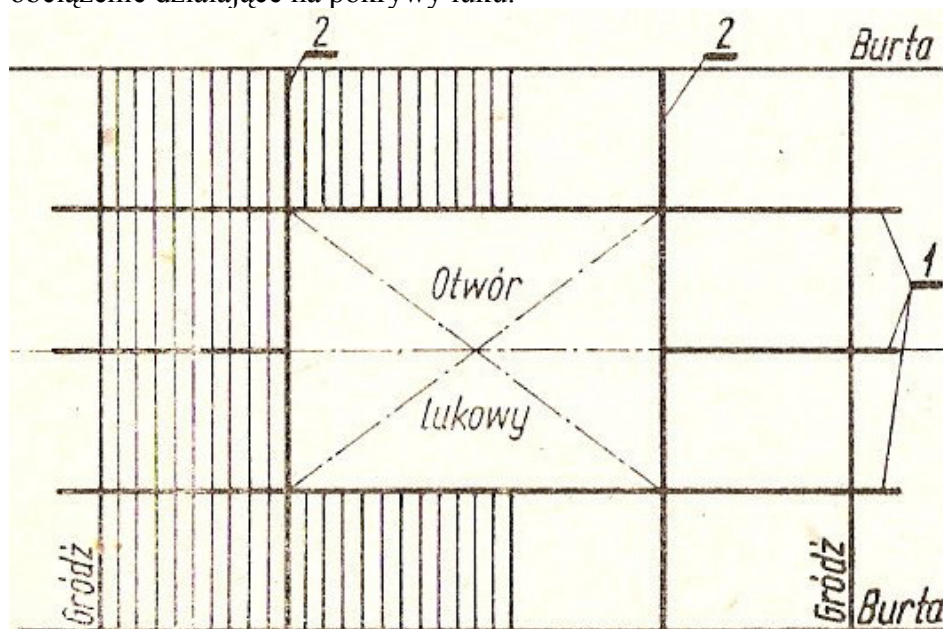
Najbardziej masywne elementy konstrukcji pokładu to wzdluzniki w płaszczyznach wzdluznych krawędzi luku ( poz. 1 na rys. XIII.32 ) i masywne pokładniki ramowe zwane końcowymi pokładnikami luku, w płaszczyznach poprzecznych krawędzi luku ( poz. 3 na rys. XIII.32 ). Cyfrą 2 na rys. XIII.32 oznaczono zręblice luku.





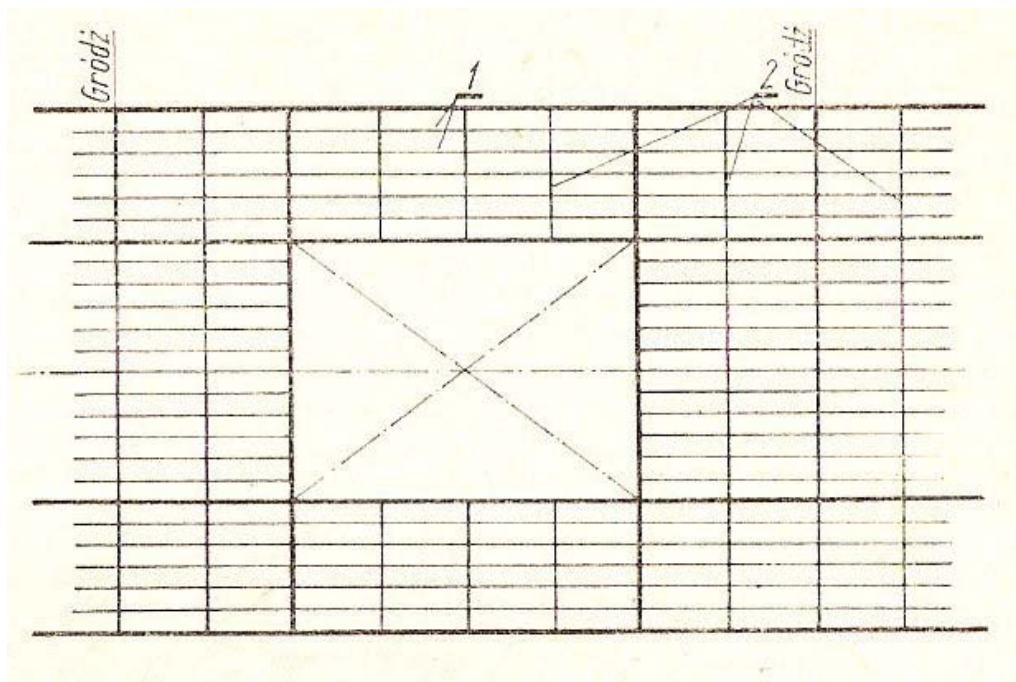
Rys. XIII.32 Główne wiązary pokładu z otworem lukowym

Na niewielkim statku zastosowane będą pokładniki poprzeczne opierające się na elementach „1” i „3” pokazanych na rys. XIII.32. Najczęściej będzie zastosowany dodatkowy wzdłużnik pokładowy w PS statku – patrz rys. XIII.33. Pamiętajmy, że zrzębnice łuku przejmują obciążenie działające na pokrywę łuku.



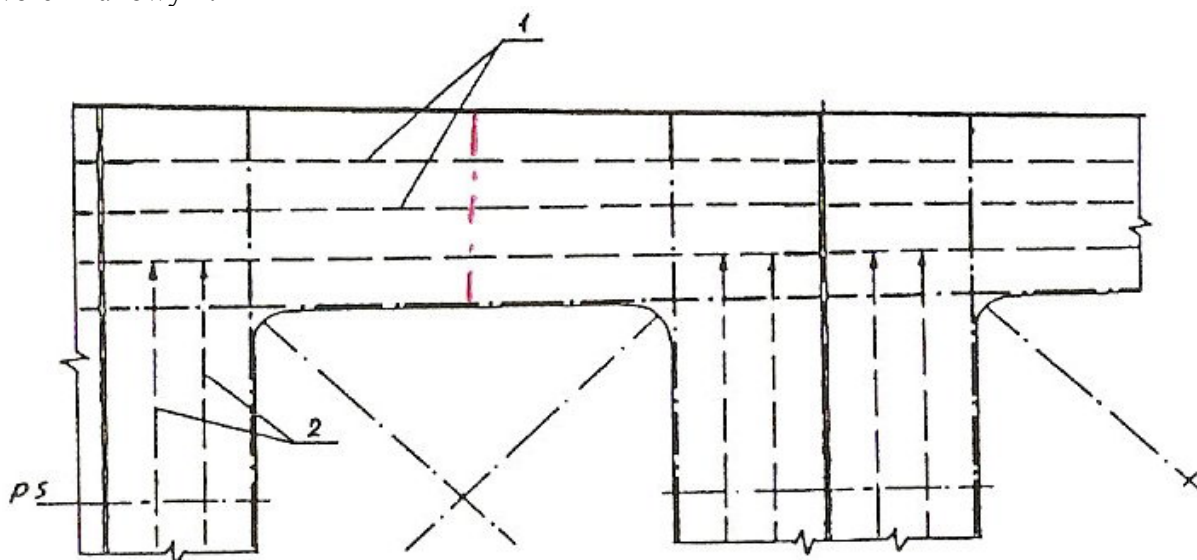
Rys. XIII.33 Poprzeczny system usztywnienia pokładu

Na statkach większych zastosowany będzie wzdłużny system usztywnienia pokładu (rys. XIII.34). Pojawią się dodatkowo pokładniki ramowe (poz. „2”), które będą podpięrały pokładniki wzdłużne.



Rys. XIII.34 Pokład usztywniony wzdłużnie

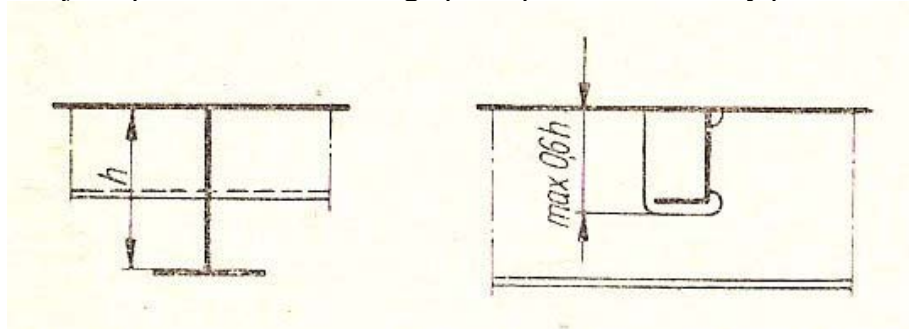
Na dużym statku racjonalne jest zastosowanie wzdłużnego systemu usztywnienia pasów pokładu wytrzymałościowego przy burtach, które przenoszą naprężenia normalne od zginania ogólnego kadłuba i poprzecznego usztywnienia pasów pokładu między sąsiednimi lukami ( nad grodziami poprzecznymi ), zwanych przewiązkami międzylukowymi. W ten sposób powstaje konstrukcja przewiązek odporna na wyboczenie w warunkach ich ściskania wskutek naporu wody na burty statku. Taki system konstrukcyjny pokazano na rys. XIII.35. Symbol „1” oznacza pokładniki wzdłużne a „2” – pokładniki poprzeczne. Zauważmy, że pokładniki poprzeczne muszą być doprowadzone przynajmniej do pierwszego pokładnika wzdłużnego za otworem lukowym.



Rys. XIII.35 Pokład przy burtach usztywniony wzdłużnie, przewiązki usztywnione poprzecznie

### Szczegóły konstrukcji pokładu

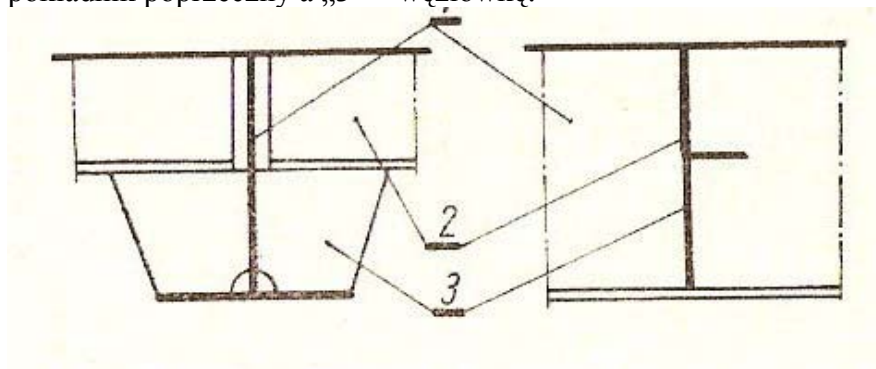
Przejście pokładnika wzdłużnego przez pokładnik ramowy pokazano na rys. XIII.36.



Rys. XIII.36 Przejście pokładnika wzdłużnego przez pokładnik ramowy

W przypadku znacznej wysokości pokładnika ramowego w porównaniu z wysokością pokładnika zastosowana będzie dodatkowo płaskownik w płaszczyźnie środnika pokładnika, spawany do środnika i mocnika wiązara oraz do półki pokładnika.

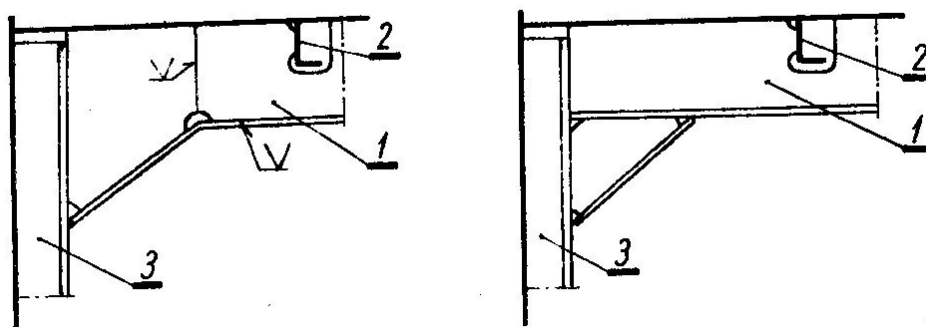
Pokładniki poprzeczne krzyżują się ze wzdłużnikami pokładowymi. Konstrukcja takiego węzła jest analogiczna do pokazanej na rys. XIII.36. Dopuszczalne jest przerwanie pokładników poprzecznych na wzdłużniku pokładowym. Wówczas ten szczegół konstrukcji ma postać pokazaną na rys. XIII.37. Symbol „1” oznacza tam wzdłużnik pokładowy, „2” – pokładnik poprzeczny a „3” – węzłówkę.



Rys. XIII.37 Skrzyżowanie nieciągłego pokładnika z wzdłużnikiem pokładowym

Możliwe konstrukcje połączenia pokładnika ramowego z wręgiem burtowym (burta usztywniona pionowo) pokazano na rys. XIII.38. Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

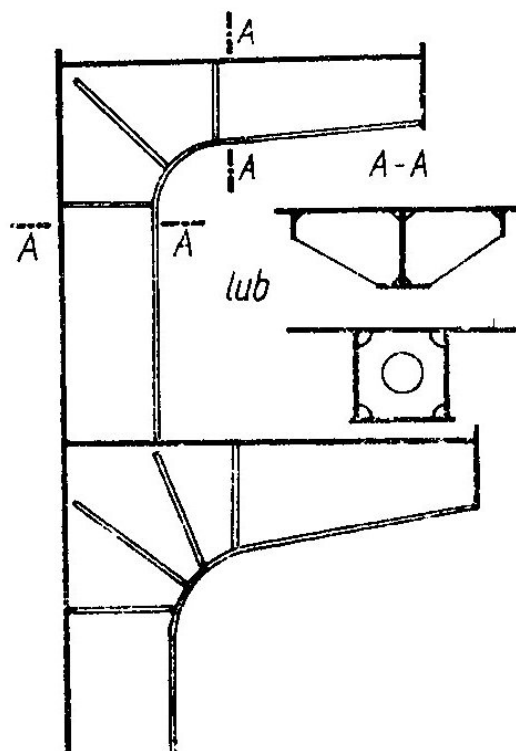
- 1 – pokładnik ramowy;
- 2 – pokładnik wzdłużny;
- 3 – wręg.



Rys. XIII.38 Połączenie pokładnika ramowego z wręgiem burtowym

Przy poprzecznym systemie usztywnienia pokładu konstrukcja połączenia pokładnika z wręgą będzie podobna do pokazanej z prawej strony rys. XIII.38. Pomiedzy wręgą a pokładnikiem będzie jednak szczelina o szerokości rzędu 20 mm a połączenie będzie realizowane tylko przez wężówkę.

Pokładniki ramowe widoczne na rys. XIII.34, w obszarze pomiędzy końcowymi pokładnikami łuku mają najczęściej formę pokładników konsolowych pokazanych na rys. XIII.39. Ich kontynuacją są wręgi ramowe. Te masywne dźwigary pokładu podpierają wzdłużną zrębnicę łuku, która przejmuje obciążenie działające na pokrywę łuku. Dzięki temu wzdłużna zrębica łuku może być względnie delikatna.

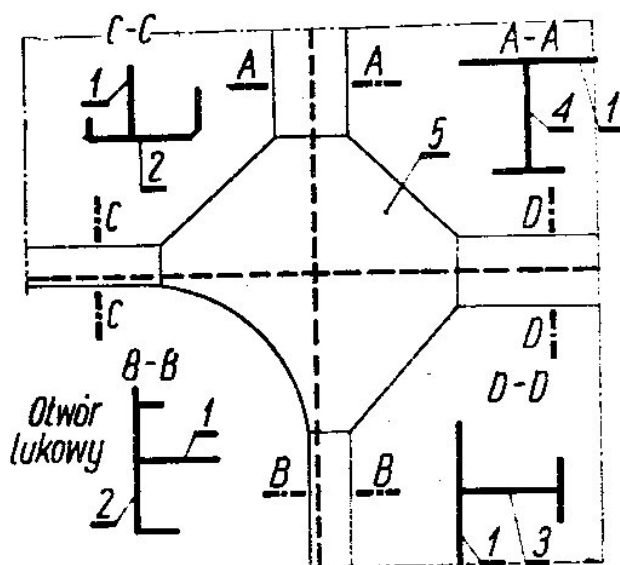


Rys. XIII.39 Konstrukcja pokładnika konsolowego

Ważnym węzłem konstrukcji jest połączenie wzdłużników pokładowych pod wzdłużnymi zrębnicami łuku z końcowymi pokładnikami łuku. Typową konstrukcję pokazano na rys. XIII.40 (widok od dołu). Mocniki dźwigarów są łączone przy pomocy tzw. płyty diamentowej.

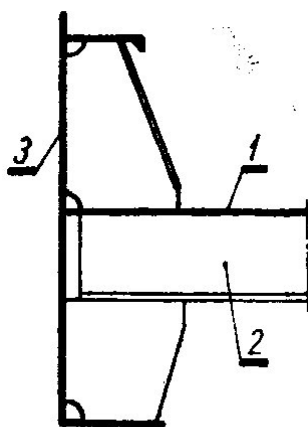
Znaczenie zastosowanych tam symboli literowych:

- 1 – poszycie pokładu;
- 2 – średnik końcowego pokładnika luku lub wzdłużnika pokładowego pod zrębnicą luku;
- 3 – średnik wzdłużnika pokładowego poza otworem lukowym;
- 4 – średnik końcowego pokładnika luku poza otworem lukowym;
- 5 – płyta diamentowa.



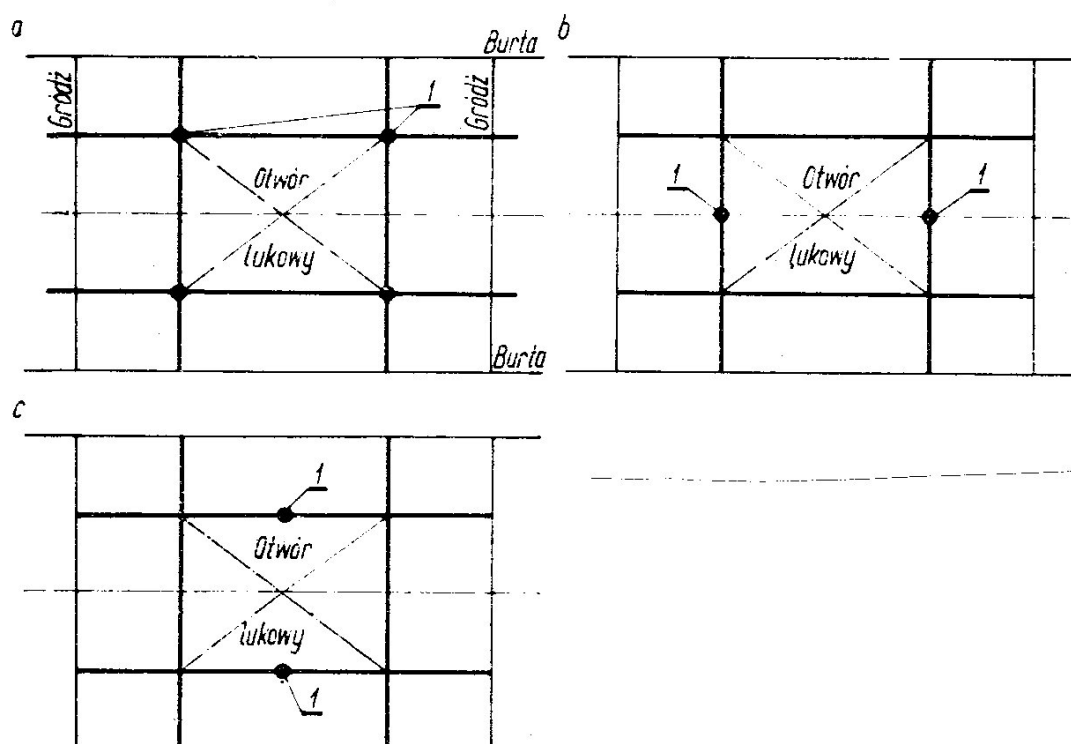
Rys. XIII.40 Konstrukcja połączenia wzdłużnika pokładowego z końcowym pokładnikiem luku w rejonie naroża otworu lukowego

Konstrukcję połączenia pokładnika poprzecznego z wzdłużną zrębnicą luku pokazano na rys. XIII.41. Zrębica (poz. 3) jest wzmocniona płaskownikiem łebkowym w rejonie jej wierzchołka. Służy on do zamocowania zamocowań pokryw luku i ich systemu uszczelniającego do zrębicy. Zrębica jest wzmocniona węzłówkami powyżej pokładu, które zabezpieczają wytrzymałość lokalną i stateczność pionowej płyty zrębicy oraz podpierają pokrywę luku ze względu na obciążenia poprzeczne ( np. od kontenerów przy przechyle statku). Węzłówka poniżej pokładu mocuje pokładnik do wzdłużnika pokładowego.



Rys. XIII.41 Połączenie pokładnika z wzdłużną zrębnicą luku

W sytuacji, gdy szerokość statku i wymiary otworu lukowego osiągają znaczne wartości wymagane będą potężne wzdłużniki pokładowe i końcowe pokładniki luków, usytuowane wzdłuż krawędzi otworu lukowego. Wiązania pokładu podlegają bowiem zginaniu wskutek obciążenia ciężarem ładunku lub wody w warunkach sztormowych. W takiej sytuacji korzystne jest wzmocnienie pokładu poprzez jego podparcie podporami pokładowymi ( pilersami ). Spotykane warianty rozmieszczenia pilersów pokazano na rys. XIII.42.



Rys. XIII.42 Stosowane warianty rozmieszczenia pilersów ( poz. „1”)

Pozytywna rola pilersów polega na tym, że stanowiąc praktycznie nieprzesuwne w kierunku pionowym podpory, zmniejszają one długości przęseł zginanych belek ( wzdłużników pokładowych i końcowych pokładników luku ). W ten sposób zmniejsza się wymagana wartość wskaźnika wytrzymałości ich przekroju poprzecznego i wystarczające są ich względnie małe wymiary. Gdyby nie stosować pilersów to wymienione wyżej wiązary opierałyby się tylko na burtach i grodziach poprzecznych.

Wada pilersów polega na tym, że utrudniają one operacje ładunkowe. Są one jednak popularne w konstrukcjach klasycznych drobnicowców i statków typu Ro – Ro.

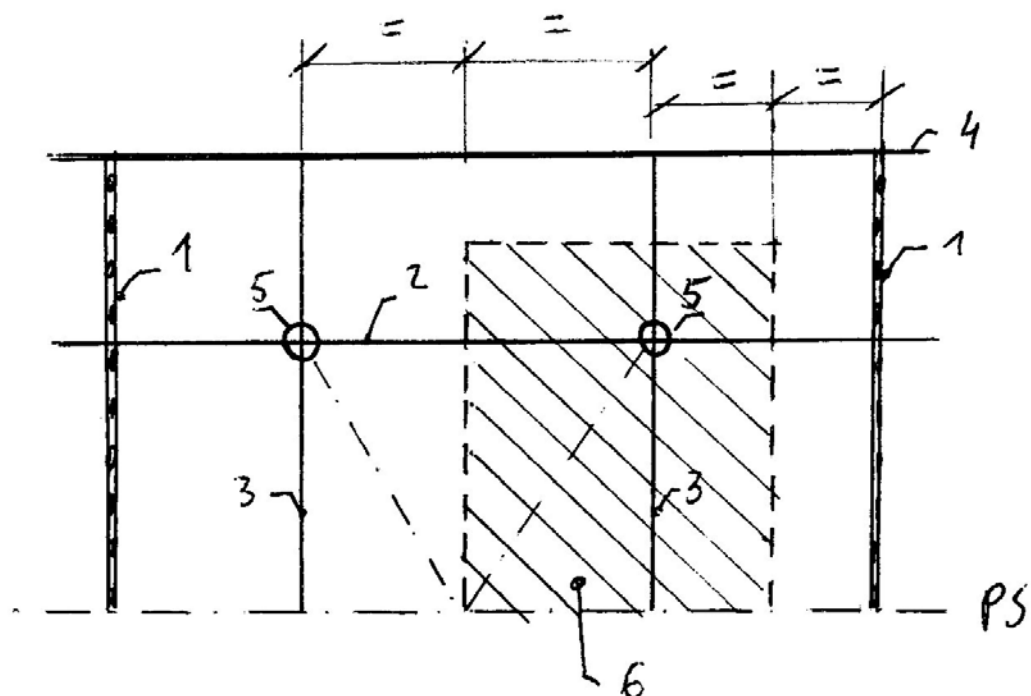
Pilersy na kolejnych kondygnacjach statku powinny w zasadzie być ustawiane w jednej osi pionowej i doprowadzone aż do dna statku, które ma zawsze masywną konstrukcję i stanowi dla nich solidne podparcie.

Siły pionowe przenoszone przez pilersy mogą osiągać stosunkowo duże wartości, gdyż przejmują one w przybliżeniu obciążenie z obszaru pokładu pokazanego na rys. XIII.43. Siły przenoszone przez pilersy niższych kondygnacji zawierają w sobie siły przenoszone przed stojące nad nimi pilersy wyższych kondygnacji ( siły w pilersach sumują się).

Znaczenie symboli cyfrowych na rys. XIII.43:

- 1 – gródź;
- 2 – wzdłużna zrębница luku;
- 3 – końcowy pokładnik luku;
- 4 – burtą;

- 5 – pilers;  
6 – obszar pokładu podpierany przez pilers.



Rys. XIII.43 Obszar pokładu przejmowany przez pilers

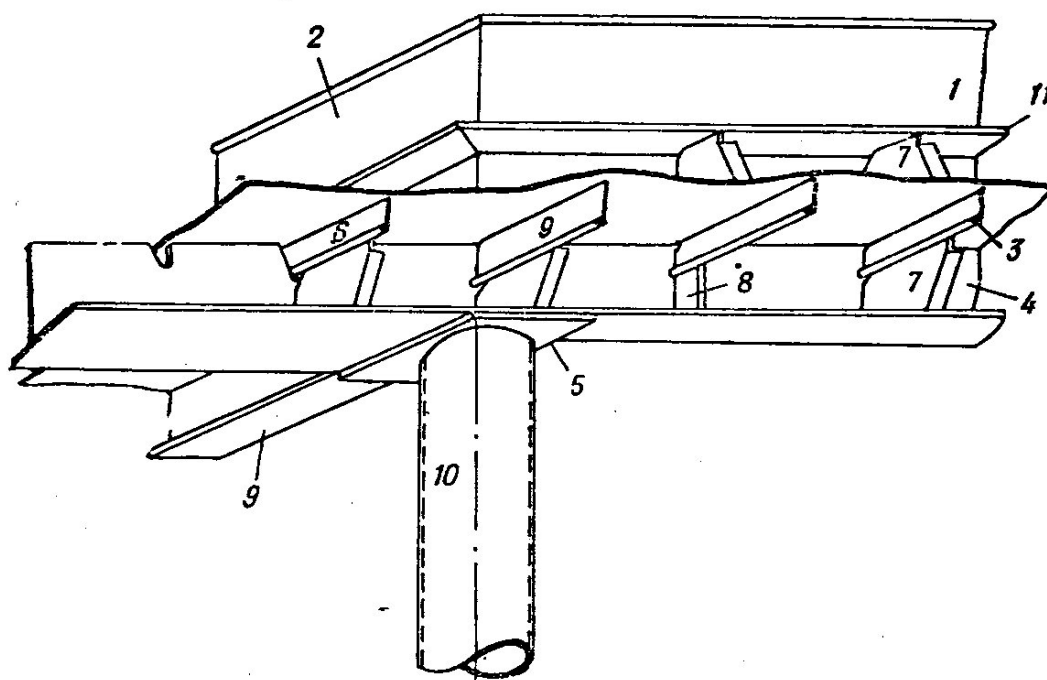
Wymagane jest więc odpowiednie przystosowanie konstrukcji pokładów i dna statku w rejonie usytuowania końców pilersów.

Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne w rejonie górnego końca pilersa, na niewielkim statku, pokazano na rys. XIII.44.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – wzdłużna zrębica luku;
- 2 – poprzeczna zrębica luku;
- 3 – pokładnik;
- 4 – wzdłużnik ( pod zrębnicą);
- 5 – płyta nakładkowa;
- 6 – pokładnik przewiązki luku;
- 7 – węzłówka;
- 8 – płaskownik usztywniający wzdłużnik „4”;
- 9 – końcowy pokładnik luku;
- 10 – pilers;
- 11 – poziome usztywnienie zrębnicy.

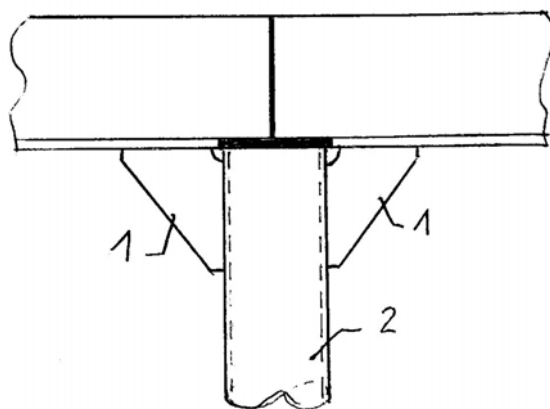




Rys. XIII.44 Konstrukcja w rejonie górnego końca pilersa

Płyta nakładkowa „5” ma za zadanie rozprowadzić nacisk pokładu na pilers na cały obwód jego przekroju poprzecznego.

Na większych statkach rozwiązanie jak na rys. XIII.44 nie będzie skuteczne. W takiej sytuacji stosowane będą węzłówki „1” pokazane na rys. XIII.45, zapewniające płynne wprowadzenie reakcji pokładu w pilers „2”.



Rys. XIII.45 Zamocowanie górnego końca pilersa na większym statku

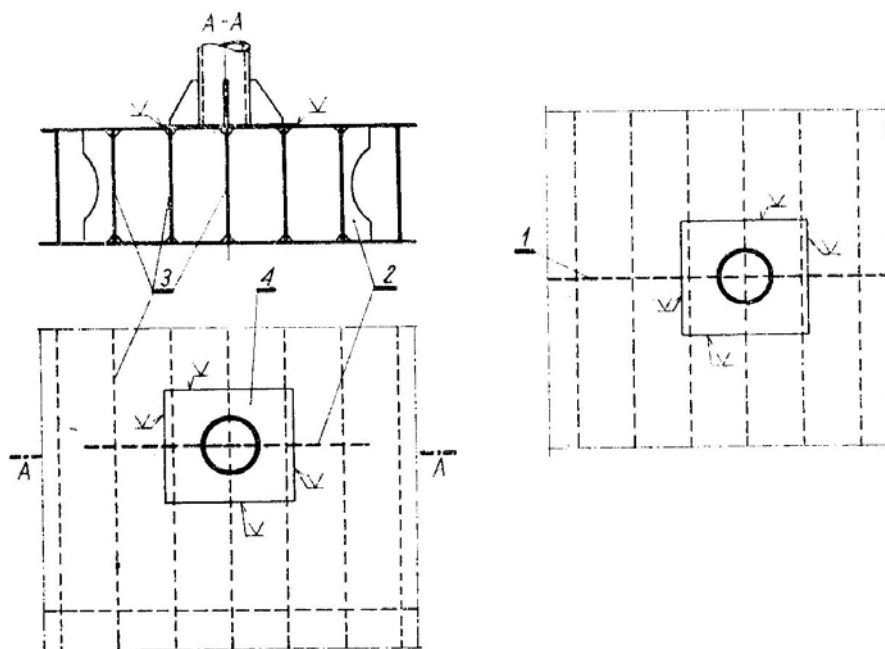
Dolny koniec pilersa postawiony na dnie statku dobrze jest usytuować na skrzyżowaniu dennika i wzdłużnika, jak pokazano na rys. XIII.46. Jeżeli w dnie nie ma tam wzdłużnika, to dobrze jest zastosować dodatkowy wzdłużnik – wstawkowo pomiędzy dennikami. Dobrze jest przy tym zastosować fragment zgrubionego poszycia dna wewnętrznego pod pilersem i węzłówki powyżej dna.

Znaczenie symboli cyfrowych na rys. XIII.46:

1 – wzdłużnik denny;

2 – wzdłużnik denny wstawkowy;

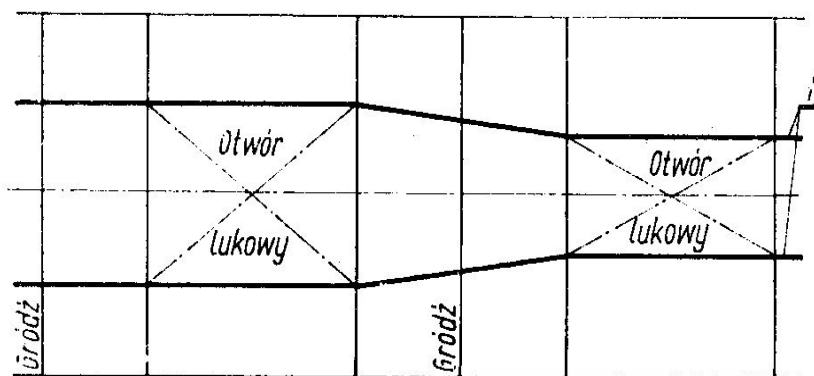
- 3 – denniki pełne;  
4 – zgrubione poszycie dna wewnętrznego.



Rys. XIII.46 Posadowienie pilersa na dnie

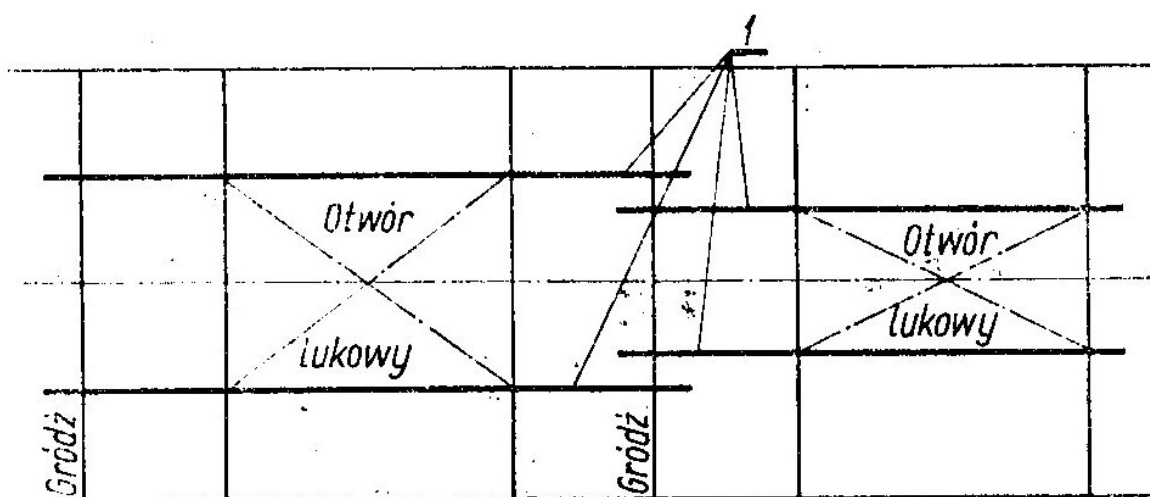
#### Pokład w dziobowej części statku

Luk ładunkowy najbliższy dziobu statku jest często węższy niż luki pozostałe. W takiej sytuacji, w celu zachowania ciągłości wzdlużników pokładowych pod wzdlużnymi krawędziami luków stosuje się załamanie ich kierunku, tzn. odchylają się one od PS w obszarze przewiązki pomiędzy lukami ( patrz rys. XIII.47.



Rys. XIII.47 Odchylone od PS wzdlużniki pokładowe

Rozwiązanie alternatywne polega na zastosowaniu wzdlużników równoległych do PS, które zazębiają się na długości rzędu 4 odstępów wręgowych ( patrz rys. XIII.48 – poz. „1”).



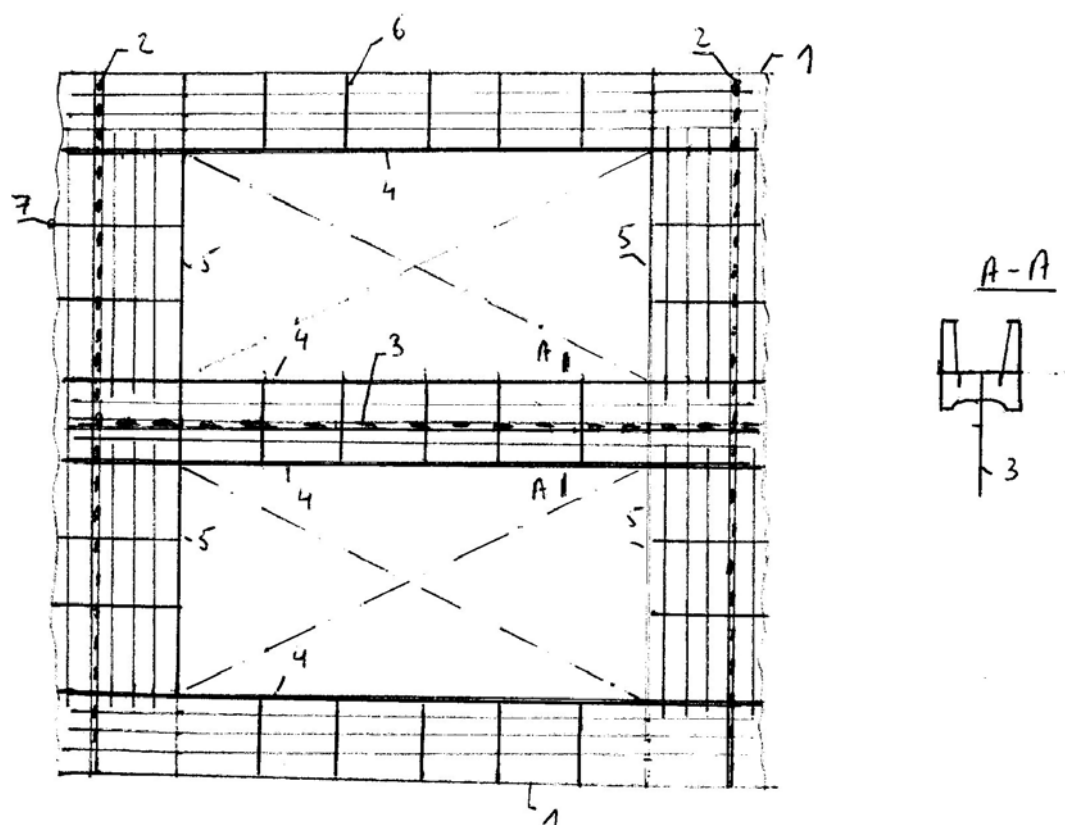
Rys. XIII.48 Zazębiające się wzdłużniki pokładowe

#### Pokład statku z dwoma rzędami luków ładunkowych

Na dużych statkach transportujących kontenery na pokrywach luków pokładu górnego (kontenerowce, drobnicowce) wymagane są „potężne” pokrywy lukowe, jeżeli stosowany jest tylko jeden otwór lukowy na całej szerokości statku. Problemów z konstrukcją takich pokryw luków można uniknąć poprzez zastosowanie 2 rzędów otworów lukowych na szerokości statku (patrz rys. XIII.49). Dzięki temu pokrywy luku o znacznie bardziej delikatnej konstrukcji są w stanie przenieść obciążenie od tej samej liczby kontenerów na pokładzie. Pokrywy opierają się na wzdłużnej przewiązce pomiędzy lukami, której szerokość odpowiada zazwyczaj szerokości kontenera (8 stóp). Przewiązka ta zazwyczaj opiera się na gródzi wzdłużnej w PS statku.

Znaczenie symboli cyfrowych na rys. XIII.49:

- 1 – burta;
- 2 – gródź poprzeczna;
- 3 – gródź wzdłużna w PS;
- 4 – wzdłużne zrębnice luków;
- 5 – poprzeczne zrębnice luków;
- 6 – pokładnik ramowy;
- 7 – wzdłużnik przewiązki.



Rys. XIII.49 Pokład górny z 2 rzędami łuków ładunkowych

## E. BURTY

Burty większości statków to burty pojedyncze ( na drobnicowcach, masowcach, holownikach, barkach, itp.). Składają się one z poszycia, usztywnień poszycia ( wręgów) i wiązarów ( wręgi ramowe, wzdłużniki burtowe ).

Na wielu statkach stosowane są burty podwójne ( zbiornikowce, kontenerowce, statki wielozadaniowe, itp. ). Ich konstrukcja przypomina konstrukcję dna podwójnego statku.

### Rola burt

Burty statku stanowią wodoszczelną barierę kadłuba, gdyż stykają się wprost z wodą w akwenie.

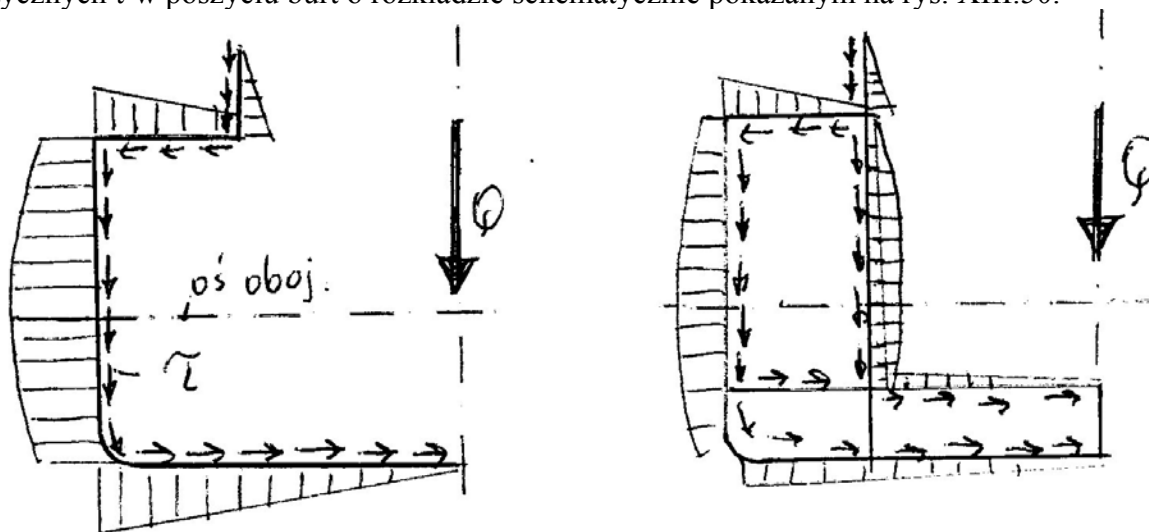
Poszycie burt zapewnia wytrzymałość kadłuba na ścinanie w warunkach zginania ogólnego w płaszczyźnie pionowej. W przypadku statku bez grodzi wzdłużnych jedynie poszycie burt przenosi naprężenia styczne  $\tau$  równoważące siłę porzeczną  $Q$ .

Udział wiązań burt w zapewnianiu odpowiednio dużej wartości wskaźnika wytrzymałości przekroju całego kadłuba jest raczej niewielki. Wyjątkiem są statki z szerokimi otworami lukowymi, gdzie oś obojętna kadłuba leży względnie blisko dna. W takich sytuacjach zgrubianie poszycia w górnych rejonach burt i stosowanie tam masywnych usztywnień wzdłużnych dość efektywnie podwyższa wartość wskaźnika przekroju kadłuba.

W przypadku statków z burta podwójną przestrzenie w tych burtach są wykorzystywane zazwyczaj jako zbiorniki balastowe.

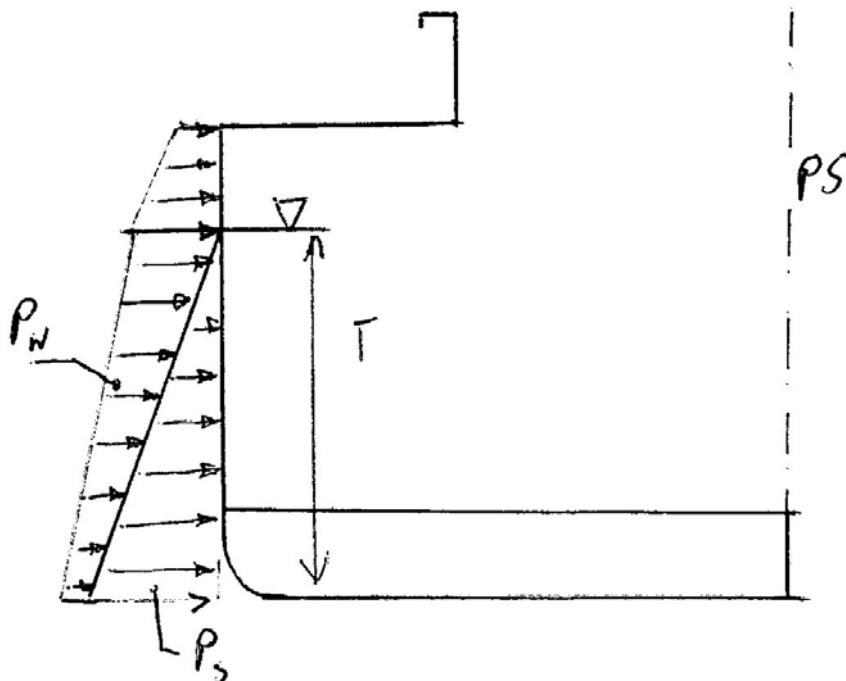
### Obciążenie burt

Siła porzeczną  $Q$  generowaną przy zginaniu ogólnym kadłuba wywołuje rozkład naprężeń stycznych  $\tau$  w poszyciu burt o rozkładzie schematycznie pokazanym na rys. XIII.50.



Rys.XIII.50 Naprężenia styczne w burtach przy zginaniu ogólnym

Burty są obciążone obciążeniem lokalnym w formie ciśnienia ( rys. XIII.51). Ciśnienie obliczeniowe jest sumą ciśnienia hydrostatycznego  $p_s$  i falowego  $p_w$  ( patrz także rozdział V). Obciążenie lokalne burty jest równoważone przez poziome siły reakcji pokładów i dna .

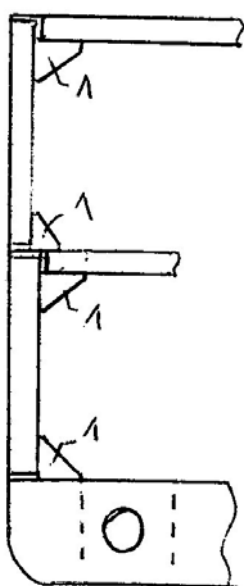


Rys. XIII.51 Obciążenie lokalne burty

Widzimy, że im bliżej dna tym większa jest wartość ciśnienia obliczeniowego.

Burty statków są najczęściej usztywnione pionowo – przynajmniej w rejonach nie sąsiadujących bezpośrednio z pokładem wytrzymałościowym.

Fakt, że ciśnienie obliczeniowe powiększa się w kierunku dna pozwala stopniować wymiary wręgów burtowych na statkach wielopokładowych. Mocniejsze wręgi są bowiem wymagane w niżej położonych rejonach burty. Typowy sposób usztywnienia burty pokazano na rys. XIII.52.



Rys. XIII.52 Klasyczny sposób usztywnienia burty

Wrgi burtowe połączone są z pokładnikami i dennikami przy pomocy elementów „l” zwanych węzłówkami. Najprostszy typ węzłówki, to trójkąt z blachy, ze ściętymi końcami; wysokość progu rzędu 20 do 30 mm.

### Rola węzłówek

Węzłówki są powszechnie stosowane w konstrukcji kadłubów statków ( nie tylko w konstrukcji burt ).

Węzłówki spełniają następujące funkcje:

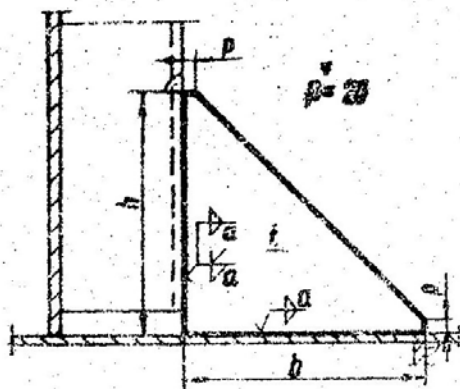
- a) umożliwiają łatwy montaż kadłuba z usztywnionych płatów konstrukcji, które po spasowaniu są łączone właśnie węzłówkami;
- b) zwiększają wytrzymałość końcowych odcinków belek ( usztywnień poszycia lub wiązarów); zwiększa się tam zdolność do przenoszenia momentów zginających i sił ścinających a wskaźnik przekroju łączonych belek może być mniejszy niż w analogicznej konstrukcji, gdzie belki byłyby łączone ze sobą bez węzłówek; zmniejsza się formalnie rozpiętość belek przyjmowana do obliczeń wymaganego wskaźnika przekroju ( patrz rys. VI.13 );
- c) węzłówki zmniejszają koncentrację naprężeń w końcowych rejonach łączonych belek w stosunku do analogicznej konstrukcji, gdzie belki byłyby łączone bezpośrednio bez stosowania węzłówek.

Różnorodność stosowanych w praktyce węzłówek jest bardzo duża. Niżej podano przykłady typowych węzłówek zalecanych do stosowania przez Stocznię Gdańską, tzn. według katalogu [10].

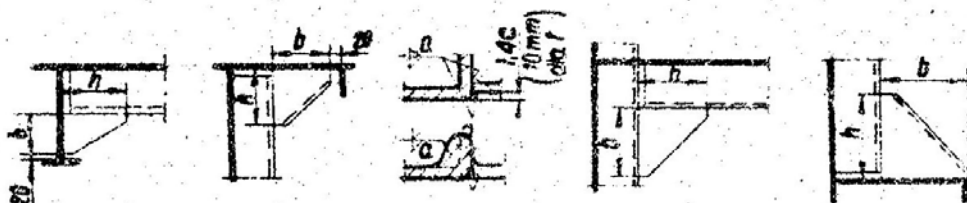
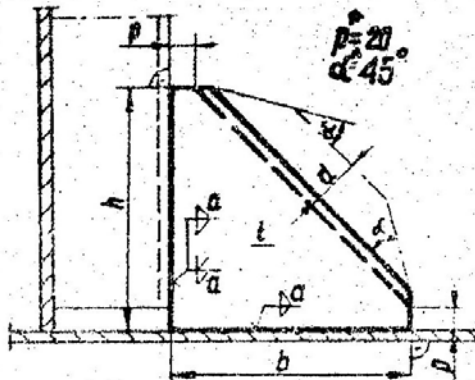
Na rys. XIII.53 pokazano najprostszy typ węzłówki. W przypadku, gdy iloraz długości swobodnej krawędzi węzłówki do jej grubości przekracza 50 wymagane jest zastosowanie zagięcia swobodnej krawędzi węzłówki lub zastosowanie tam usztywnienia spawanego. Rozwiązanie takie zabezpiecza węzłówkę przed wyboczeniem.



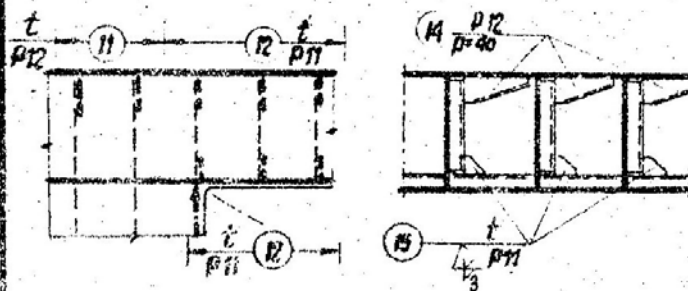
**P11**



**P12**



**Oznaczenie na rysunku :**

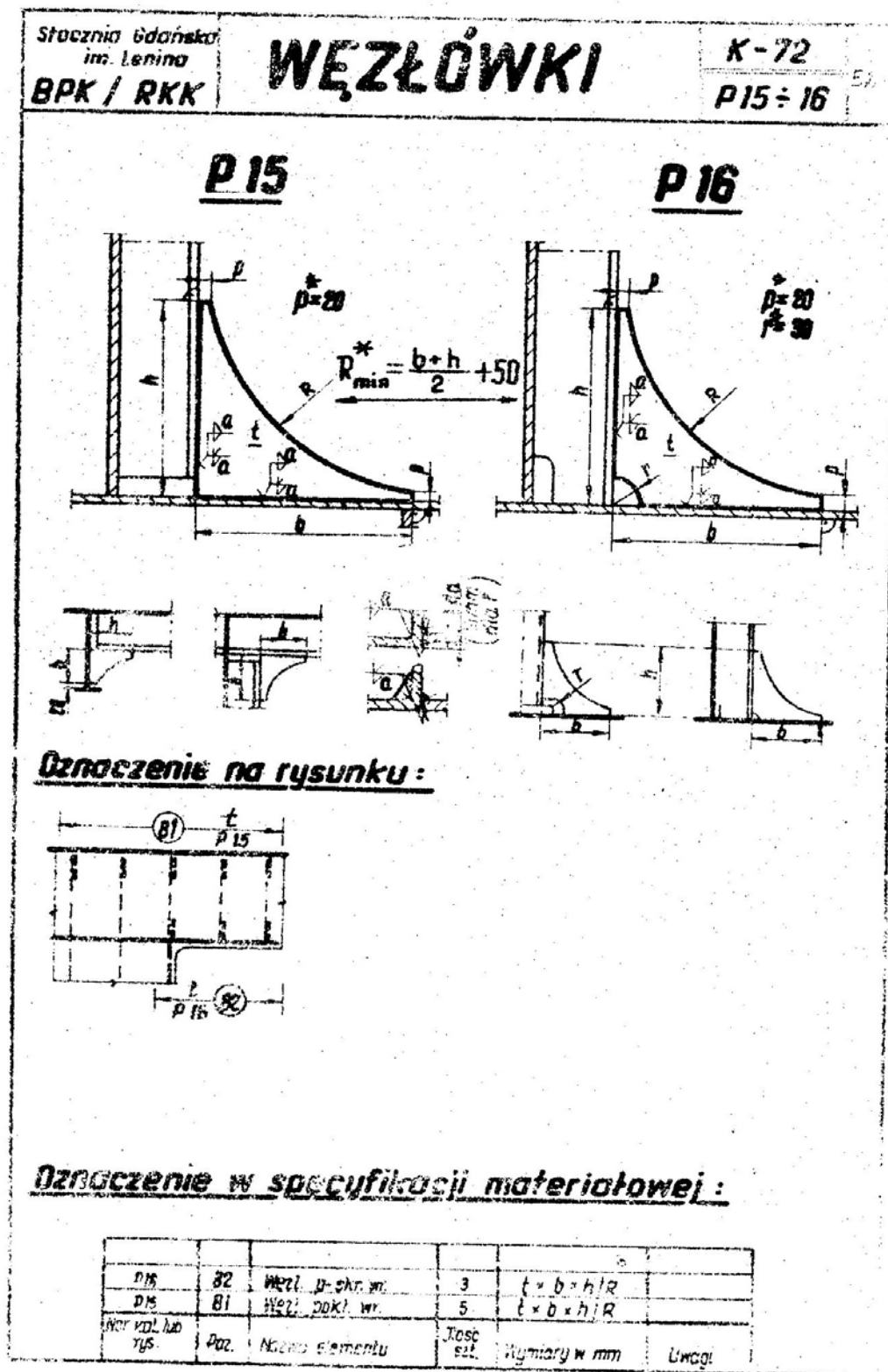


**Oznaczenie w specyfikacji materiałowej :**

P11	15	Węzl. dolna	3	$t \times b \times h$	
P12	14	Węzl. górna	3	$t \times b \times h - d$	
	13				
P11	12	Węzl. pokł. wr.	6	$t \times b \times h$	
P12	11	Węzl. pokł. wr.	2	$t \times b \times h - d$	
Podk. kol. lub rys.	Poz.	Nazwa elementu	Ilość szt.	Kwantyfikacja w nim	Uwagi

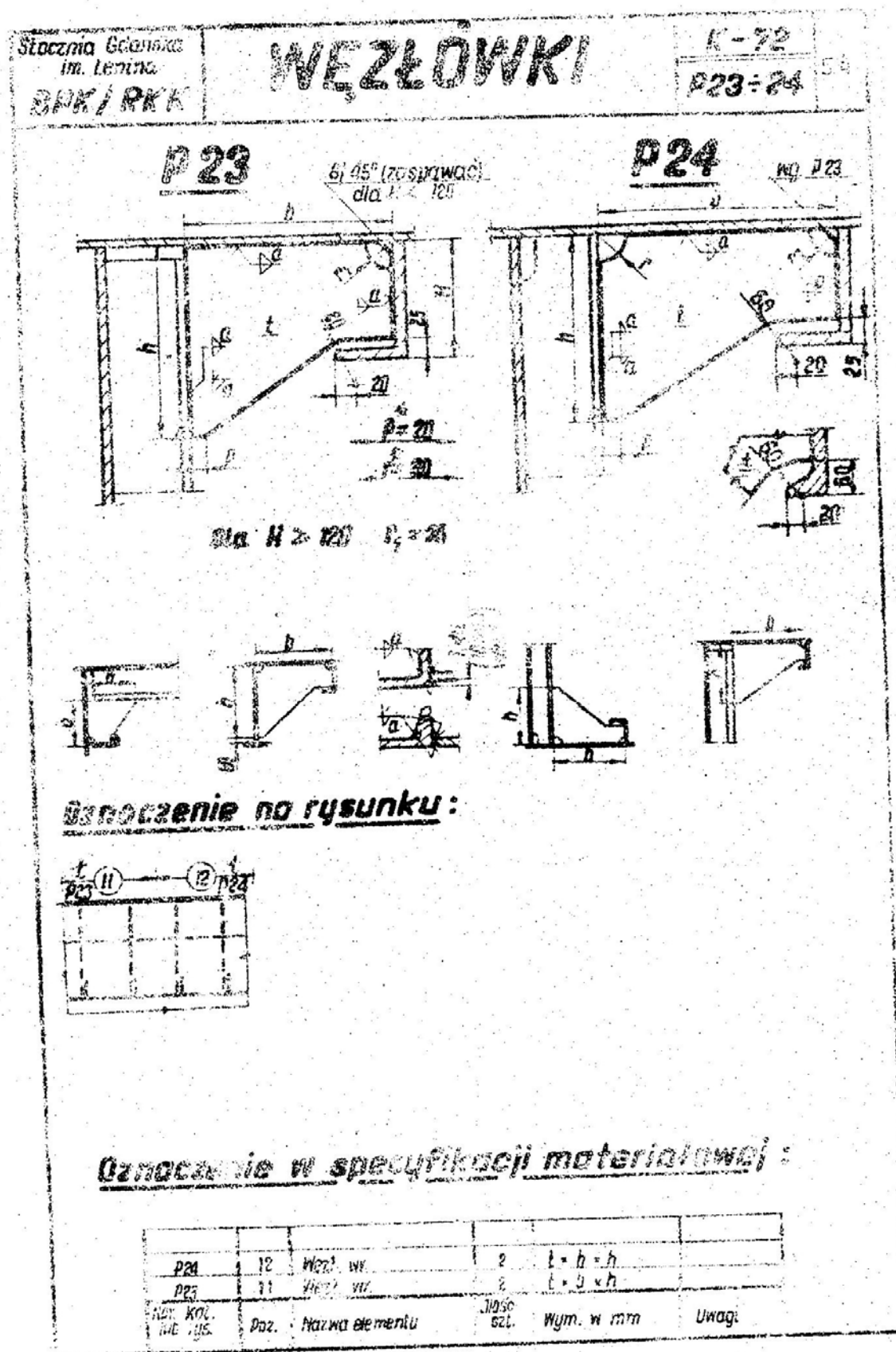
Rys. XIII.53 Najprostszy typ węzłówek

Jeżeli w rejonie prostej węzłówki spodziewane są pęknięcia zmęczeniowe, to skutecznym rozwiązaniem może być zastosowanie węzłówki o łagodnie zakończonych skrajach ( tzw. „soft toe” ), pokazanej na rys. XIII.54.



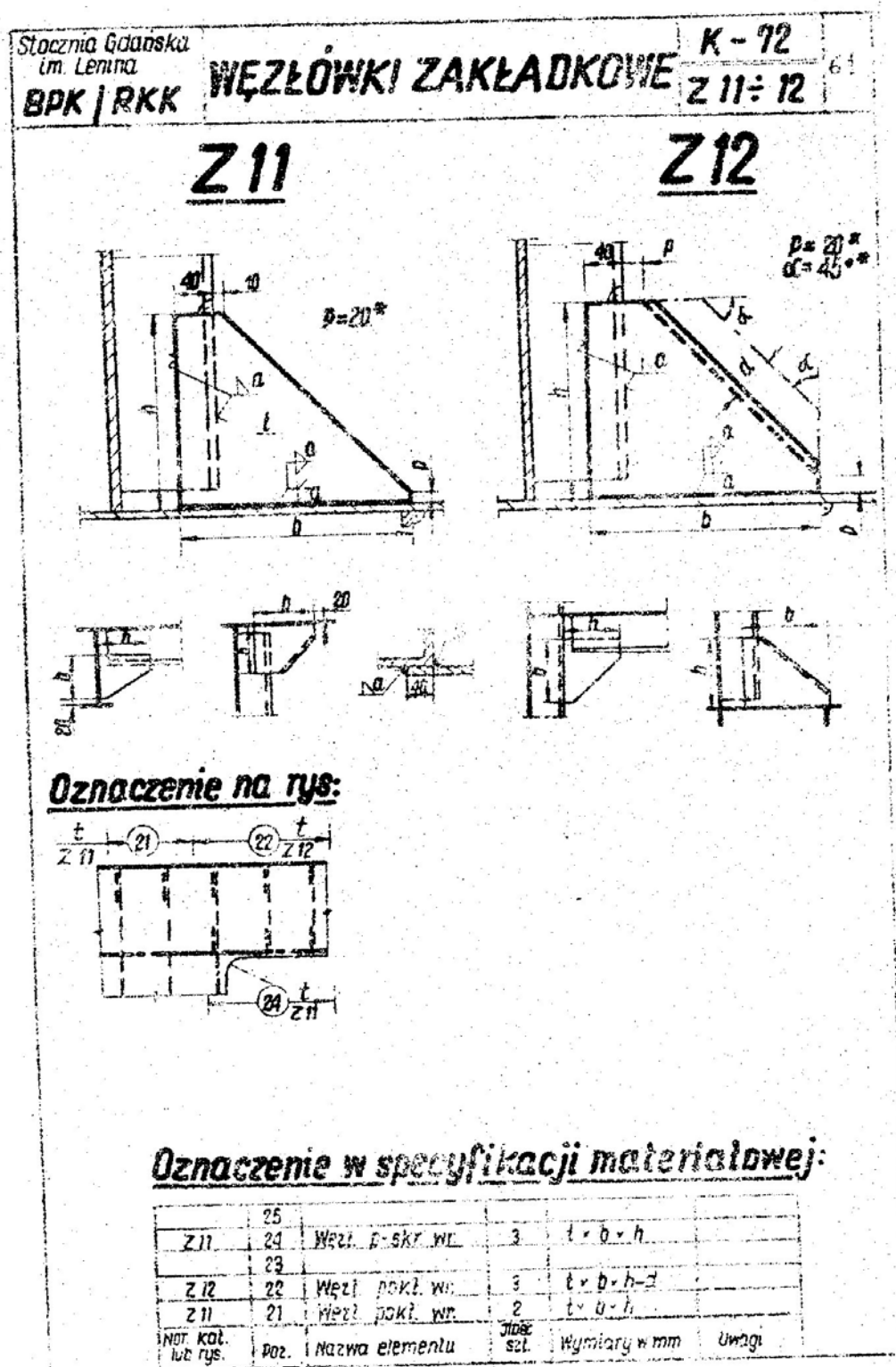
Rys. XIII.54 Węzłówki o łagodnie zakończonych skrajach

Przykładowe węzłówki stosowane do łączenia usztywnień poprzecznych z wzdłużnymi pokazano na rys. XIII.55.



Rys. XIII.55 Węzłówki do łączenia usztywnień o wzajemnie prostopadłych kierunkach

W mniej odpowiedzialnych konstrukcjach bywają stosowane łatwe w montażu węzłówki nakładkowe. Przykłady takich węzłówek pokazano na rys. XIII.56.



Rys. XIII.56 Przykład węzłówek nakładkowych

### Wymiarowanie węzłówek wg Przepisów [1]

Przedstawione niżej informacje dotyczą węzłówek, które łączą usztywnienia lub wiązary nie mające wpływu na wytrzymałość ogólną kadłuba. Założono, że usztywnienia lub wiązary i węzłówki są wykonane ze stali o takiej samej wartości granicy plastyczności.

Węzłówki przenoszące naprężenia od zginania ogólnego kadłuba są wymiarowane wg kryterium dopuszczalnych naprężeń w ich krawędziach lub według kryterium trwałości zmęczeniowej.

Wymagana grubość węzłówki ( netto) jest obliczana wg wzoru:

$$t_w = 3 + k_1 \sqrt{W} \quad [\text{mm}]$$

gdzie:

$W$  – wymagana wartość wskaźnika przekroju usztywnienia łączonego węzłówką,  $[\text{cm}^3]$ ;

$k_1 = 0,3$  – dla węzłówek bez mocnika lub zagięcia wzdłuż swobodnej krawędzi;

$k_1 = 0,2$  – dla węzłówek z mocnikiem lub zagięciem.

Długość ramienia węzłówki, mająca związek z wymiarami  $a_1$  i  $a_2$  pokazanymi na rys. XIII.57, nie powinna być mniejsza niż:

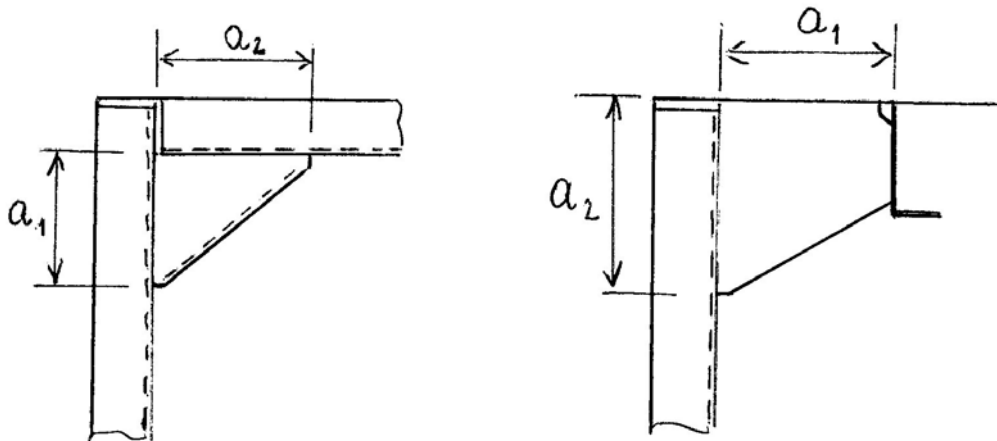
$$a = c \sqrt{\frac{W}{t_w}} \quad [\text{mm}]$$

gdzie:

$W$ ,  $t_w$  – określono wyżej;

$c = 70$  – dla węzłówek z mocnikiem lub zagięciem wzdłuż swobodnej krawędzi;

$c = 75$  – dla węzłówek bez mocnika lub zagięcia wzdłuż swobodnej krawędzi.



Rys. XIII.57 Charakterystyczne wymiary węzłówek

Wymiary  $a_1$  i  $a_2$  ( patrz rys. XIII.57) powinny spełniać warunki:

$$a_1 + a_2 \geq 2a$$

$$a_1 \geq 0,75a$$

$$a_2 \geq 0,75a$$

Jeżeli długość swobodnej krawędzi węzłówki przekracza  $50 t_w$ , to wzdłuż tej krawędzi należy zastosować mocnik lub zagięcie o szerokości nie mniejszej niż:

$$b = 40 \left( 1 + \frac{W}{40} \right) \quad [\text{mm}]$$

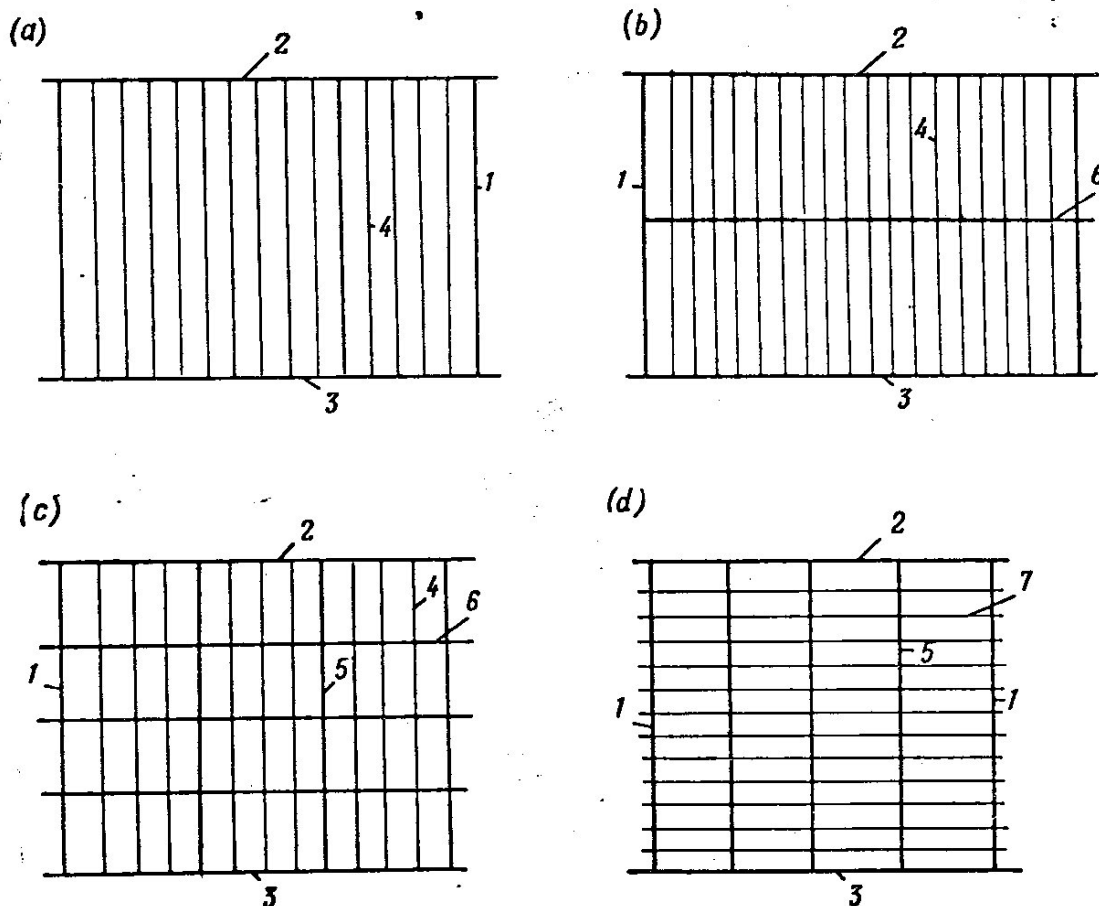
gdzie:  $W$  – określono wyżej.

## Konstrukcja burty pojedynczej

Typowe konfiguracje usztywnień ( wręgów ) i wiązarów ( wręgów ramowych i wzdłużników ramowych ) pokazano na rys. XIII.58.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – gródź poprzeczna;
- 2 – poszycie pokładu;
- 3 – poszycie dna;
- 4 – wręg;
- 5 – wręg ramowy;
- 6 – wzdłużnik burtowy;
- 7 – wręg wzdłużny.



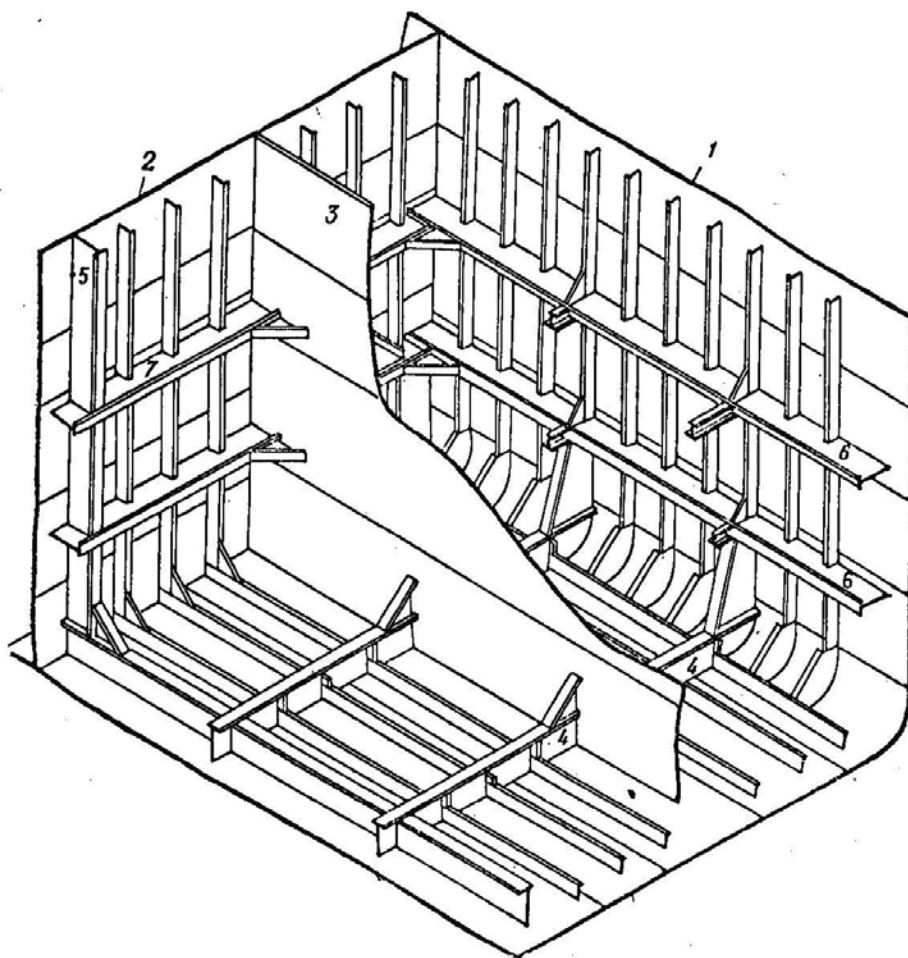
Rys. XIII.58 Typowe konfiguracje usztywnień i wiązarów burt

Fragment przykładowej konstrukcji burty zbiornikowca o pojedynczym kadłubie przedstawiono na rys. XIII.59.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – poszycie burty;
- 2 – poszycie grodzi poprzecznej;
- 3 – poszycie grodzi wzdłużnej;
- 4 – dennik;
- 5 – pionowy wiązar grodzi;
- 6 – wzdłużnik burtowy.





Rys. XIII.59 Fragment burty zbiornikowca o pojedynczym kadłubie

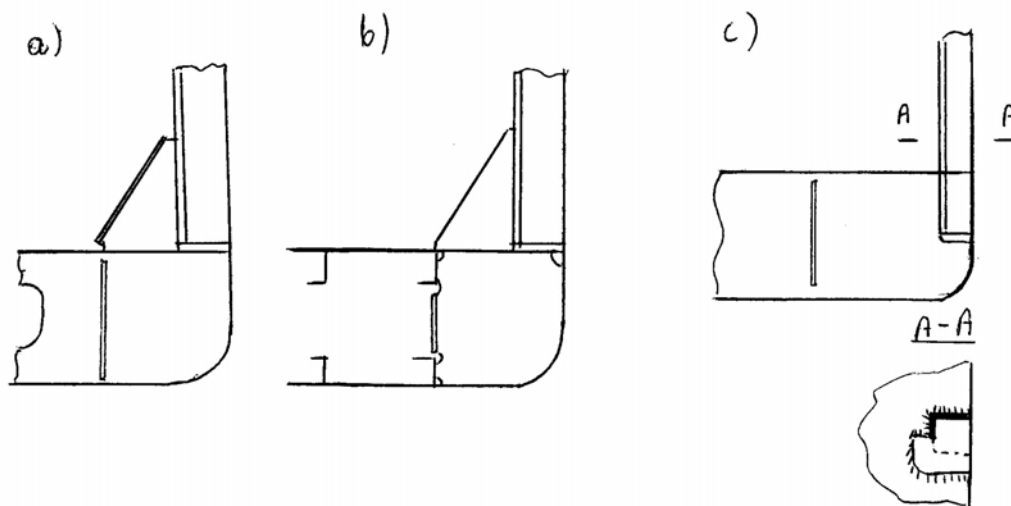
Wzdłużniki burtowe pozwalają zmniejszyć rozpiętość wręgów do rozsądnych wymiarów i w ten sposób uzyskać ciężar konstrukcji burty zbliżony do optymalnego.

Wręgi ramowe w przypadku burty usztywnionej wzdłużnie podpierają wręgi wzdłużne. Wręgi ramowe są często wymagane także w przypadku burty usztywnionej pionowo, w następujących sytuacjach:

- w płaszczyznach końcowych pokładników luku;
- w płaszczyznach pokładników wspornikowych;
- pod końcowymi ścianami nadbudówek i pokładówek;
- w płaszczyznach pokładników ramowych pokładu usztywnionego wzdłużnie;
- w maszynowni ( w odstępach 3 do 5 odstępów wręgów).

#### Typowe węzły w konstrukcji burty pojedynczej

Możliwe konstrukcje połączenia wręgu z dnem podwójnym pokazano na rys. XIII.60.

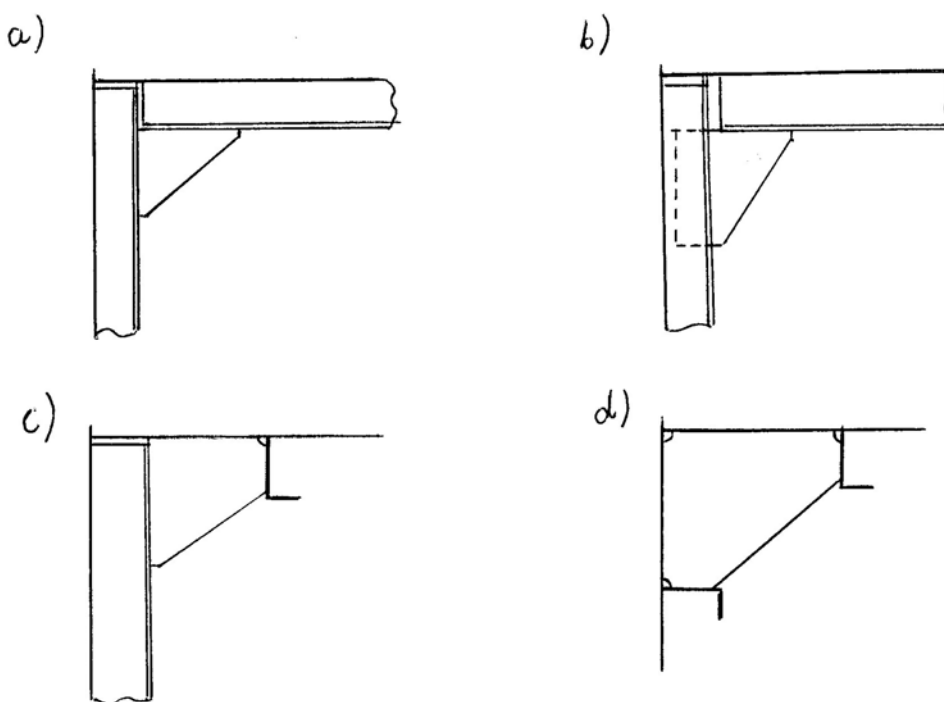


Rys. XIII.60 Połączenie wręgu z dnem podwójnym

Warianty „a” i „b” to rozwiązania klasyczne, z zastosowaniem węzłówki.

Węzłówki zmniejszają użyteczną objętość ładowni. W związku z tym na mniejszych statkach bywa stosowane połączenie bezwęzłowe, pokazane jako wariant „c”. Wręg jest przewleczony przez dno wewnętrzne i opiera się bezpośrednio o dennik lub węzłówkę obłową. Na dnie wewnętrznym stosuje się uszczelkę.

Typowe sposoby połączenia wręgów z pokładem górnym pokazano na rys. XIII.61.



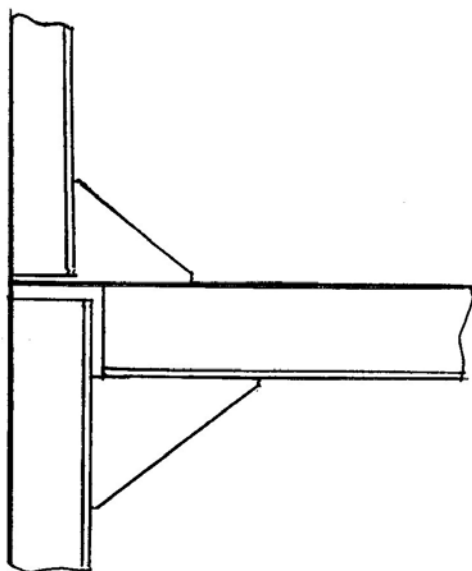
Rys. XIII.61 Połączenie wręgu z pokładem górnym

Wariant „a” to typowe rozwiązanie dla konstrukcji w poprzecznym systemie wiązań a wariant „c” - dla pokładu usztywnionego wzdłużnie.

Wariant „b” jest podobny do „a” ale zastosowano łatwą w montażu węzłówkę nakładkową. Rozwiązanie takie jest dopuszczalne na mniejszych statkach.

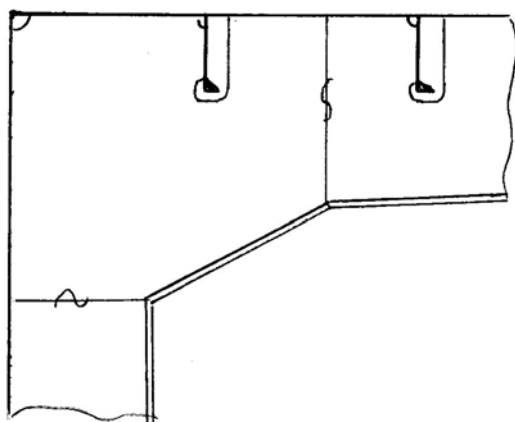
Wariant „d” to wzdlużne usztywnienia burty i pokładu połączone węzłówką. Takie rozwiązanie zmniejsza rozpiętość usztywnień burty i pokładu a więc pozytywnie wpływa na ich wytrzymałość pozwalając zmniejszyć ich wymiary. Dodatkowo węzłówka pozwala na oparcie na niej nadburcia.

Na rys. XIII.62 pokazano typowy węzeł konstrukcji burty usztywnionej pionowo, w rejonie pokładu dolnego. Wręg jest przerywany przy tym pokładzie. W związku z tym odcinek wręgu położony wyżej może być delikatniejszy. W ten sposób racjonalnie dostosowuje się wymiary elementów konstrukcji do obciążenia ( patrz rys. XIII.51).



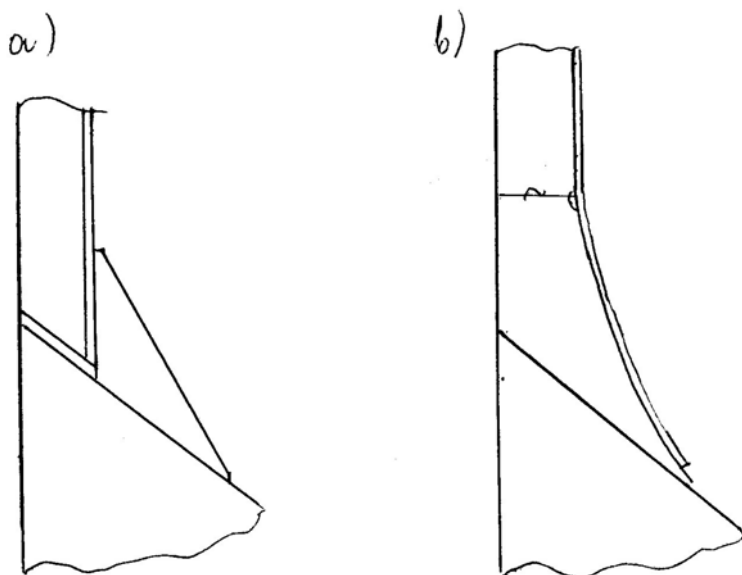
Rys. XIII.62 Węzeł konstrukcji burty przy pokładzie dolnym

Na rys. XIII.63 pokazano przejście pokładnika ramowego we wręg ramowy. Pokład jest usztywniony wzdlużnie a burta pionowo. Zamiast stosować węzłówkę zastosowano przejście płynne.



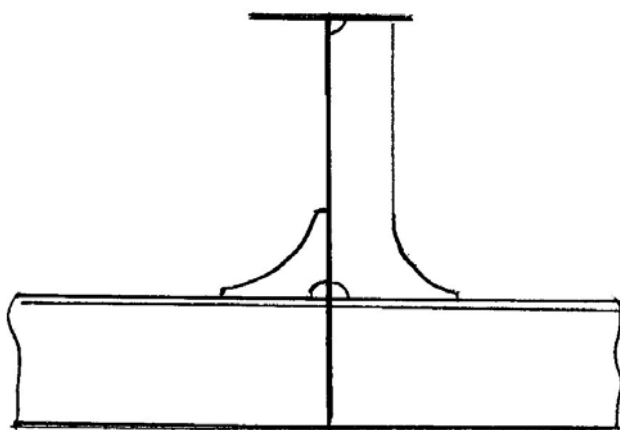
Rys. XIII.63 Przejście pokładnika ramowego we wręg ramowy

Na rys. XIII.64 pokazano konstrukcję połączenia wręgu masowca o pojedynczej burcie ze zbiornikiem obłowym. Wariant „a” to typowe rozwiązanie dopuszczalne przez [1] na statkach o długości mniejszej niż 190 m. Na statkach większych wymagane jest zastosowanie integralnych węzłówek o płynnym kształcie i „miętko” zakończonych, pokazanych jako wariant „b”. Rozwiązanie takie zapobiega powstawaniu pęknięć zmęczeniowych.



Rys. XIII.64 Dolny koniec wręgu masowca o pojedynczych burtach

W przypadku wzdłużnych usztywnień burt dużych statków pęknięciom zmęczeniowym w rejonie ich połączeń z wręgami ramowymi zapobiega konstrukcja z zastosowaniem „miętko” zakończonych węzłówek, pokazanych na rys. XIII.65.



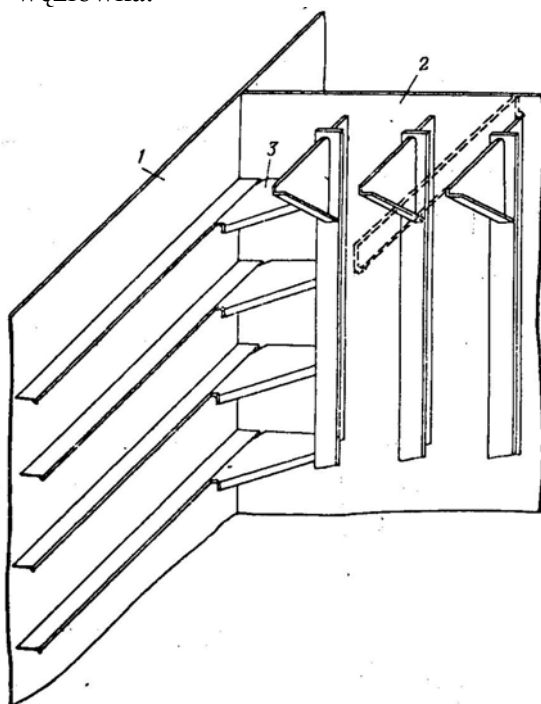
Rys. XIII.65 Połączenie wzdłużnego usztywnienia burty z wręgiem ramowym, odporne na pękanie zmęczeniowe

Na rys. XIII.66 pokazano połączenie burty usztywnionej wzdłużnie z grodzią poprzeczną usztywnioną pionowo.

Znaczenie symboli na tym rysunku:

1 – poszycie burty;

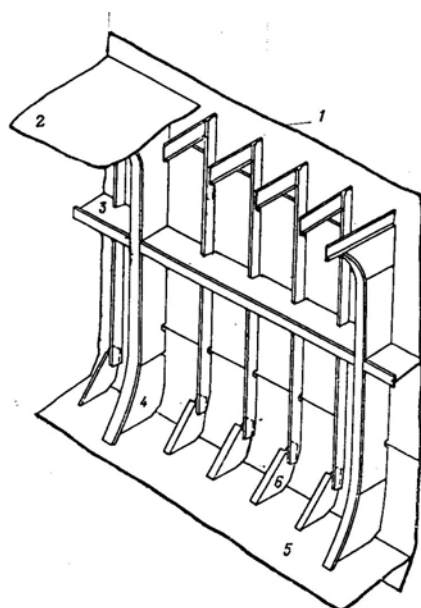
- 2 – gródź poprzeczna;
- 3 – węzłówka.



Rys. XIII.66 Połączenie burty usztywnionej wzdłużnie z grodzią usztywnioną pionowo  
 Fragment konstrukcji burty w maszynowni statku przedstawiono na rys. XIII.67.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – poszycie burty;
- 2 – poszycie pokładu;
- 3 – wzdłużnik burtowy;
- 4 – wręg ramowy;
- 5 – dno wewnętrzne;
- 6 – węzłówka.



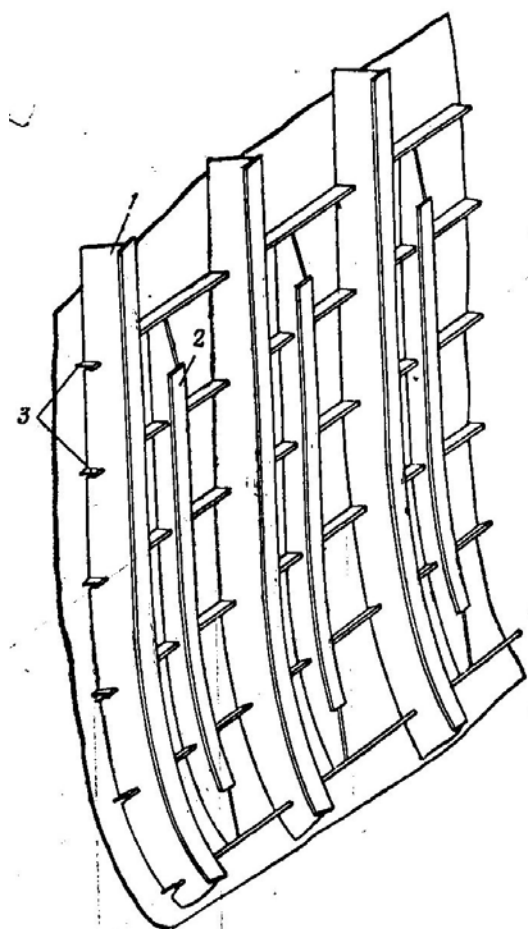
Rys. XIII.67 Konstrukcja burty w maszynowni

Zastosowanie w maszynowni statku konstrukcji z wręgami ramowymi i wzdluznikami burtowymi wymuszają Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych ( np. [1] ). Dzięki takiej masywnej konstrukcji jest ona sztywna i zapobiega to powstawaniu drgań wymuszonych ( przez instalację napędową ) o zbyt dużych amplitudach.

Fragment konstrukcji burty statku usztywnionej wzdluznie, przystosowanego do żeglugi w wodzie pokrytej krą lodową, pokazano na rys. XIII.68. O takiej konstrukcji mówimy, że zawiera ona wzmocnienia lodowe.

Znaczenie symboli cyfrowych na rys. XIII.68:

- 1 – wręg ramowy;
- 2 – dodatkowe pionowe wzmocnienie burty,
- 3 – wręgi wzdluzne.

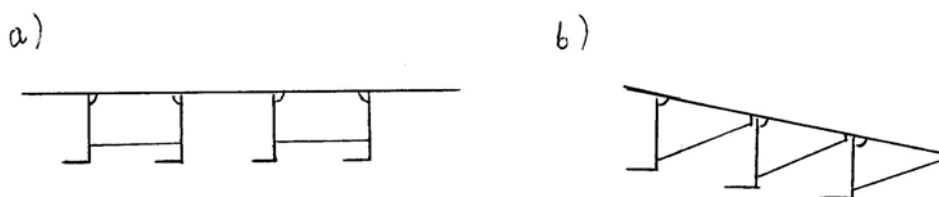


Rys. XIII.68 Burta ze wzmocnieniami lodowymi.

Więcej informacji na temat wzmocnień lodowych podano w dalszej części wykładu.

W przypadku wręgów o znacznej rozpiętości lub wręgów, których środniki są pochylone do poszycia burty pod kątem znacznie odbiegającym od prostego, wymagane jest zastosowanie węzłówek przeciwskrętnych. Zapobiegają one wyboczeniu skrętnemu wręgów przy ich zginaniu ciśnieniem wody obciążającej burtę. Są stosowane w środkowych rejonach przęsł wręgów.

Typowe przypadki zastosowania węzłówek przeciwskrętnych pokazano na rys. XIII.69.



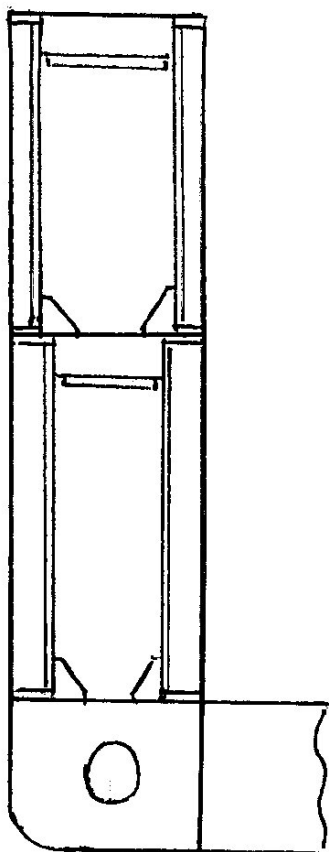
Rys. XIII.69 Węzłówki przeciwnskrętne

### Konstrukcja burty podwójnej

Burty podwójne są powszechnie stosowane na takich statkach jak zbiornikowce, kontenerowce, statki wielozadaniowe, masowce.

Konstrukcja burty podwójnej przypomina konstrukcję dna podwójnego. Wrgi ramowe w formie przegród łączących burtę z burtą wewnętrzną przypominają denniki a pokłady dolne są podobne do wzdłużników dna podwójnego.

Konstrukcję burty podwójnej niewielkiego statku pokazano na rys. XIII.70. Burty i burty wewnętrzne są usztywnione pionowo. Zastosowano pokładniki poprzeczne o względnie dużej wysokości i małej rozpiętości. Pełnią one jednocześnie rolę węzłówek w górnych rejonach przęsł wręgów.

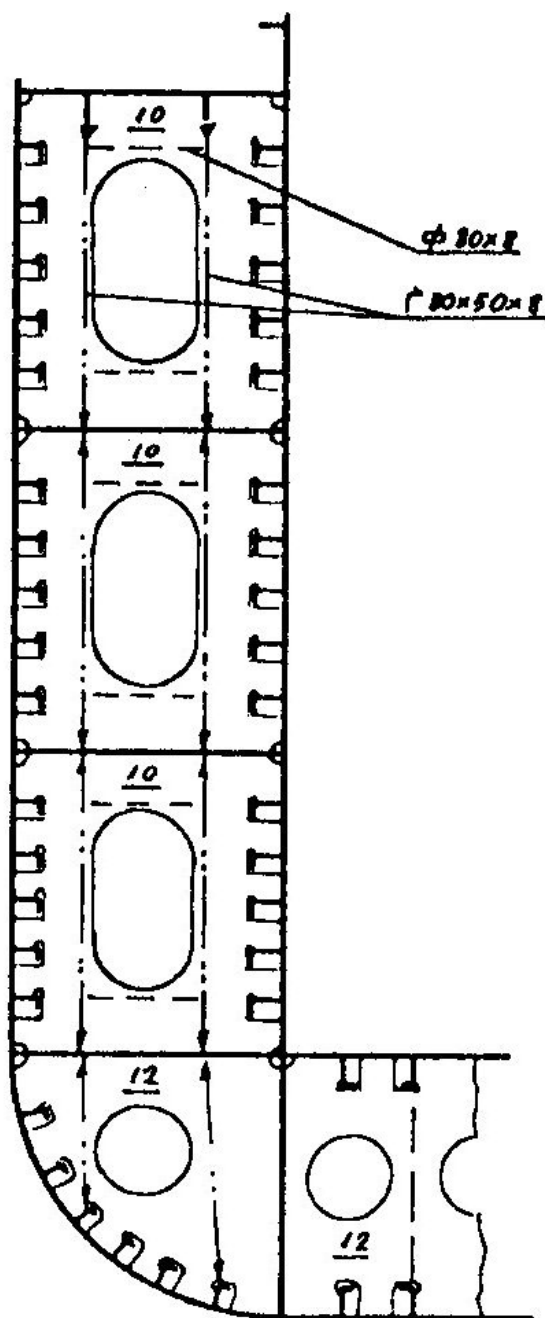


Rys. XIII.70 Konstrukcja burty podwójnej niewielkiego statku

Popularne jest zastosowanie burty podwójnej z wzdłużnym systemem usztywnień (rys. XIII.71). Rozwiązanie takie jest typowe dla statków średniej wielkości i dużych.

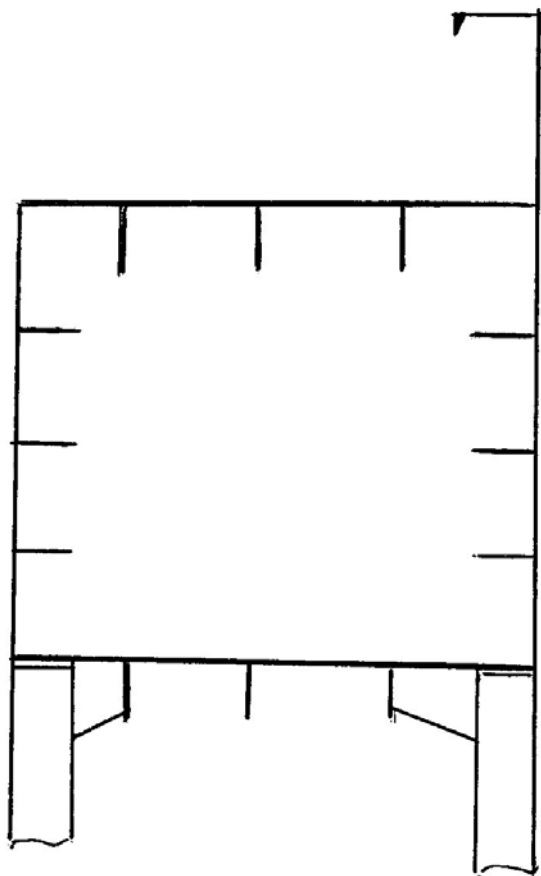


a)



Rys. XIII.71 Burta podwójna usztywniona wzdłużnie

W przypadku dużych kontenerowców burta podwójna może mieć konstrukcję, którą pokazano na rys. XIII.72 ( pokazano tylko górny rejon konstrukcji – przy pokładzie górnym ). Górna część burty jest usztywniona wzdłużnie. Jako usztywnienia zastosowano potężne płaskowniki, które skutecznie podwyższają wartość wskaźnika przekroju całego kadłuba statku. Rozwiązanie takie może być konieczne, gdy bardzo grube blachy pokładu i górnych części burty i burty wewnętrznej ( mogą tam być blachy o grubości nawet 50 mm) nie zapewniają jeszcze wymaganej wartości wskaźnika przekroju kadłuba. Niżej położone fragmenty burty mogą być usztywnione pionowo, gdyż ich wpływ na wskaźnik przekroju kadłuba jest niewielki.



Rys. XIII.72 Górna część burty podwójnej dużego kontenerowca

## F. GRODZIE I PRZEGRODY

**Grodzie statku** to wodoszczelne przegrody w kadłubie ustawione pionowo w płaszczyznach poprzecznych (wrgowych) lub wzdłużnych.

**Przegrody** to konstrukcje podobne do grodzi ale nie są one wodoszczelne.

Grodzie mogą być:

- poprzeczne;
- wzdłużne.

Grodzie poprzeczne są stosowane na wszelkich typach statków.

Grodzie wzdłużne są stosowane głównie na zbiornikowcach. Można je spotkać na niektórych drobnicowcach i statkach wielozadaniowych. Burty wewnętrzne statków z podwójnymi burtami można traktować jako grodzie wzdłużne.

### Rola grodzi

Grodzie dzielą przestrzeń w kadłubie statku na wodoszczelne i funkcjonalne przedziały. Podpierają one dno, burty i pokłady statku podlegające obciążeniom poprzecznym w formie ciśnienia wody lub ciężaru ładunku.

Poszycie grodzi wzdłużnych przenosi część poprzecznych sił ścinających w warunkach zginania ogólnego kadłuba statku.

### Wymagania Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych dotyczące grodzi poprzecznych

Każdy statek musi mieć tzw. **gródź zderzeniową**, która zabezpiecza położone za nią przestrzenie w kadłubie przed awaryjnym zalaniem wodą, gdy statek uderza dziobem o przeszkodę ( np. zderzenie z innym statkiem ). Ma być ona usytuowana w odległości od 0,05L do 0,08L od pionu dziobowego.

Obowiązkowe jest także zastosowanie **grodzi skrajnika rufowego** i **grodzi poprzecznych oddzielających przedział maszynowni** od innych przedziałów w kadłubie. Rufowa gródź maszynowni może pełnić jednocześnie rolę grodzi skrajnika rufowego.

Ze względu na pozytywny wpływ grodzi na wytrzymałość i sztywność kadłuba statku Przepisy ( np. [1] ) wymagają zastosowania pewnej minimalnej liczby grodzi poprzecznych w zależności od długości statku. Wymaganie to dotyczy statków bez grodzi wzdłużnych. Dla przykładu w [1] wymaga się aby dla statku z maszynownią w części rufowej liczba grodzi poprzecznych nie była mniejsza niż 3 dla  $L \leq 65$  m, 4 – dla  $65 \text{ m} < L \leq 85$  m, 5 – dla  $85 \text{ m} < L \leq 125$  m, itd.

Na dużych masowcach stosuje się nawet 12 grodzi poprzecznych, tzn. statek ma 11 ładowni.

Zastosowana liczba grodzi poprzecznych może wynikać z wymagania zapewnienia tzw. niezatapialności statku ( tzw. niezatapialność jedno, dwu lub trzyprzedziałowa ), które ma zastosowanie do statków pasażerskich.

W przypadku masowców o długości większej niż 150 m wymaga się aby statek zachował pływalność po awaryjnym zatopieniu dowolnej ładowni.

### Zasięg grodzi wodoszczelnych

Poprzeczne grodzie wodoszczelne ( pełnią one funkcję wodoszczelnych barier w warunkach awaryjnego rozszczelnienia fragmentu konstrukcji kadłuba lub pokryw luków ) powinny łączyć obie burty statku i sięgać od dna ( lub dna wewnętrznego ) do pokładu grodziowego.

**Pokład grodziowy** na większości statków jest pokładem górnym.

Pokład grodziowy bywa także drugim ( licząc od góry ) pokładem statku. Jest tak na niektórych drobnicowcach, na statkach pasażerskich, na promach pasażersko-samochodowych.

Pokład grodziowy ma być usytuowany odpowiednio wysoko nad wodnicą ładunkową aby zapewnić wymaganą przez konwencję ILLC wartość tzw. wolnej burty.

Gródź zderzeniowa musi jednak sięgać do najwyższego ciągłego pokładu statku.

#### Otwory w grodziach

W zasadzie w grodziach wodoszczelnych nie wolno stosować jakichkolwiek otworów komunikacyjnych. Wyjątki to:

- drzwi wodoszczelne w niektórych grodziach statków pasażerskich i rybackich;
- wejście do tunelu linii wałów z maszynowni.

Stosowane bywają szczelne przejścia w grodziach dla kabli i rurociągów.

#### Podstawowe typy konstrukcyjne grodzi

Stosowane są 2 podstawowe typy konstrukcji grodzi:

- grodzie płaskie;
- grodzie profilowane ( zwane także falistymi ).

Poszycie grodzi płaskiej składa się z arkuszy blach ułożonych w jednej płaszczyźnie. Poszycie jest usztywnione pionowo lub poziomo. Na niektórych grodziach są stosowane wiązary ( poziome lub pionowe ) podpierające usztywnienia.

Grodzie faliste są wykonywane z odpowiednio ukształtowanych kawałków blach. Dzięki temu nie jest wymagane stosowanie usztywnień ani wiązarów. Powierzchnia takiej grodzi jest gładka. Z tego względu grodzie tego typu są stosowane na zbiornikowcach i masowcach.

Szczegółowe informacje na temat konstrukcji powyższych grodzi są podane w dalszej części niniejszego rozdziału.

#### Typy funkcjonalne grodzi. Obciążenie grodzi.

Na statkach stosowane są 2 typy funkcjonalne grodzi:

- A. Grodzie wodoszczelne;
- B. Grodzie ograniczające zbiorniki.

Zadaniem grodzi typu „A” jest zagwarantowanie wodoszczelności przedziałów kadłuba statku w wypadku wystąpienia awarii w formie rozszczelnienia dna, burty lub pokryw lukowych. Grodzie takie są więc stosowane na drobnicowcach, kontenerowcach, statkach pasażerskich, itp. Charakteryzują się względnie delikatną budową, gdyż dopuszcza się pewne trwałe odkształcenia poszycia i usztywnień pod wpływem obciążenia w formie ciśnienia wody, w stanie awaryjnym. Pojawienie się tego obciążenia jest względnie mało prawdopodobne. Można więc pozwolić na trwałe odkształcenia grodzi ale bez jej rozszczelnienia. Gródź można przecież naprawić po takiej awarii statku.

W przypadku grodzi typu „B” obciążenie ich poszycia w formie ciśnienia cieczy występuje bardzo często, grodzie te stanowią ściany zbiorników ładunkowych, balastowych, itp. Pełnią także oczywiście rolę grodzi typu „A”. W tym przypadku nie można pozwolić na znaczne wartości trwałych ugięć płyt poszycia lub płynięcie plastyczne węzłówek na końcach przęseł usztywnień poszycia. Konstrukcja grodzi typu „B” jest więc bardziej masywna niż grodzi typu „A”.

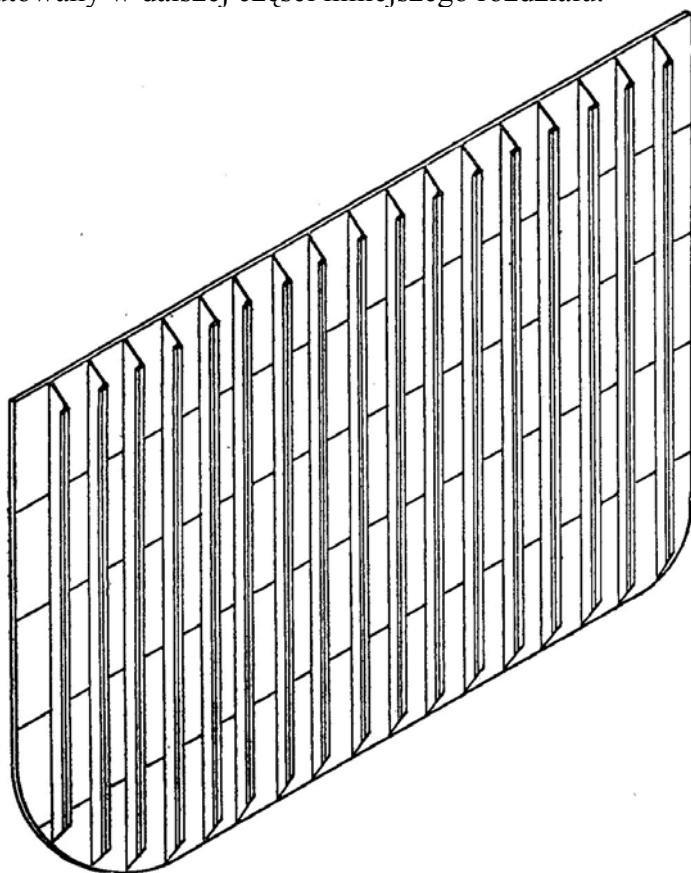
Różnica w wymiarach elementów konstrukcji obu typów grodzi wynika z różnych wartości naprężeń dopuszczalnych przyjmowanych przy wymiarowaniu płyt poszycia wg wzoru ( 14 ) w rozdziale VI. Dla grodzi poprzecznych typu „B” wartość  $\sigma$  wynosi  $160k$  MPa (  $k$  – współczynnik uwzględniający wytrzymałość stali – patrz rozdział XI) a przypadku grodzi typu „A” aż  $220k$  MPa.

Takie same wartości  $\sigma$  jak wyżej są stosowane przy wymiarowaniu usztywnień poszycia grodzi poprzecznych wg wzoru ( 19 ) w rozdziale VI.

## Konstrukcja grodzi płaskich

Najprostszą konstrukcję grodzi poprzecznej małego statku pokazano na rys. XIII.73. Gródź składa się z kilku pasów poszycia ułożonych poziomo i z usztywnień pionowych o końcach ukosowanych, tzn. na końcach usztywnień nie ma węzłówek łączących usztywnienia z innymi elementami konstrukcji kadłuba ( np. z pokładnikami poprzecznymi ).

Na małym statku taka konstrukcja ma wystarczającą wytrzymałość. Problem ten jest dyskutowany w dalszej części niniejszego rozdziału.

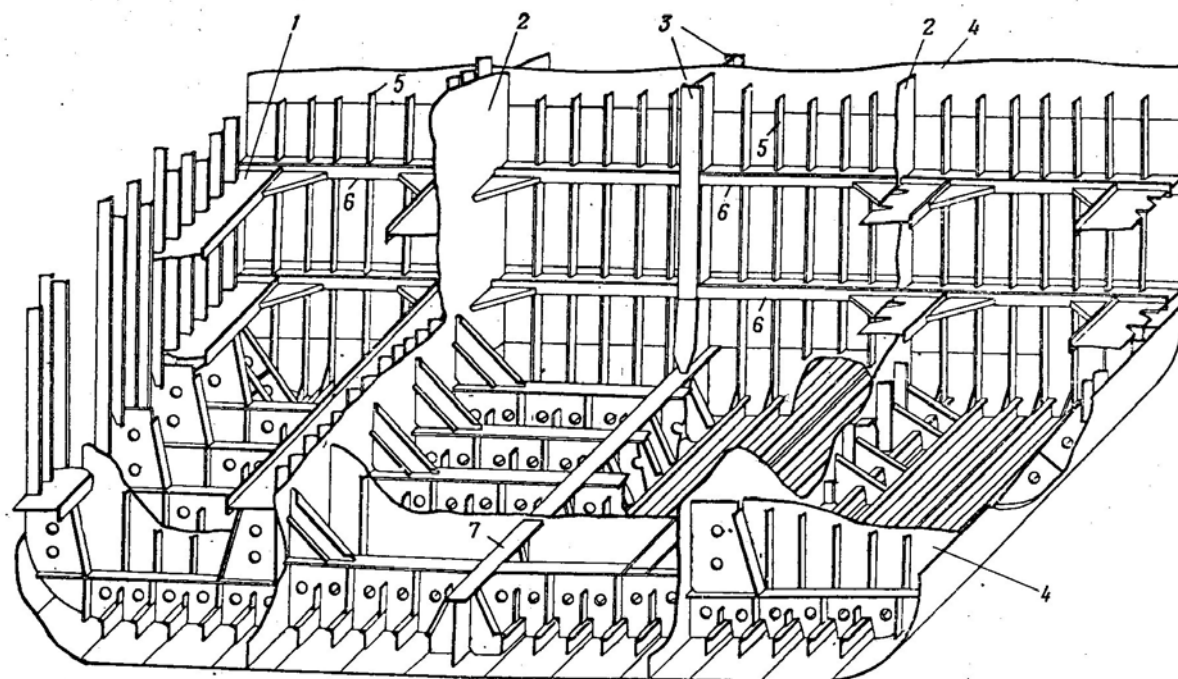


Rys. XIII.73 Gródź poprzeczna małego statku

Fragment konstrukcji poprzecznej grodzi płaskiej dużego zbiornikowca o pojedynczym kadłubie pokazano na rys. XIII.74. Widać tam także wiele innych elementów konstrukcji kadłuba. Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

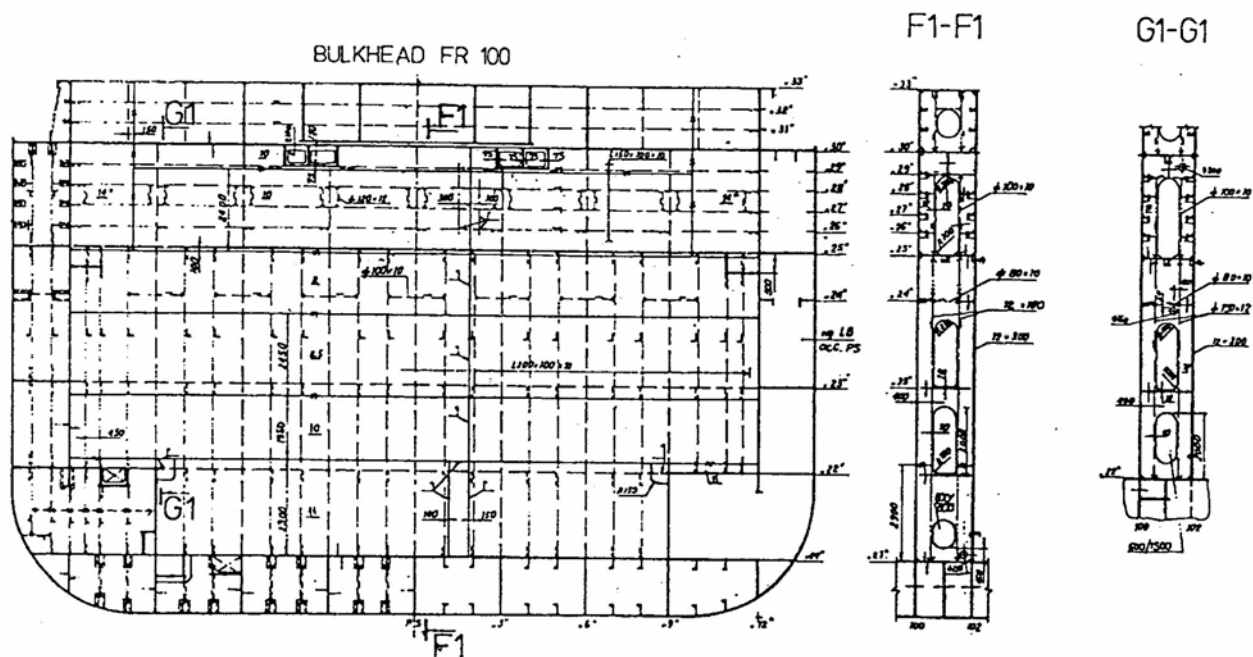
- 1 – wzdłużnik burtowy;
- 2 – gródź wzdłużna;
- 3 – wiązar pionowy grodzi w PS statku;

- 4 – poszycie grodzi poprzecznej;
- 5 – pionowe usztywnienie poszycia grodzi;
- 6 – poziomy wiązary grodzi;
- 7 – denny wzdłużnik środkowy.



Rys. XIII.74 Konstrukcja grodzi poprzecznej dużego tankowca

Na niektórych statkach bywają stosowane grodzie płaskie dwuposzyciowe. Ich zaletą jest to, że w ładowniach statku uzyskuje się gładkie ściany, gdyż usztywnienia i wiązary takiej grodzi są usytuowane pomiędzy poszyciami. Przestrzeń takiej grodzi służy dodatkowo jako zbiornik wysoki ( zbiornik paliwa lub balastu ). Grodzie takie są dość powszechnie stosowane np. na kontenerowcach. Przykład konstrukcji takiej grodzi pokazano na rys. XIII.75.



Rys. XIII.75 Poprzeczna gródź dwupozyciowa na kontenerowcu

#### Poszycie grodzi

Arkusze poszycia grodzi są zazwyczaj układane poziomo. Dzięki temu racjonalnie dostosowuje się grubość blach do wartości obciążeń. Arkusze blach położone najniżej są najgrubsze. Im bliżej pokładu grodziowego tym mniejsza może być grubość blach.

#### Usztywnienia poszycia grodzi

Usztywnienia poszycia grodzi podlegają zginaniu pod działaniem ciśnienia obciążającego gródź.

Usztywnienia mogą być usytuowane pionowo lub poziomo. Konstruktor kadłuba statku dąży bowiem do uzyskania jak najmniejszej wartości rozpiętości przęseł usztywnień – dzięki ich oparciu na pokładach lub poziomych wiązarach ( w przypadku usztywnień pionowych ) albo na burtach, grodziach wzdłużnych lub wiązarach pionowych ( w przypadku usztywnień poziomych ).

Część grodzi może być usztywniona pionowo a część poziomo.

Na małych statkach jednopokładowych usztywnienia mogą sięgać od dna do pokładu – bez podparć pośrednich.

Powyższe cechy konstrukcji grodzi pokazano na rys. XIII.76.

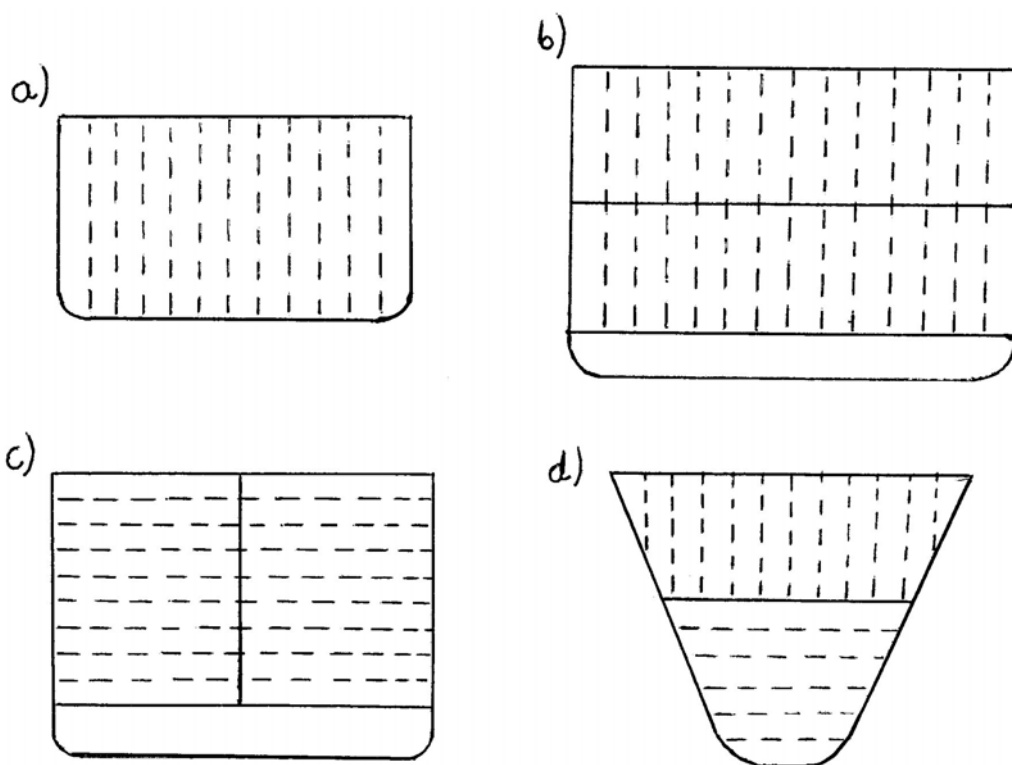
Wariant „a” to racjonalny sposób usztywnienia grodzi małego statku.

Wariant „b” to racjonalny sposób usztywnienia grodzi statku z pokładem dolnym lub z wiązarem poziomym.

Wariant „c” to gródź usztywniona poziomo, gdzie usztywnienia opierają się na grodzi wzdłużnej lub pionowym wiązarze w PS statku.

Gródź w wariantcie „d” jest usztywniona pionowo powyżej pokładu dolnego i poziomo w części dolnej, gdzie odległość pomiędzy burtami jest względnie mała.



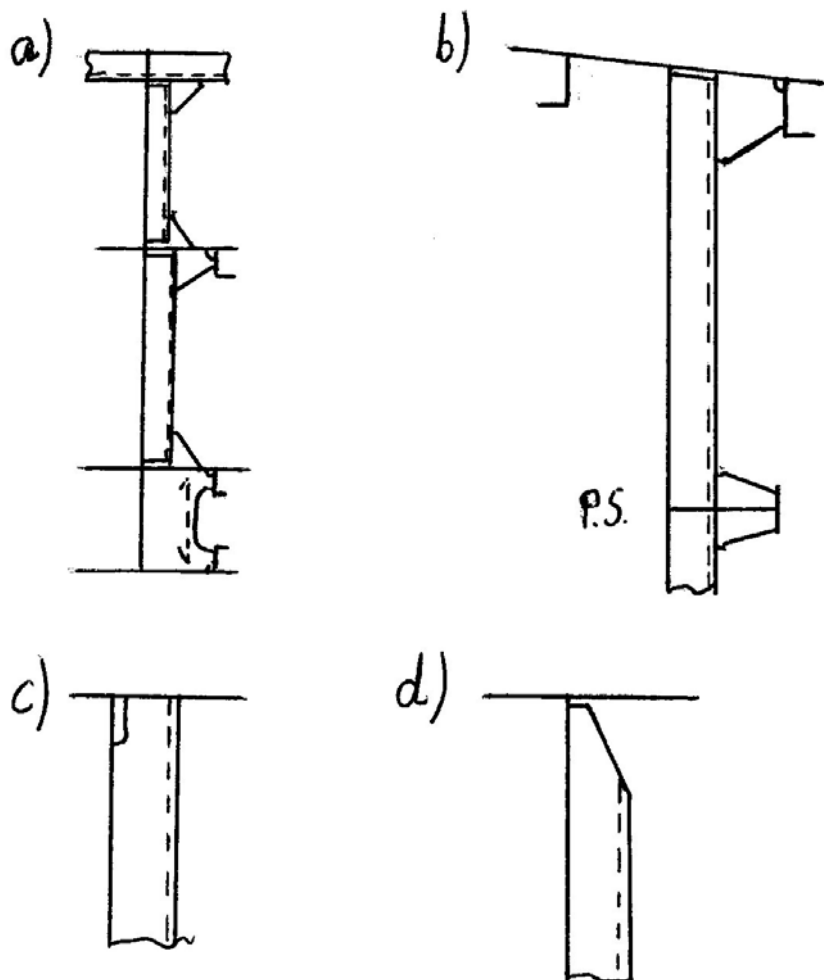


Rys. XIII.76 Różne warianty usztywnienia grodzi płaskich

Końce usztywnień są łączone węzłówkami z pokładami, dnem, burtami lub wiazarami. W przypadku górnych końców usztywnień pionowych mogą być zastosowane połączenia bezwęzłówkowe. Typowe rozwiązania konstrukcyjne pokazano na rys. XIII.77.

Pokazane tam warianty :

- a – pionowe usztywnienie grodzi statku z dnem podwójnym i dolnym pokładem usztywnionymi poprzecznie i pokładem górnym usztywnionym wzdłużnie; przęsła usztywnień mają różną wysokość;
- b – poziome usztywnienie grodzi połączone węzłówkami z pionowym wręgiem burtowym i z pionowym wiazarem w PS statku;
- c – górny koniec pionowego usztywnienia grodzi połączony z poszyciem pokładu grodziowego bez węzłówki;
- d – górny koniec pionowego usztywnienia grodzi ukosowany przy pokładzie grodziowym.



Rys. XIII.77 Przykładowe warianty połączenia usztywnień grodzi z innymi elementami konstrukcji kadłuba

Warianty „c” i „d” bywają stosowane na mniejszych statkach.

W wariantcie „d” siła reakcji poziomej działająca na górny koniec usztywnienia jest wynikiem działania naprężeń stycznych w poszyciu grodzi, o kierunku prostopadłym do poszycia. Poszycie powinno więc być odpowiednio grube. Wg Przepisów [1] jego grubość ( w milimetrach ) nie powinna być mniejsza niż:

$$t = 1,25 \sqrt{\frac{(l - 0,5s)p}{k}}$$

gdzie:

$l$  – rozpiętość usztywnienia ( w metrach );

$s$  – odstęp usztywnień ( w metrach );

$p$  – ciśnienie obliczeniowe w środku rozpiętości przęsła usztywnienia ( w kPa );

$k$  – współczynnik uwzględniający wytrzymałość stali (  $k = 1,0$  dla stali NW ).

#### Grodzie dwuposzyciowe

Przykładową konstrukcję takiej grodzi pokazano na rys. XIII.75. Jest to gródź kontenerowca. Podobne grodzie bywają stosowane na zbiornikowcach.

Zalety takich grodzi:

- powierzchnie grodzi od strony ładunku są gładkie ( łatwe jest np. mycie zbiorników);
- możliwe jest uzyskanie względnie dużej wytrzymałości grodzi na obciążenie poprzeczne

- przy umiarkowanych grubościach blach poszyć;  
- przestrzeń wewnątrz grodzi może być wykorzystywana jako zbiornik balastowy.

### Grodzie przelewowe

Takie grodzie bywają stosowane na zbiornikowcach. Są one stosowane pomiędzy klasycznymi grodziami. Mają podobną konstrukcję do grodzi na końcach zbiorników ale nie są szczelne, gdyż w ich poszyciu są stosowane niewielkie otwory umożliwiające przepływ ładunku płynnego lub balastu wodnego. Zastosowanie grodzi przelewowych powoduje zmniejszenie obciążeń na grodzie w warunkach sloshingu.

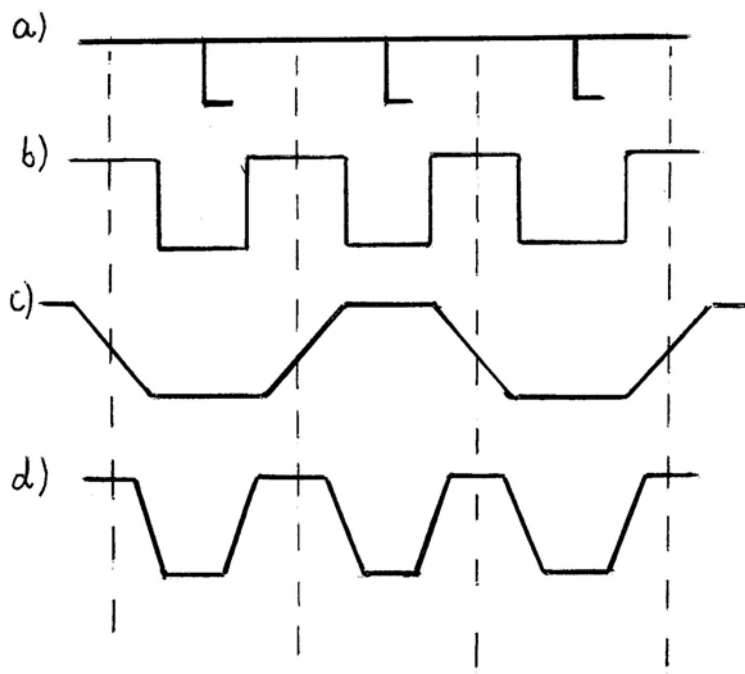
### **Konstrukcja grodzi falistych ( profilowanych )**

Grodzie tego typu są powszechnie stosowane na statkach do transportu ładunków sypkich lub płynnych luzem, tzn. na masowcach, tankowcach, chemikaliowcach.

Zaletą takich grodzi jest ich gładka powierzchnia, na której nie zalega ładunek masowy.

Usztywnienia grodzi nie są wymagane dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu blach grodzi. Problem wyjaśnia rys. XIII.78. Wariant „a” to przekrój płaszczyzną poziomą przez klasyczną gródź usztywnioną pionowo. Równoważną konstrukcję grodzi pod względem wytrzymałości na obciążenie poprzeczne można uzyskać poprzez odpowiednie ukształtowanie blach grodzi – jak w wariantach „b”, „c” i „d”. Grodzie o takiej konstrukcji nazywamy grodziami falistymi lub profilowanymi. Nie wymagają one stosowania usztywnień poszycia jak w wariantcie „a”. O grodzi w wariantcie „b” powiemy, że jest to gródź o falach prostokątnych. Warianty „c” i „d” to grodzie o falach trapezowych.

W praktyce są jeszcze stosowane grodzie lub przegrody o falach półokrągłych ale raczej na mniejszych statkach ( np. ścianki wewnętrzne w nadbudówkach ).



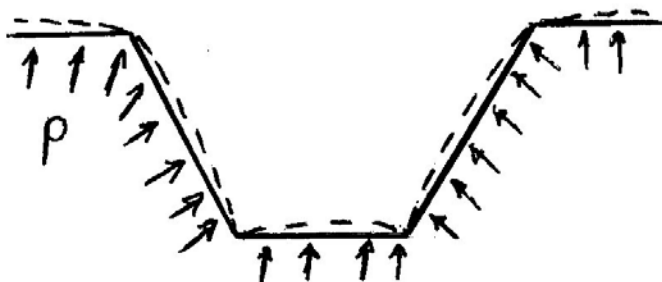
Rys. XIII.78 Najbardziej popularne sposoby ukształtowania blach grodzi falistych

Oprócz grodzi o falach pionowych ( jak na rys. XIII.78 ) bywają jeszcze stosowane grodzie o falach poziomych – przede wszystkim na chemikaliowcach. Konstrukcja takich grodzi jest omówiona w dalszej części niniejszego rozdziału.

### Napężenia w grodzi falistej

Blachy grodzi są zginane lokalnie ciśnieniem ładunku sypkiego, płynnego lub wody w warunkach awaryjnego zatopienia przedziału statku. Występuje tutaj analogia do zginania poszycia klasycznych grodzi płaskich. Problem wyjaśnia rys. XIII.79.

Aby uzyskać odpowiednią wytrzymałość blach grodzi w warunkach takiego zginania należy zastosować odpowiednio grube blachy. Na statku wielkości 'panamax' ( masowcu lub tankowcu ) grubość tych blach może być rzędu 14 mm do 20 mm ( orientacyjnie ) a długości boków blach widoczne na rys. XIII.79 będą rzędu 700 mm do 1000 mm.



Rys. XIII.79 Lokalne zginanie blach grodzi

Element konstrukcji grodzi odpowiadający pojedynczemu usztywnieniu grodzi płaskiej wraz z pasem poszycia o szerokości równej odstępowi usztywnień nazywamy **pojedynczą falą grodzi**. Jej przekrój poprzeczny składa się z dwóch mocników o szerokości  $\frac{1}{2}s$  ( patrz rys. XIII.80) oraz środnika o wysokości  $h_g$ .

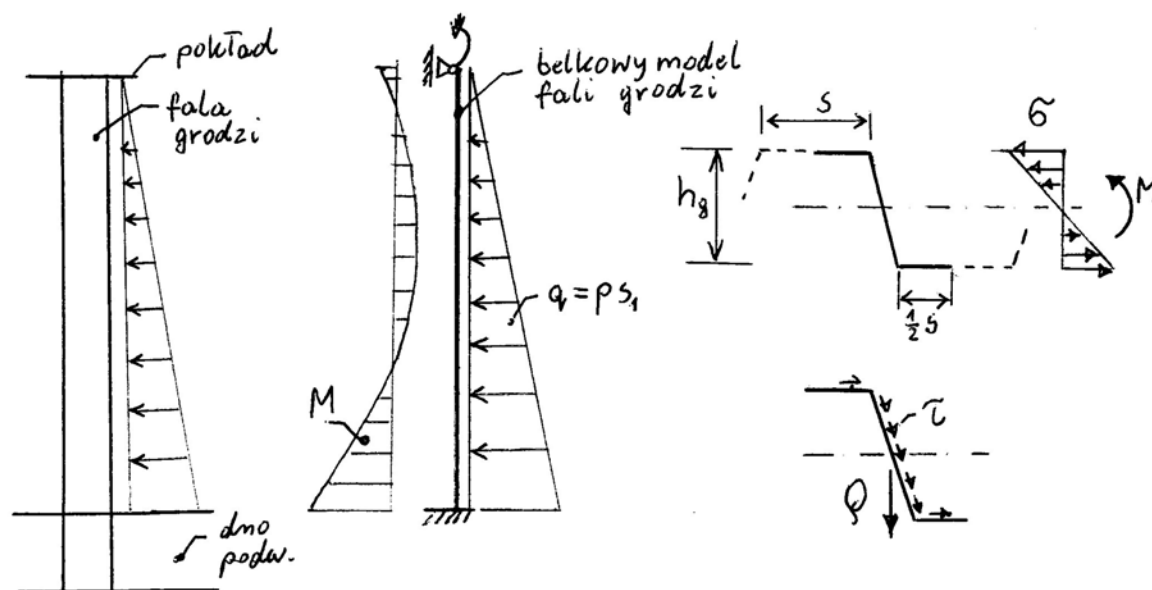
Pojedyncza fala grodzi podlega zginaniu ogólnemu ciśnieniem  $p$  ładunku lub wody ( lewa strona rys. XIII.80 ).

Modelem obliczeniowym zginanej pojedynczej fali grodzi jest belka pokazana na rys.

XIII.80. Belka jest obciążona obciążeniem ciągłym  $q=ps_l$  (  $s_l$  oznacza szerokość pojedynczej fali grodzi ). W pierwszym przybliżeniu można uznać, że belka jest utwierdzona na dolnym końcu ( na poziomie dna wewnętrznego ) i sprężysto podparta na obrót na końcu górnym. Sprężystość podpory to wynik współpracy z konstrukcją pokładu.

Rozkład momentu zginającego  $M$  wzdłuż osi belki pokazano na rys. XIII.80. Moment  $M$  wywołuje naprężenia normalne  $\sigma$  o rozkładzie w przekroju fali grodzi jak pokazano z prawej strony rysunku. Dla zapewnienia wystarczającej wytrzymałości grodzi w warunkach takiego zginania należy zastosować odpowiednio duże wartości parametrów  $h_g$  i  $s$  oraz grubości blach grodzi.

W belce jak na rys. XIII.80 powstają także siły ścinające  $Q$ , których efektem są naprężenia styczne  $\tau$  w blachach grodzi, pokazane w prawym dolnym rogu rys. XIII.80. Aby nie przeciążyć materiału blach grodzi należy zastosować odpowiednio duże wartości  $h_g$  i grubości blach.



Rys. XIII.80 Zginanie pojedynczej fali grodzi

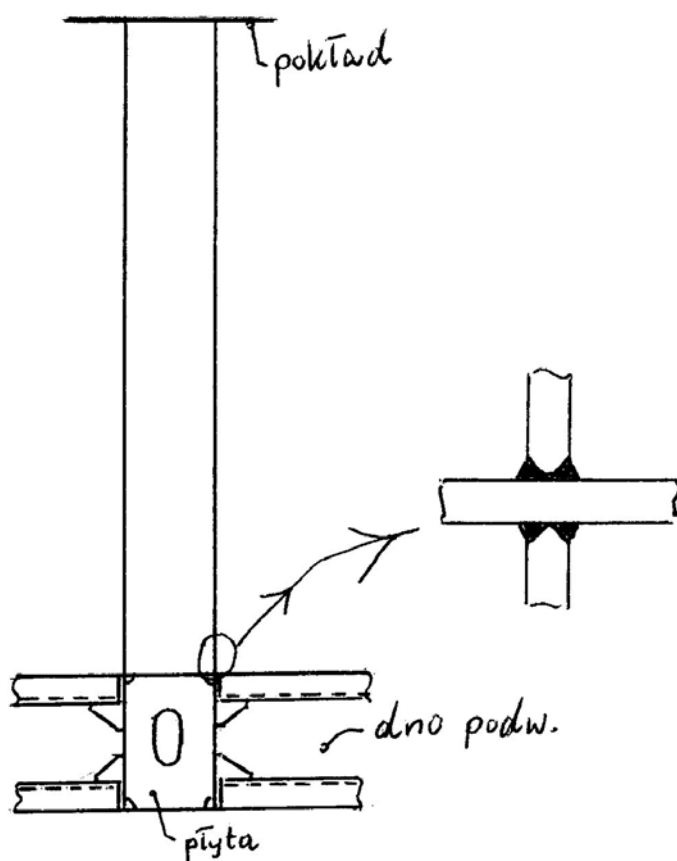
#### Najprostszy wariant konstrukcji grodzi o falach pionowych

Jest to gródź o falach prostokątnych rozciągających się od dna wewnętrznego do pokładu (rys. XIII.81). W dnie podwójnym, w płaszczyznach mocników fal grodzi, zastosowane są denniki, które przejmują naprężenia  $\sigma$  (patrz rys. XIII.80). Ze względu na wysoki poziom naprężeń  $\sigma$  zalecane jest zastosowanie spawania fal grodzi i denników do płyt dna wewnętrznego „na pełny przetop”, co pokazano na poniższym rysunku.

Mocniki fal są podparte przez pionowe płyty w dnie podwójnym, ustawione w płaszczyznach środków fal i wzdłużnych usztywnień dna wewnętrznego i zewnętrznego. Szerokość mocników fal jest więc równa odstępowi wzdłużnych usztywnień dna.

W przypadku grodzi o falach trapezowych nie ma możliwości efektywnego podparcia środków fal przez elementy konstrukcji dna podwójnego. Pomimo to trapezowe fale grodzi są stosowane dość powszechnie.

Górny koniec fal grodzi może być spawany wprost do blach poszycia przewiązki międzylukowej pokładu, która zazwyczaj jest usztywniona poprzecznie.



Rys. XIII.81 Najprostszy wariant grodzi falistej

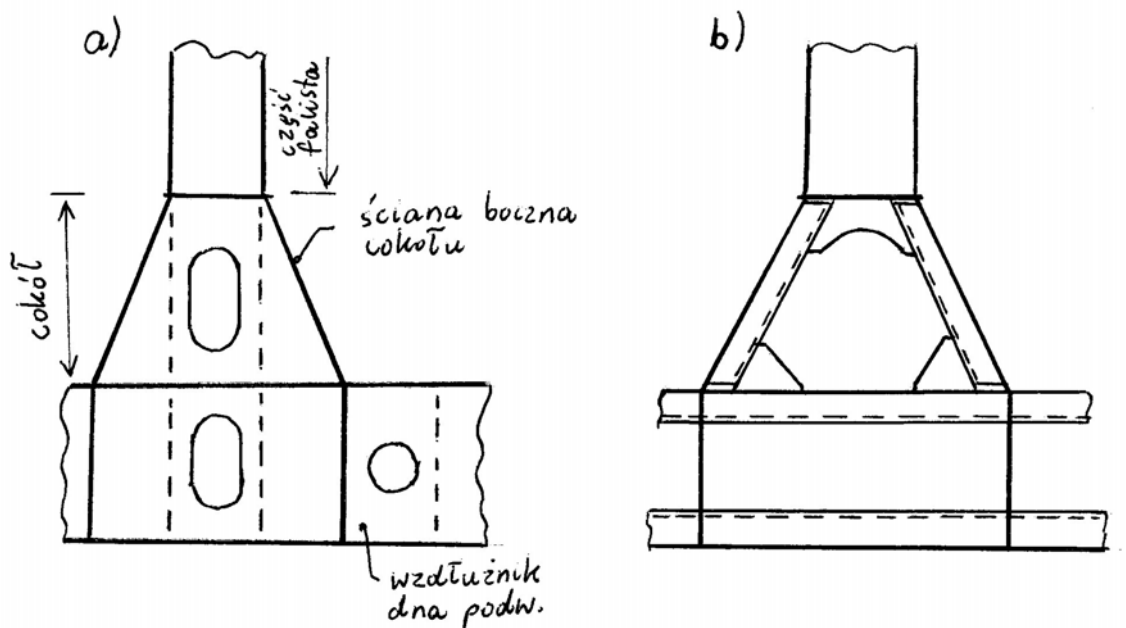
#### Gródź z cokołem

Zastosowanie prostej konstrukcji grodzi na dużym statku, pokazanej na rys. XIII.81, prowadziłoby do bardzo grubych blach grodzi. Popularnym rozwiązaniem jest więc zmniejszenie rozpiętości fal grodzi poprzez ustawienie części falistej na konstrukcji skrzyniowej o pochyłych ale gładkich ścianach, zwanej cokołem grodzi (rys. XIII.82). Dzięki temu można zastosować względnie delikatną konstrukcję części falistej.

Konstrukcja cokołu rozszerzająca się w kierunku dna wewnętrznego, zapewnia odpowiednią wytrzymałość grodzi na obciążenia poprzeczne. Denniki ustawione pod dolnymi krawędziami pochyłych ścian cokołu zapewniają solidne podparcie cokołu na dnie podwójnym. Wiązary i usztywnienia ścian cokołu znajdują się w jego wnętrzu co zapewnia funkcjonalność statku.

Przestrzeń w cokole jest zazwyczaj wykorzystywana jako zbiornik balastu wodnego.

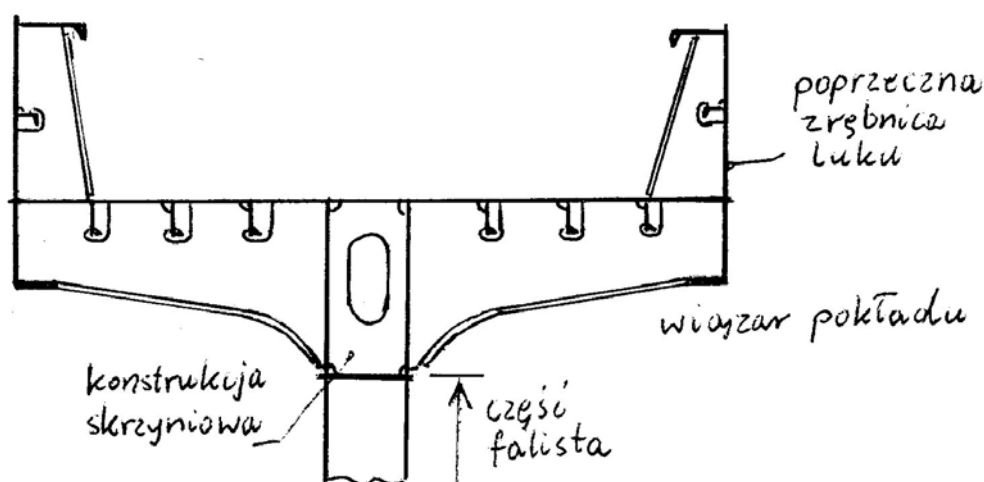
W płaszczyznach wzdłużników dna podwójnego stosowane są przegrody pokazane w części „a” rysunku XIII.82 a w płaszczyznach wzdłużnych usztywnień dna stosowane są usztywnienia ścian cokołu (część „b” rysunku).



Rys. XIII.82 Gródź falista z cokołem

#### Górna konstrukcja skrzyniowa grodzi

W górnej części falistej części grodzi wymagane jest jej dobre powiązanie z konstrukcją pokładu. Warunek ten można łatwo spełnić poprzez zastosowanie nad falistą częścią grodzi konstrukcji skrzyniowej ( patrz rys. XIII.83) , przypominającej fragment grodzi 2-poszyciowej. Konstrukcję taką łatwo jest powiązać z wiązarami poprzecznej przewiązki łuku, które podpierają usztywnienia poszycia przewiązki.



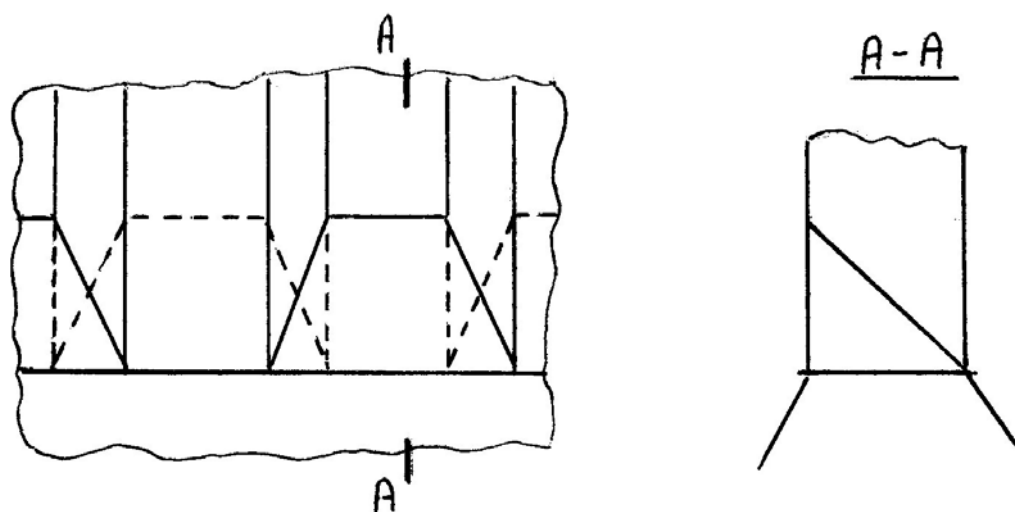
Rys. XIII.83 Górna konstrukcja skrzyniowa grodzi

#### Płyty usypowe

W dolnej części falistych grodzi masowców zazwyczaj są stosowane tzw. płyty usypowe ( rys. XIII.84). Są to pochyle płyty zamykające fragmenty przestrzeni nad dnem wewnętrznym



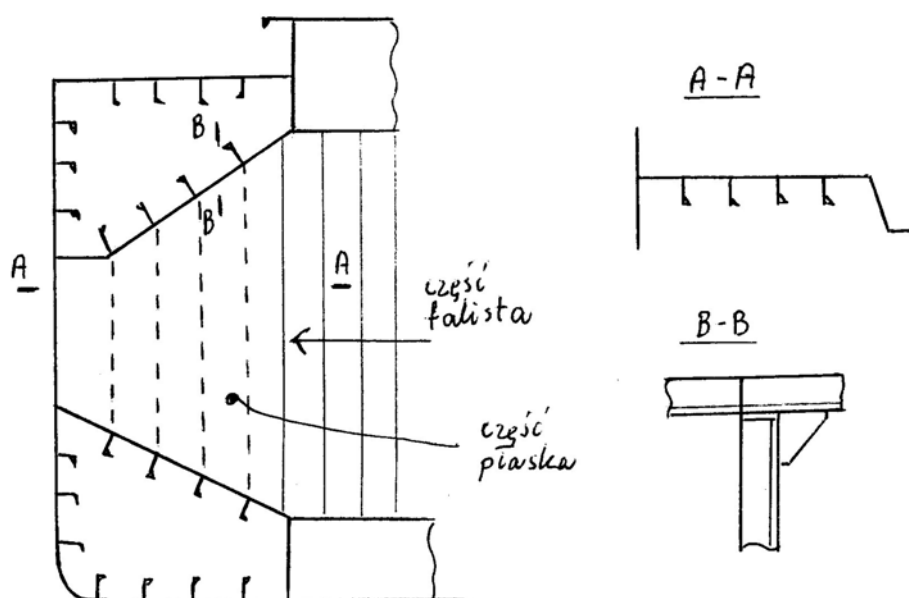
lub cokołem grodzi. Ich rolą jest zapewnienie samoczynnego zsuwania się ładunku poza obszar grodzi, w trakcie rozładunku statku.



Rys. XIII.84 Płyty usypowe grodzi falistej

#### Płaskie fragmenty grodzi falistych

Na masowcach kształt grodzi poprzecznych w pobliżu burt, gdzie stosowane są tzw. zbiorniki obłowe i zbiorniki szczytowe, jest skomplikowany. Zamontowanie w tym rejonie grodzi falistej jest trudnym problemem – zwłaszcza ze względu na konieczność solidnego powiązania grodzi z sąsiednimi fragmentami konstrukcji kadłuba. Z tego względu przy burtach masowców zazwyczaj są stosowane płaskie fragmenty grodzi z usztywnieniami pionowymi, które łatwo można powiązać węzłówkami z wzdłużnymi usztywnieniami pochyłych ścian zbiorników obłowego i szczytowego (rys. XIII.85).



Rys. XIII.85 Gródź falista masowca z płaskimi fragmentami przy burtach

#### Grodzie wodoszczelne a grodzie zbiorników ładunkowych

Na masowcach grodzie między ładowniami to tzw. grodzie wodoszczelne (oprócz grodzi ładowni balastowych). Ich rolą jest zapobieganie przedostawania się wody do sąsiednich

ładowni po awaryjnym zalaniu wodą dowolnej ładowni. W takich sytuacjach dopuszcza się niewielkie płynięcie plastyczne materiału grodzi w najbardziej naprężonych rejonach ale gródź ma zachować szczelność.

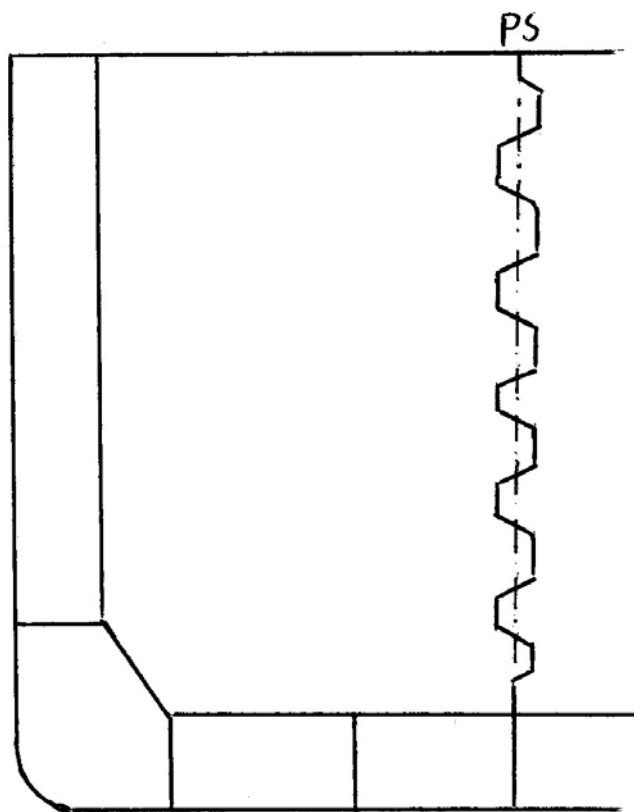
W przypadku ładowni balastowych obciążenie grodzi ciśnieniem wody to normalny stan eksploatacyjny i gródź musi mieć większy zapas wytrzymałości niż gródź wodoszczelna. Wynika stąd, że grodzie ładowni balastowej muszą mieć mocniejszą konstrukcję ( np. grubsze blachy, wyższe cokoły, itp.) niż grodzie wodoszczelne. Podobnie jest w przypadku grodzi zbiornikowców.

#### Grodzie faliste o falach poziomych

Tego typu grodzie bywają stosowane np. na chemikaliowcach. Przykład grodzi wzdłużnej o takiej konstrukcji pokazano na rys. XIII.86. Zbiorniki ładunkowe chemikaliowca są zazwyczaj względnie krótkie i gródź pokazana na poniższym rysunku jest wystarczająco wytrzymała przy umiarkowanej grubości blachy i niezbyt dużych wymiarach boków fal.

Gródź wzdłużna obciążona poprzecznie opiera się bowiem na grodziach poprzecznych.

Na niektórych statkach można spotkać grodzie poprzeczne o falach poziomych. Problem ten nie będzie jednak omawiany w ramach niniejszego wykładu.



Rys. XIII.86 Wzdłużna gródź falista chemikaliowca

## G. POSZYCIE KADŁUBA. POSZYCIE POKŁADÓW

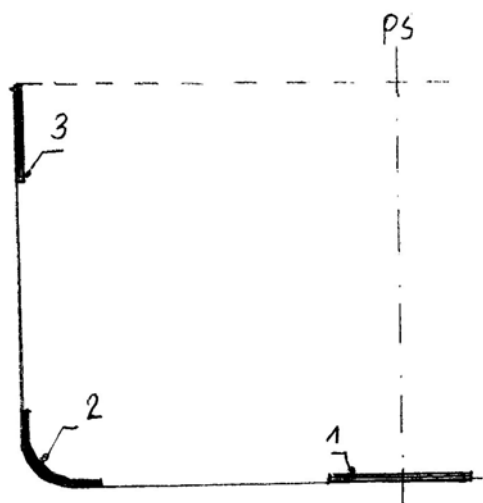
### Poszycie kadłuba

Termin „poszycie kadłuba” oznacza zwyczajowo poszycie dna i poszycie burt. Poszycie kadłuba statku to podstawowy element konstrukcji zapewniający odpowiednią wytrzymałość ogólną i lokalną. Poszycie dna leży najdalej od osi obojętnej przekrojów poprzecznych kadłuba (poniżej tej osi). Przenosi więc ono znaczące na ogół wartości naprężeń  $\sigma$  od zginania ogólnego kadłuba w płaszczyźnie pionowej. Poszycie burt przenosi naprężenia  $\tau$  od zginania ogólnego kadłuba w płaszczyźnie pionowej. W poszyciu burt występują także ekstremalne wartości naprężeń  $\sigma$  od zginania kadłuba w płaszczyźnie poziomej. Blachy poszycia podlegają zginaniu lokalnemu wskutek ciśnień wody od zewnątrz kadłuba.

Poszycie kadłuba składa się z arkuszy blach ułożonych wzdłuż osi statku. Blachy te są spawane doczołowo. Połączenia krawędzi blach wzdłuż kadłuba nazywamy *szwami* a w płaszczyznach poprzecznych – *stykami*.

Wyróżnić należy następujące elementy poszycia (patrz rys. XIII.87):

- 1 – stępka płaska (na mniejszych statkach może być zastosowana stępka belkowa a dno będzie typu „V”);
- 2 – pas obłowy;
- 3 – mocnica burtowa.



Rys. XIII.87 Główne elementy poszycia

Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych podają minimalne szerokości i grubości powyższych elementów poszycia. Np. wg [1] szerokość stępki płaskiej nie może być mniejsza niż (w milimetrach):

$$b = 800 + 5L_0$$

gdzie:

$L_0$  – długość obliczeniowa statku, w metrach.

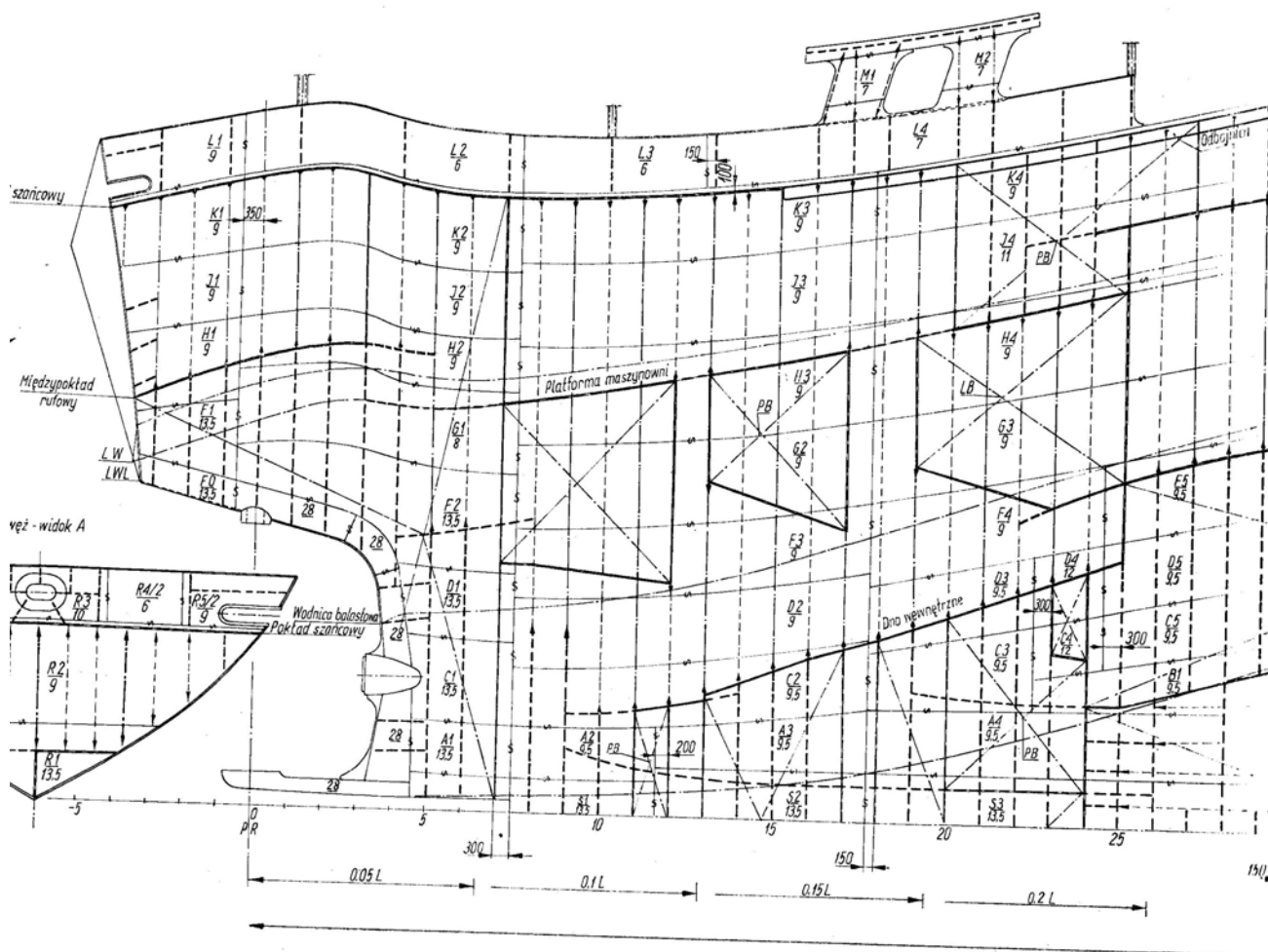
Grubość stępki nie powinna być przy tym mniejsza niż grubość sąsiednich pasów poszycia dna.

### Rozplanowanie układu arkuszy poszycia

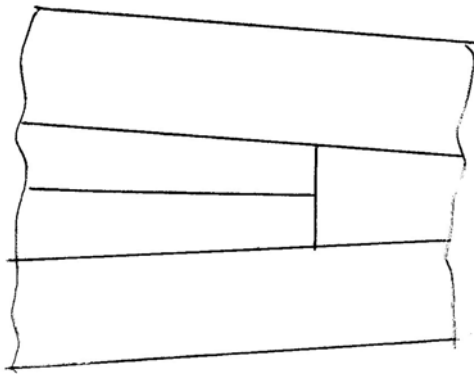
Układ arkuszy poszycia statku jest pokazywany na standardowym rysunku zwanym „rozwiniecie poszycia”. Jest to jeden z kilku podstawowych elementów tzw. dokumentacji kadłubowej statku. Fragment takiego rysunku pokazano niżej (rys. XIII.88).

Rysunek pokazuje całe poszycie dna i burty „rozwinęte”, tzn. linie poszczególnych wręgów zostają wyprostowane i ułożone na wspólnej płaszczyźnie. Pokazane są krawędzie poszczególnych arkuszy blach poszycia.

Na rysunku pokazuje się także usytuowanie istotnych elementów kadłuba stykających się z poszyciem, takich np. jak krawędź dna wewnętrznego, krawędzie pokładów i grodzi poprzecznych, linie styku z poszyciem środników usztywnień i wiązarów burty. Ułatwia to rozplanowanie arkuszy blach poszycia, których krawędzie nie powinny stykać się z liniami określonymi wyżej i powinny zachować odpowiednio dużą odległość od nich (zazwyczaj nie mniejszą niż 100 mm). Arkusze blach nie powinny także być wytracane „klinowo”. Oznacza to, że „wytracanie” arkuszy blach należy wykonywać wg zasady zilustrowanej na rys. XIII.89.



Rys. XIII.88 Fragment rozwinięcia poszycia



Rys. XIII.89 Sposób „wytracania” arkuszy blach

Proces konstruowania poszycia kadłuba statku rozpoczyna się od rozmieszczenia stępki płaskiej i mocnicy burtowej, które w zasadzie powinny zachowywać stałe szerokości na całej długości statku. Następnie planuje się rozmieszczenie pasów obłowych – tak aby jak najłatwiej je ukształtować w procesie gięcia blach.

W ostatniej kolejności rozmieszcza się pozostałe arkusze blach poszycia.

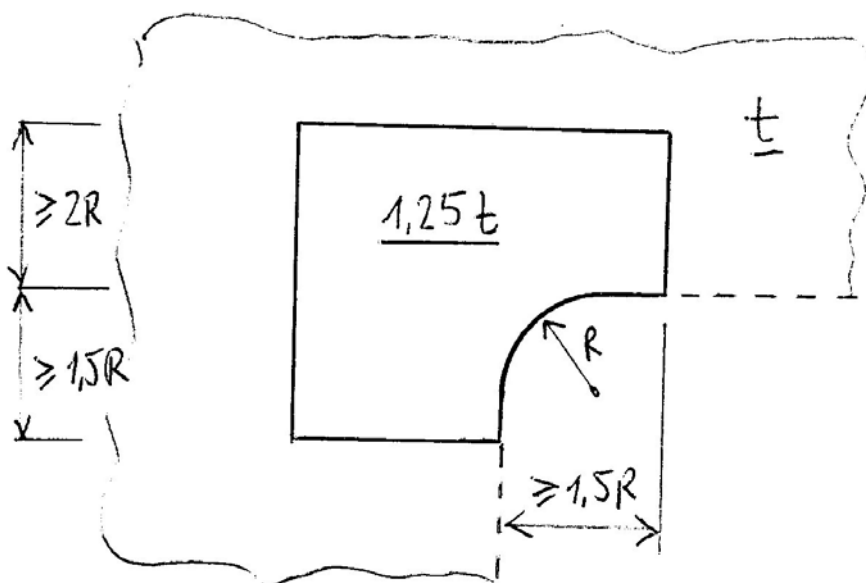
### **Poszycie pokładów**

Poszycie pokładu wytrzymałościowego ma największy wpływ na wartość wskaźnika wytrzymałości przekroju kadłuba, wymaganą wg kryterium wytrzymałości kadłuba statku w warunkach zginania ogólnego.

Arkusze blach tworzących to poszycie są układane wzdłuż osi statku. Tylko poszycie przewiązek międzylukowych na ogół jest wykonywane z arkuszy blach ułożonych poprzecznie w stosunku do osi statku.

Na niższych pokładach statku i pokładach nadbudówek lub pokładówek układ arkuszy blach poszycia może być dowolny.

Szczególnie starannie należy konstruować naroża luków ładunkowych w pokładzie wytrzymałościowym – aby uniknąć pęknięcia zmęczeniowego. Wymagana jest odpowiednio duża wartość promienia zaokrąglenia naroża luku i zgrubienie poszycia w tym rejonie (rys. XIII.90).



Rys. XIII.90 Poszycie pokładu wytrzymałościowego w rejonie naroża łuku ładunkowego

Promień zaokrąglenia naroża łuku pokładu wytrzymałościowego wg [1] nie powinien być mniejszy niż:

$$R = 0,03(1,5 + \frac{a}{b})(B_1 - b)$$

gdzie:

$B_1$  – szerokość pokładu w miejscu usytuowania naroża łuku;

$b$  – szerokość otworu łukowego;

$a$  – szerokość przewiązki między lukami.

Wymagane wymiary płyty zgrubionego poszycia pokazano na rys. XIII.90.

Stosowane są także naroża łuków o kształcie łuku elipsy. To zagadnienie nie jest omawiane w ramach niniejszego wykładu.

## H. SKRAJNE CZĘŚCI KADŁUBA

### Dziobowa część kadłuba

**Dziobowa część kadłuba** to fragment kadłuba o długości równej  $\frac{1}{4}$  długości statku.

**Skrajnik dziobowy** to część kadłuba przed grodzią zderzeniową.

Specyficzne cechy konstrukcji dziobowej części kadłuba mają związek ze skomplikowanym kształtem kadłuba i zwiększonymi obciążeniami od morza w tym rejonie.

Specyficzne cechy obciążeń konstrukcji dziobowej części kadłuba:

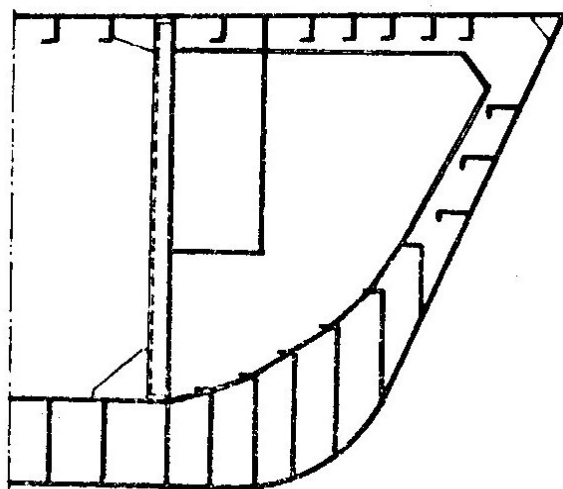
- a) występują obciążenia od slemingu i slemingu burtowego;
- b) mogą wystąpić uderzenia kotwic lub łańcuchów kotwicznych;
- c) może wystąpić zderzenie z nabrzeżem lub z innym obiektem pływającym;
- d) względnie mała siła wyporu w tym rejonie nie jest w stanie zrównoważyć siły ciężkości konstrukcji wraz z elementami wyposażenia oraz ciężarem balastu w skrajniku.

Z powyższych cech obciążeń wynika konieczność powiązania konstrukcji skrajnika dziobowego z pozostałą częścią kadłuba – np. poprzez zastosowanie kilku wzdłużników burtowych.

Konieczne może być wzmocnienie konstrukcji dna poprzez zastosowanie względnie grubego poszycia, zmniejszenie odstępów wręgowego (odstępów usztywnień), solidne usztywnienie płyt denników i wzdłużników dennych, itp.

Stosowany jest zazwyczaj poprzeczny system usztywnień – ze względu na skomplikowany kształt kadłuba.

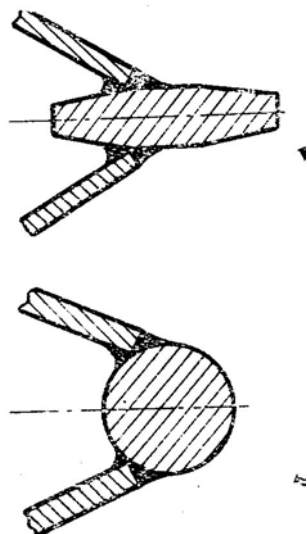
Konstrukcję skrajnika dziobowego niewielkiego statku pokazano na rys. XIII.91. Charakterystyczną cechą tej konstrukcji jest dno pojedyncze z jednym tylko wzdłużnikiem dennym, który przechodzi wprost w dziobnicę (dziobnica to element konstrukcji łączący burty). Wysokość denników jest w przybliżeniu stała a ich wierzchołki są zagięte.



Rys. XIII.91 Skrajnik dziobowy niewielkiego statku



Dziobnice małych statków mogą mieć formę belkową, tzn. blachy poszycia burt są spawane do masywnego elementu kutego ( patrz rys. XIII.92).



Rys. XIII.92 Przykłady dziobnic belkowych

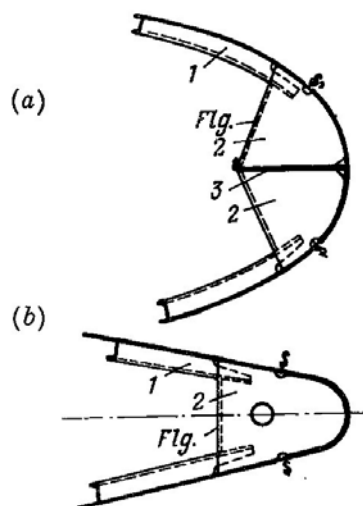
Dziobnice statków średniej wielkości i dużych są wykonywane jako konstrukcje spawane. Przykłady takich dziobnic pokazano na rys. XIII.93. Pokazano tam przekroje przez dziób statku płaszczyzną poziomą.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

1 – wzdlużne usztywnienie burty;

2 – węzłówki dziobnicy;

3 – wiązlar w PS statku.

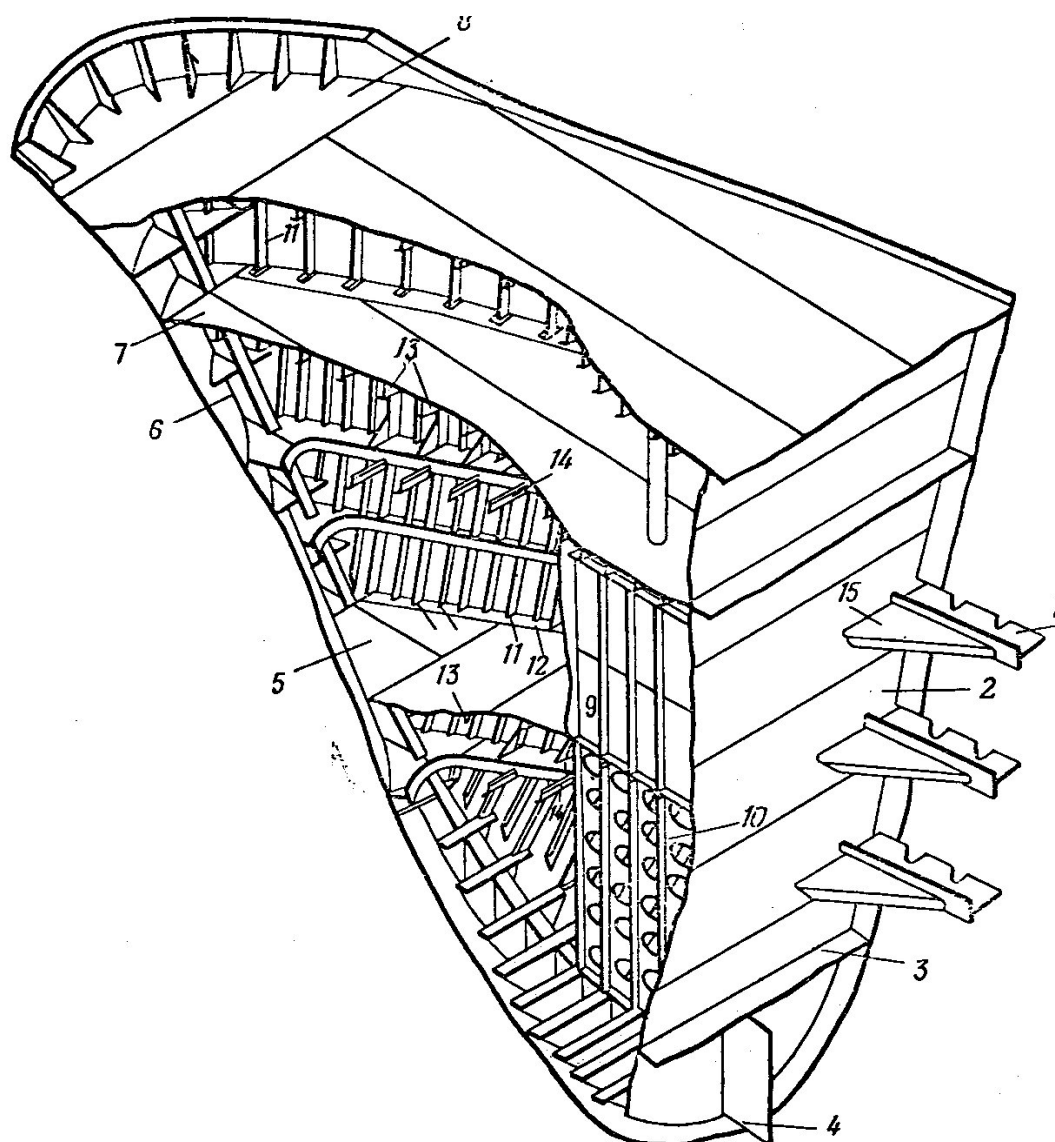


Rys. XIII.93 Przykłady dziobnic spawanych

Konstrukcję skrajnika dziobowego średniej wielkości pokazano na rys. XIII.94. Jest to statek z tzw. wzmocnieniami lodowymi, które sprowadzają się głównie do zgrubienia poszycia w rejonie tzw. pasa lodowego i zastosowania tzw. międzywęgów. Zagadnienie wzmocnień lodowych jest dyskutowane w dalszej części wykładu.

Znaczenie symboli cyfrowych na rys. XIII.94:

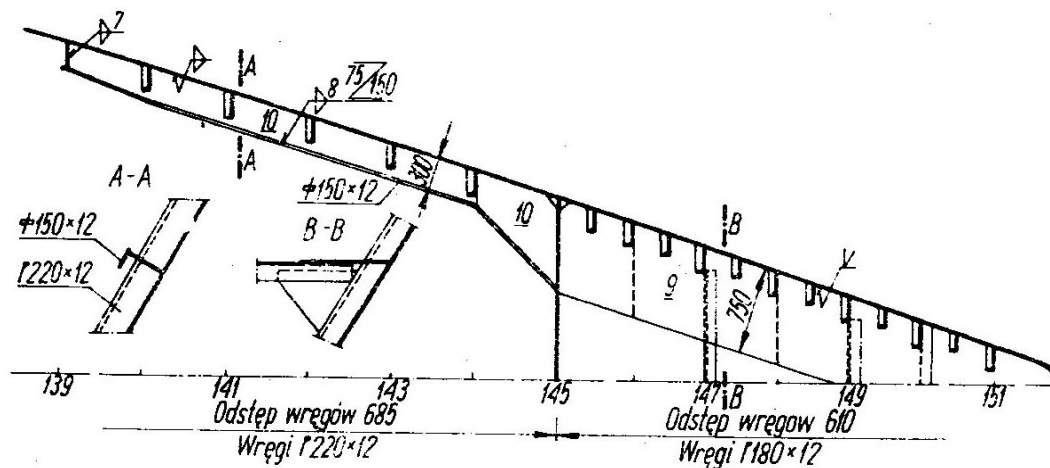
- 1 – wzdluznik burtowy;
- 2 – gródz zderzeniowa;
- 3 – dno wewnętrzne;
- 4 – denny wzdluznik srodkowy;
- 5 – platforma;
- 6 – dziobnica;
- 7 – pokład górny;
- 8 – pokład dziobówki;
- 9 – komora łańcucha kotwiczego;
- 10 – przegroda wzdluzna w PS;
- 11 – wręg;
- 12 – międzywręg;
- 13 – pokładniki;
- 14 – poziome rozpornice wzdluzników burtowych;
- 15 – węzłówka.



Rys. XIII.94 Skrajnik dziobowy statku średniej wielkości

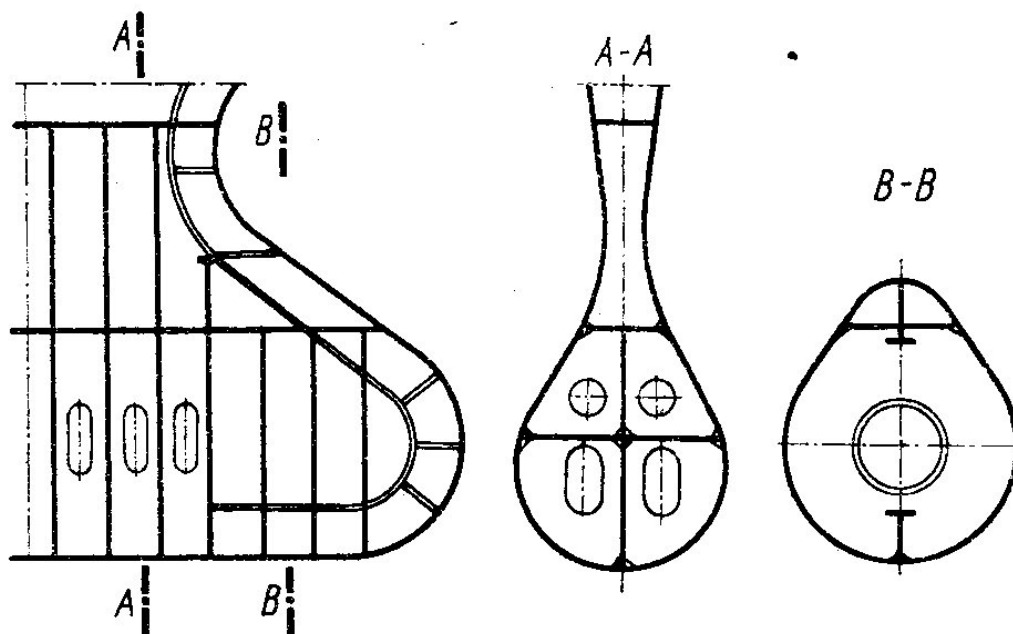
Istotne elementy konstrukcji skrajnika pokazanego na rys. XIII.94 to platformy i wzdłużniki burtowe, które podpierają wręgi burtowe i międzywręgi. Wzdłużniki burtowe są dodatkowo wzmocnione poziomymi rozpornicami (poz. 14 na rys. XIII.94). Wzdłużniki burtowe skrajnika są kontynuowane na pewną odległość poza gródź zderzeniową. Dzięki temu konstrukcja jest dostosowana do przejmowania momentu zginającego kadłub statku w stanie balastowym, z zapelnionym zbiornikiem balastowym w skrajniku.

Przykład konstrukcji takiego wzdłużnika pokazano dodatkowo na rys. XIII.95.



Rys. XIII.95 Typowy wzdłużnik dziobowy w dziobowej części statku

Konstrukcja skrajnika dziobowego staje się jeszcze bardziej skomplikowana, gdy stosowany jest dziób gruszkowy. Przykład konstrukcji części skrajnika dziobowego w rejonie gruszki dziobowej pokazano na rys. XIII.96.



Rys. XIII.96 Konstrukcja dziobu gruszkowego statku

## Rufowa część kadłuba

Rufową część kadłuba utożsamiamy z tzw. skrajnikiem rufowym czyli fragmentem kadłuba za grodzią zderzeniową.

Najważniejszy wpływ na konstrukcję skrajnika rufowego mają usytuowane bezpośrednio przy nim śruby napędowe i stery.

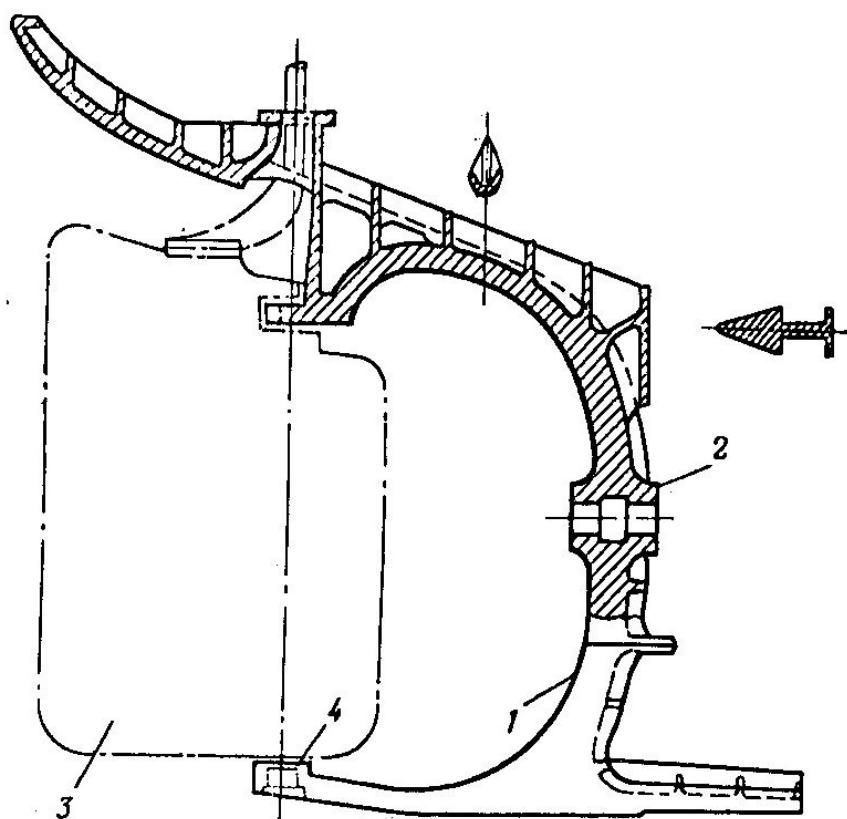
Niżej przedstawiono tylko konstrukcję skrajnika rufowego statku z jedną śrubą napędową i jednym sterem.

Podstawowym elementem konstrukcji jest *tylnica*, która zawiera piastę wału śrubowego i umożliwia zawieszenie steru.

Przykładową tylnicę w formie odlewu staliwnego pokazano na rys. XIII.97. Tylnica ta jest dostosowana do tradycyjnego steru z łożyskiem w stopie tylnicy. Konstrukcja jest masywna. Zastosowane w niej żebra służą do połączenia z elementami konstrukcji kadłuba (spawaniem).

Znaczenie symboli cyfrowych na poniższym rysunku:

- 1 – ramię śrubowe;
- 2 – piasta wału śrubowego;
- 3 – płetwa steru;
- 4 – stopa tylnicy.



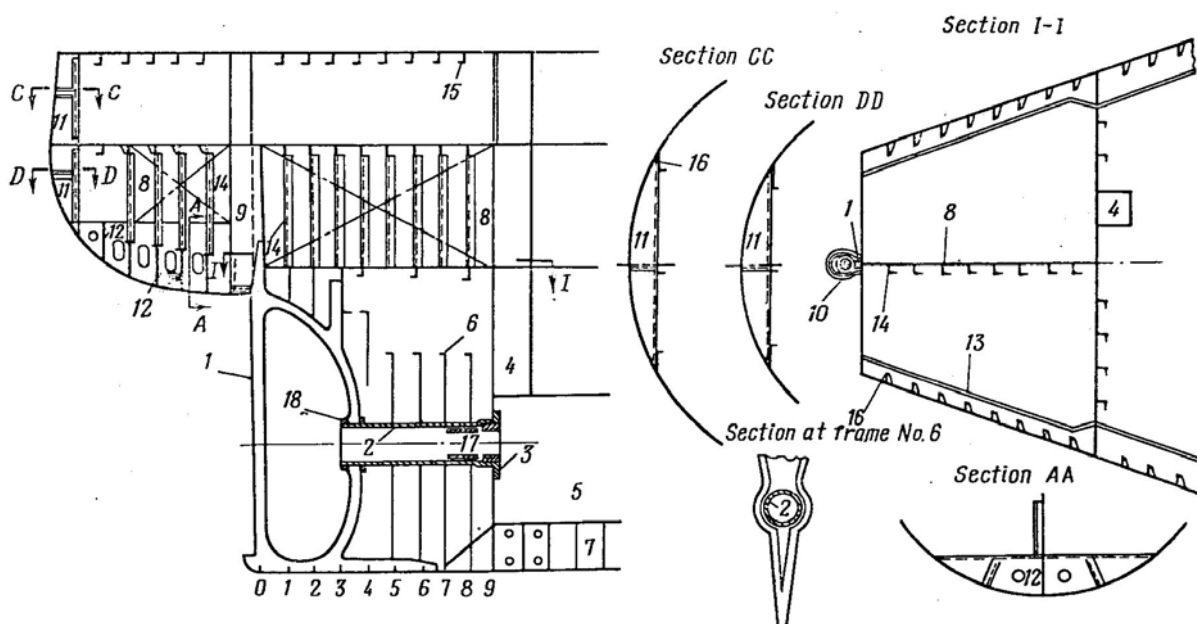
Rys. XIII.97 Tylnica w formie odlewu

Bardziej proste tylnice, dostosowane do tzw. sterów podwieszanych lub półpodwieszanych nie zawierają stopy tylnicy. Mogą one być konstrukcji spawanej.

Typową konstrukcję skrajnika rufowego pokazano na rys. XIII.98. Jest to skrajnik tradycyjnego statku z tzw. rufą krążowniczą. Jego tylnica zawiera stopę i tzw. ramię sterowe. Współcześnie najczęściej buduje się statki z tzw. rufą pawężową ( omówioną w dalszej części tego rozdziału) i ze sterem półpodwieszanym.

Znaczenie symboli cyfrowych na poniższym rysunku:

- 1 – ramię sterowe tylnicy;
- 2 – pochwa wału śrubowego;
- 3 – dławnica ( wału );
- 4 – szyb tunelu wału;
- 5 – tunel wału;
- 6 – denniki podpierające piastę;
- 7 – dno podwójne;
- 8 – gródź zbiornika;
- 9 – otwór na trzon sterowy;
- 10 – trzon sterowy;
- 11 – węzłówka;
- 12 – denniki w koszu rufowym;
- 13 – wzdłużnik burtowy;
- 14 – usztywnienie grodzi;
- 15 – pokładnik;
- 16 – wręg;
- 17 – dławik dławnicy wału śrubowego;
- 18 – nakrętka pochwy wału.



Rys. XIII.98 Typowa konstrukcja skrajnika rufowego

Charakterystyczne cechy konstrukcji skrajnika rufowego to zastosowanie poprzecznego systemu wiązań i zmniejszony odstęp wręgów ( do ok. 600 mm) w stosunku do wartości w środkowej części kadłuba.

Denniki powinny sięgać powyżej pochwy wału i kończyć się zagięciem lub mocnikiem.

Denniki mogą sięgać do specjalnej platformy.

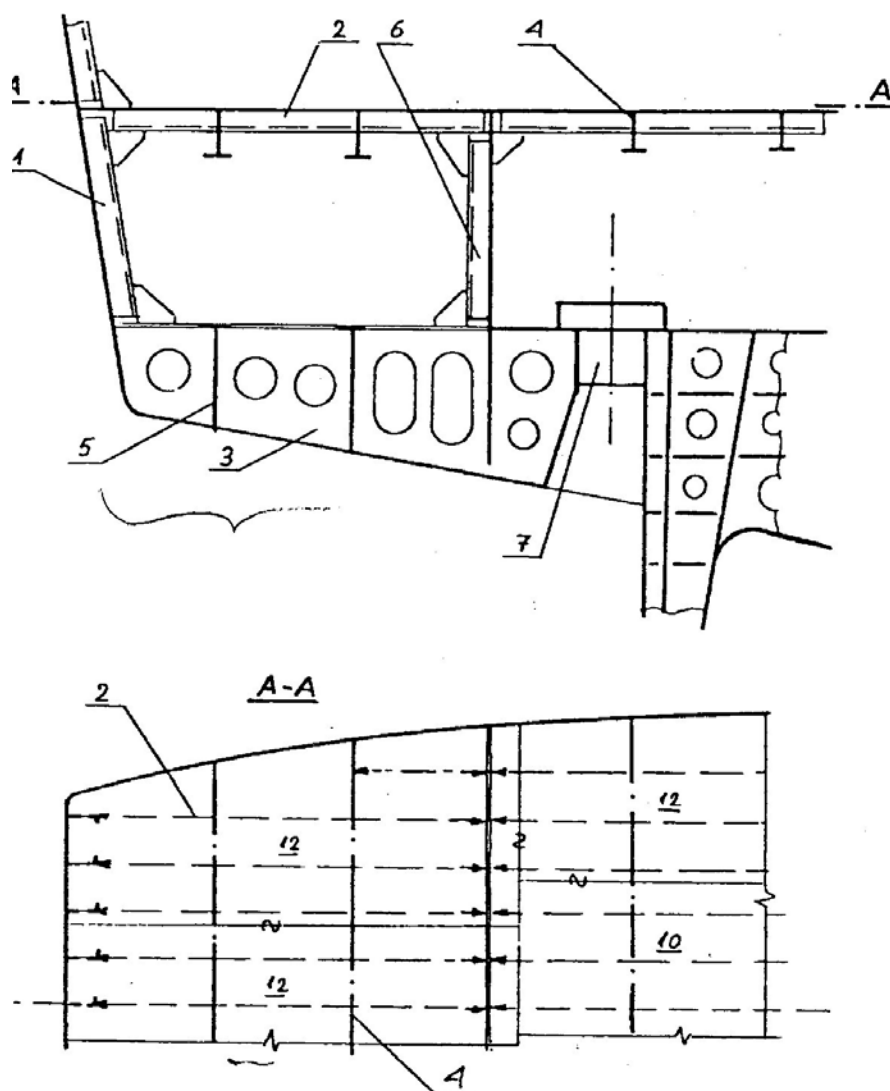
Na większych statkach stosowane są platformy lub wzdłużniki burtowe w odstępach rzędu 2 m.

Fragment bardziej powszechnej współcześnie rufowej części kadłuba o rufie pawężowej (płaskiej) pokazano na rys. XIII.99.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – usztywnienia pawęzy;
- 2 – wzdłużne pokładniki pokładu dolnego;
- 3 – przegroda przelewowa w PS;
- 4 – pokładniki ramowe;
- 5 – wiązary nawisu rufowego;
- 6 – usztywnienia grodzi pomieszczenia maszyny sterowej;
- 7 – dławica i łożysko trzonu sterowego.

Rufa pawężowa przeważnie ma pokład usztywniony wzdłużnie, który jest korzystny ze względu na wytrzymałość kosza rufowego w warunkach jego uderzeń o wodę. Wzdłużne usztywnienia pokładu zazwyczaj tworzą ramy z pionowymi usztywnieniami pawęzy i grodzi.

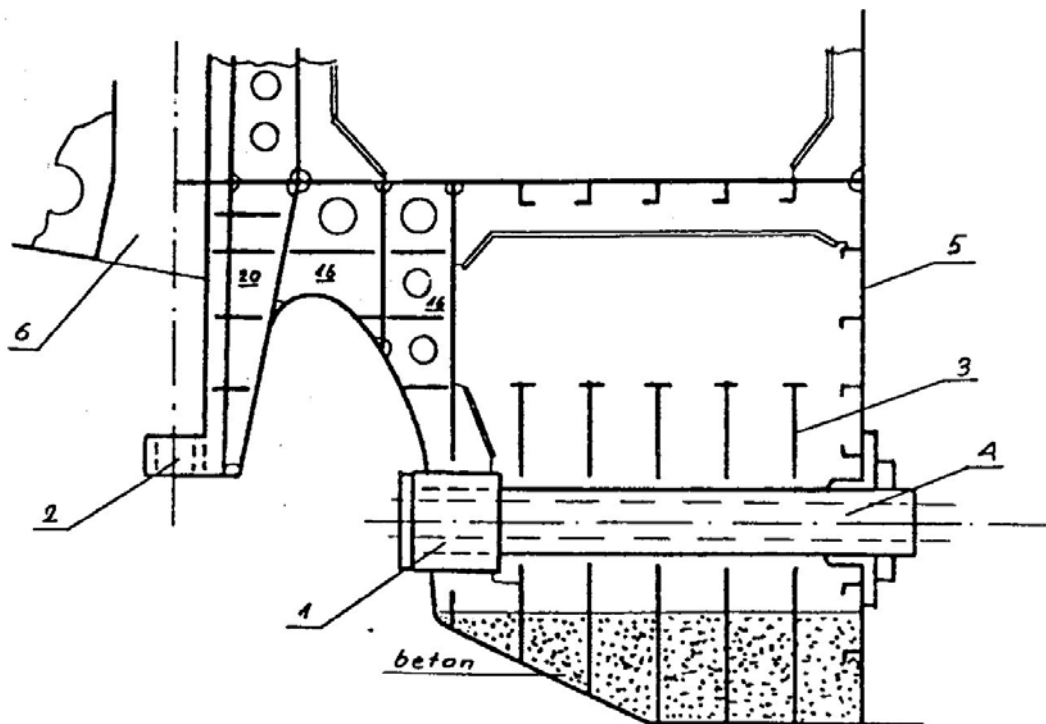


Rys. XIII.99 Konstrukcja rufy pawężowej

Przykładową dolną część skrajnika rufowego statku ze sterem półpodwieszonym pokazano na rys. XIII.100.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – piasta tylnicy;
- 2 – wspornik steru;
- 3 – denniki;
- 4 – pochwa wału śrubowego;
- 5 – gródź rufowa;
- 6 – sztyb trzonu sterowego.



Rys. XIII.100 Dolna część skrajnika rufowego statku ze sterem półpodwieszonym

# I. NIEKTÓRE ISTOTNE ( POZOSTAŁE ) ELEMENTY KONSTRUKCJI KADŁUBA STATKU

## FUNDAMENTY

Fundamenty to elementy konstrukcji kadłuba statku lub powiązane z konstrukcją kadłuba statku, na których opierają się elementy wyposażenia statku takie jak np. silniki główne, silniki pomocnicze, kotły, pompy, itp.

Przy konstruowaniu fundamentów należy dążyć do uzyskania ich najmniejszej masy przy zachowaniu odpowiednio dużej sztywności – aby zminimalizować drgania wymuszone spowodowane pracą silników.

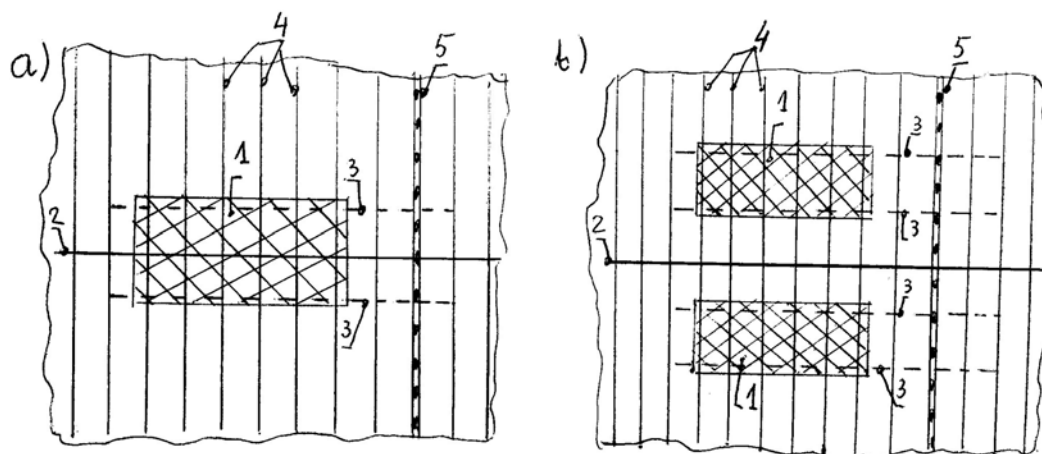
### Fundamenty silników głównych

Podstawowe elementy konstrukcji fundamentów to wzdłużniki podpierające silnik ( patrz rys. XIII.101). Wariant „a” dotyczy statku z jednym silnikiem głównym a „b” – z dwoma silnikami.

Znaczenie symboli literowych na tym rysunku:

- 1 – bryła silnika;
- 2 – denny wzdłużnik środkowy;
- 3 – wzdłużniki fundamentu;
- 4 – denniki;
- 5 – gródź.

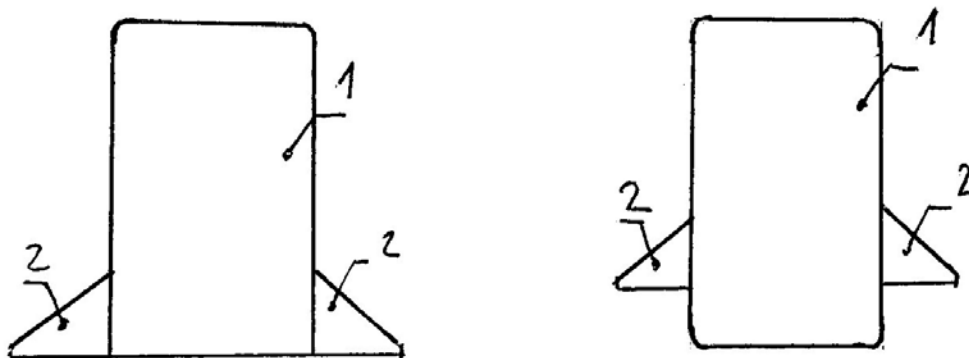
Wzdłużniki fundamentu powinny być przedłużone przynajmniej o 2 odstępy wręgowe poza gródź maszynowni. W przypadku statków z maszynownią w części rufowej spełnienie tego warunku na ogół nie jest możliwe od strony rufy i wzdłużniki po prostu kończą się na denniku.



Rys. XIII.101 widok na dno statku w rejonie silników głównych ( schemat )

Istotny wpływ na konstrukcję fundamentu ma położenie łap silnika głównego ( rys. XIII.102). Symbol „1” oznacza bryłę silnika a „2” – łapy silnika, na których jest on posadowiony na fundamencie.





Rys.

### XIII.102 Możliwe warianty usytuowania łap fundamentowych silnika

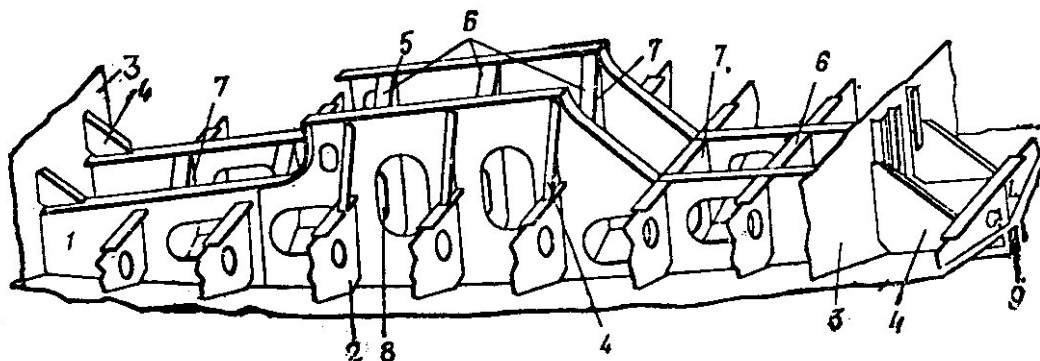
#### Fundamenty silników głównych statków z dnem pojedynczym

Dno pojedyncze jest stosowane na statkach stosunkowo małych, gdzie zastosowanie dna podwójnego jest po prostu niemożliwe.

Przykładowy fundament pokazano na rys. XIII.103.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – przedłużenie wzdłużników fundamentowych poza silnik;
- 2 – dennik;
- 3 – gródź poprzeczna;
- 4 – węzłówka;
- 5 – ławy fundamentowe;
- 6 – mocniki denników;
- 7 – węzłówka poprzeczna;
- 8 – otwór ulżeniowy;
- 9 – stępka belkowa.



Rys. XIII.103 Przykładowy fundament silnika głównego statku z dnem pojedynczym

Zauważmy, że wzdłużniki fundamentu są wyższe od denników. Dzięki temu łatwo jest zamontować rurociągi instalacji związanych z silnikiem, które można prowadzić nad dennikami. Ponadto uzyskuje się łatwy dostęp do ław fundamentowych, gdzie silnik jest mocowany do fundamentu.

Szczególnie dokładnie należy zaprojektować i wykonać połączenia spawane elementów fundamentu – aby uniknąć pęknięć zmęczeniowych powodowanych przez drgania konstrukcji. Należy więc stosować przede wszystkim spawanie z pełnym przetopem zamiast stosowania spoin pachwinowych. Niedopuszczalne jest stosowanie spoin przerywanych.

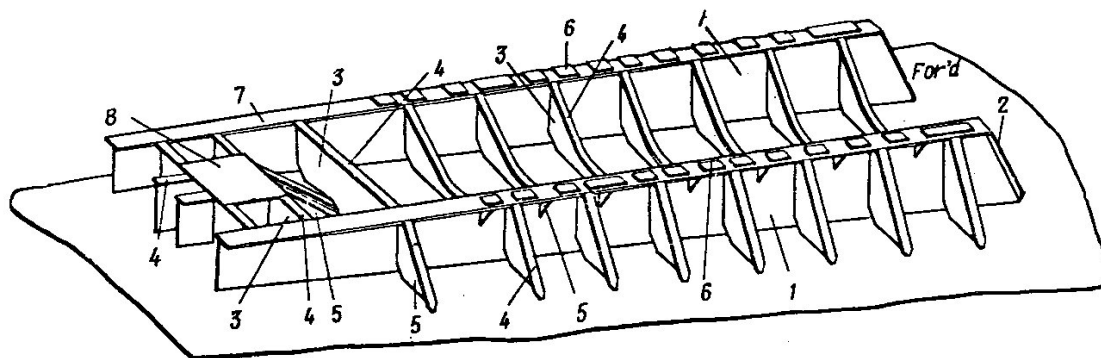
W jak największym zakresie należy stosować spawanie automatami ( a nie ręczne ) i wykonywać fundament w warsztacie, gdzie można stosować odpowiednie pozycje przy spawaniu.

#### Fundamenty silników głównych na statkach z dnem podwójnym

Można spotkać prostą konstrukcję fundamentu posadowioną na dnie wewnętrznym ( rys. XIII.104).

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – wzdluzniki fundamentu;
- 2 – mocnik węzłówki;
- 3 – węzłówka;
- 4 – mocnik;
- 5 – węzłówka;
- 6 – podkładki pod łapy silnika;
- 7 – ława fundamentowa;
- 8 – płyta do posadowienia łożyska oporowego.

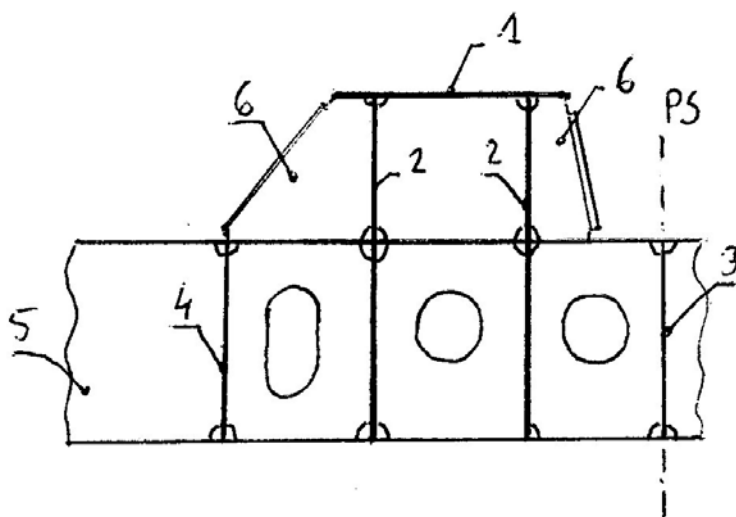


Rys. XIII.104 Przykładowa konstrukcja fundamentu

Powyższy fundament jest typowy dla statków niewielkich. Pod wzdluznikami „1” znajdują się obowiązkowo wzdluzniki w dnie podwójnym. Podobnie, pod węzłówkami podpierającymi wzdluzniki „1” znajdują się denniki.

Na statkach dużych fundament może być konstrukcją pokazaną na rys. XIII.105. Zastosowane tam symbole mają znaczenie:

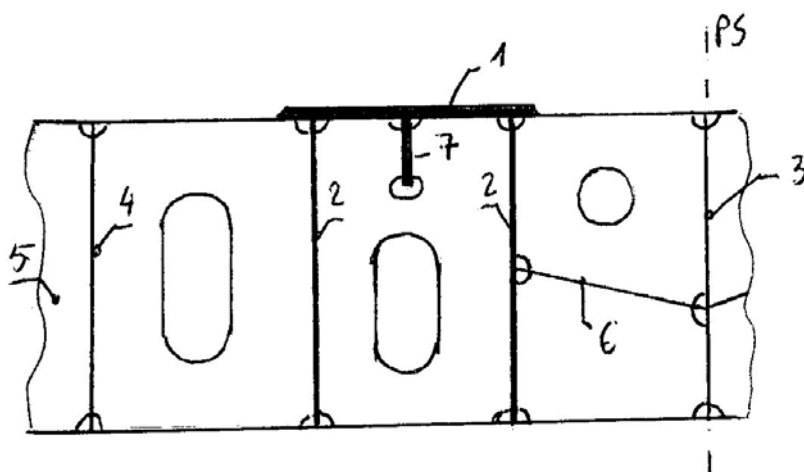
- 1 – ława fundamentowa;
- 2 – wzdluzniki;
- 3 – denny wzdluznik środkowy;
- 4 – denny wzdluznik boczny;
- 5 – dennik;
- 6 – węzłówki.



Rys. XIII.105 Fundament silnika głównego dużego statku

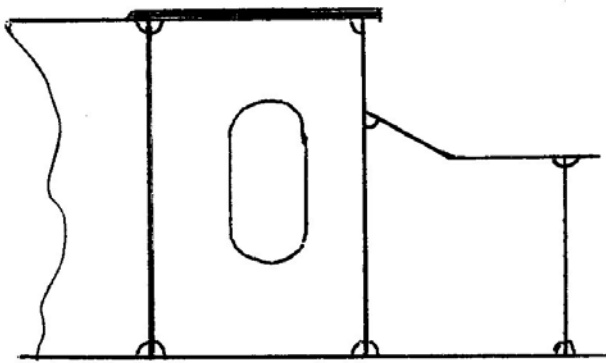
Charakterystyczną cechą tego fundamentu jest oparcie ławy fundamentowej usytuowanej powyżej dna wewnętrznego na dwóch masywnych wzdłużnikach, gdyż szerokość ławy jest znaczna. Na statku wielkości 'panamax' ławy fundamentowe mogą mieć grubość nawet 50 mm a wzdłużniki podpierające ławę – rzędu 30 mm.

W przypadku dużych statków często wysokość dna podwójnego i parametry silnika (położenie łąp i wylot wału) są takie, że udaje się ławy fundamentowe zamontować wprost w poszyciu dna wewnętrznego. Taki przypadek pokazano na rys. XIII.106. Znaczenie symboli literowych 1 do 5 na tym rysunku jest takie jak na rys. XIII.104; „6” oznacza dno misy olejowej silnika a „7” to dodatkowy wzdłużnik w formie masywnego płaskownika, podpierający ławę.



Rys. XIII.106 Fundament silnika z ławami na poziomie dna wewnętrznego

W niektórych sytuacjach ławy fundamentowe są na poziomie dna wewnętrznego a pod samym silnikiem trzeba wykonać nieckę w dnie podwójnym. Taki przypadek pokazano na rys. XIII.107.



Rys. XIII.107 Fundament silnika głównego z niecką w dnie podwójnym

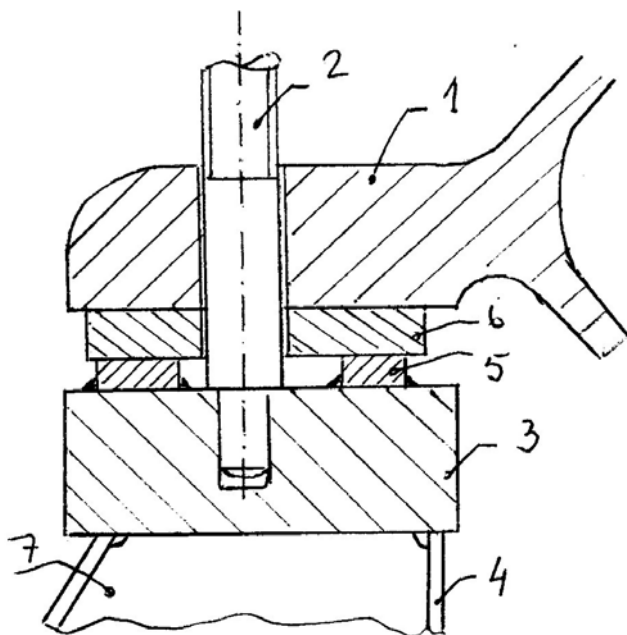
#### Mocowanie silnika do ław fundamentowych

Ławy fundamentowe powinny być tak szerokie, że łapy silnika mogą opierać się na nich całą szerokością.

Górne powierzchnie ław leżą 20 do 70 mm niżej od poziomu powierzchni nośnych łap silnika a różnicę tą wyrównuje się za pomocą podkładek wyrównawczych (rys. XIII.108). Dolna podkładka jest spawana do ławy a górna jest precyzyjnie strugana na niezbędny wymiar. Łapa jest dociskana do ławy śrubami. Stąd wynika wymagana grubość ław rzędu nawet 60 mm.

Znaczenie symboli cyfrowych na rys. XIII.108:

- 1 – łapa silnika;
- 2 – śruba;
- 3 – ława fundamentowa;
- 4 – wzdlużnik fundamentu;
- 5 – podkładka dolna;
- 6 – podkładka wyrównawcza.



Rys. XIII.108 Mocowanie silnika do ławy fundamentowej

Na okrętach wojennych i statkach pasażerskich często stosuje się elastyczne posadowienie silników głównych na fundamentach. Rolę elastycznych elementów spełniają specjalne łączniki metalowo – gumowe. Elastyczne posadowienie silników pozwala znacznie zredukować poziom drgań elementów konstrukcji kadłuba, wywoływanych przez pracujące silniki.

#### Cechy konstrukcji kadłuba statku w rejonie maszynowni

Korzystne jest zastosowanie jak najbardziej sztywnej konstrukcji aby uzyskać jak największe wartości częstości drgań własnych. Pozwala to zmniejszyć poziom drgań wymuszonych wywoływanych pracą silników głównych i pomocniczych.

Korzystne jest więc stosowanie jak najkrótszych przedziałów maszynowni.

Denniki pełne stosowane są na każdym wręgu.

W konstrukcji burty stosowane są wręgi ramowe co 3 do 4 odstępów wręgowych – pomimo poprzecznego systemu usztywnień burty.

Konstrukcję burty usztywniają dodatkowo platformy lub wzdłużniki burtowe.

Pilersy podpierające platformy także powiększają sztywność konstrukcji.

### **Fundamenty silników pomocniczych, maszyn i urządzeń okrętowych oraz kotłów**

Zasady konstruowania takich fundamentów są podobne do przypadku fundamentów silników głównych. Mniejsze wymiary maszyn/ urządzeń od silników głównych sprawiają, że w wielu przypadkach wymiary wiązań kadłuba wynikające z kryteriów wytrzymałości lokalnej lub ogólnej dla obciążeń od morza są wystarczające, aby te elementy wyposażenia statku ustawiać bezpośrednio na nich. Skuteczne może być np. zamocowanie śrubami korpusu niewielkiego urządzenia wprost do mocnika wiązara dna pojedynczego. W innym przypadku fundament może mieć formę dwóch teowników ustawionych ( spawanych ) na dnie wewnętrznym lub pokładzie, do których mocuje się korpus urządzenia. Teowniki będą oczywiście wzmocnione węzłówkami ustawionymi poprzecznie.

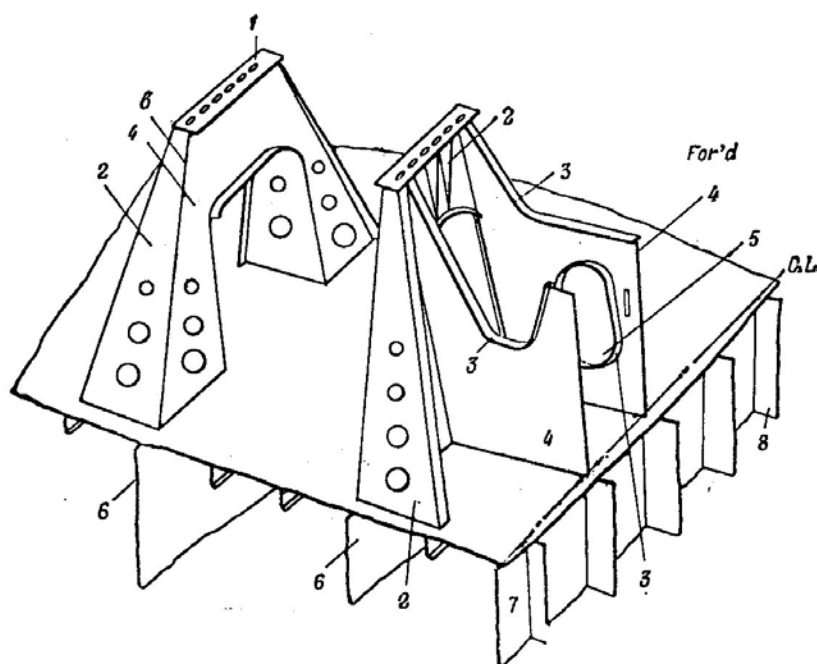
W innych przypadkach fundamenty te są natomiast podobne do fundamentów silników głównych.

Silniki pomocnicze i urządzenia są zazwyczaj ustawiane na dnie w maszynowni lub na pokładach. W tym drugim przypadku należy starannie zaprojektować powiązanie fundamentu z wzdłużnikami pokładu i pokładnikami ramowymi. Celowe może być ‘przekazanie’ obciążenia na niższe pokłady lub dno poprzez system podpór lub przegród.

Przykładową konstrukcję fundamentu pompy ładunkowej tankowca lub pompy systemu balastowego pokazano na rys. XIII.109. Widać, że elementy nośne fundamentu znajdują się w płaszczyznach denników lub wzdłużników dna podwójnego.

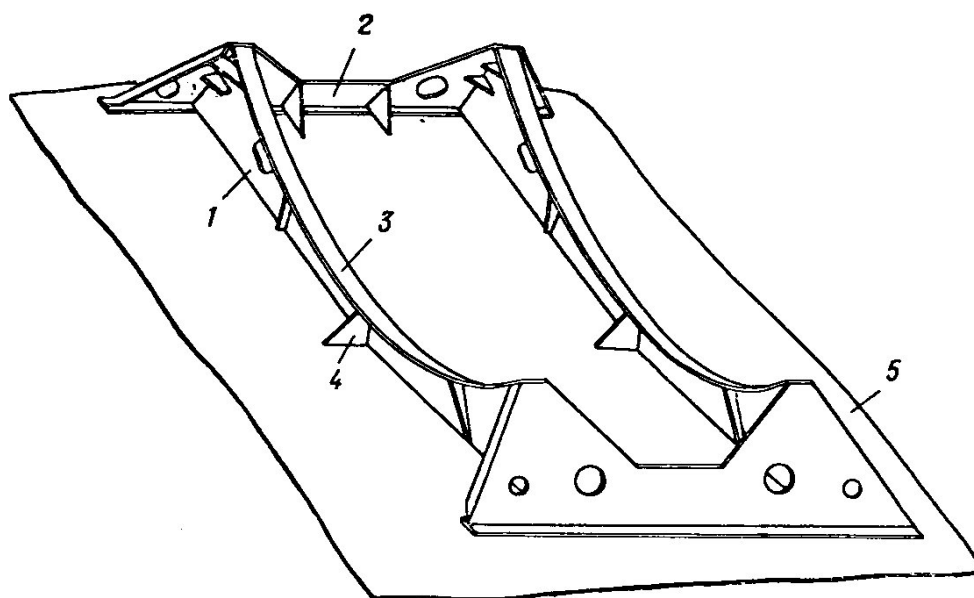
Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – ława, do której mocuje się łapy pompy;
- 2 – węzłówka;
- 3 – mocnik;
- 4 – węzłówka;
- 5 – otwór ulżeniowy;
- 6 – wzdłużnik dna podwójnego;
- 7 – denny wzdłużnik środkowy;
- 8 – dennik.



Rys. XIII.109 Przykładowy fundament pompy

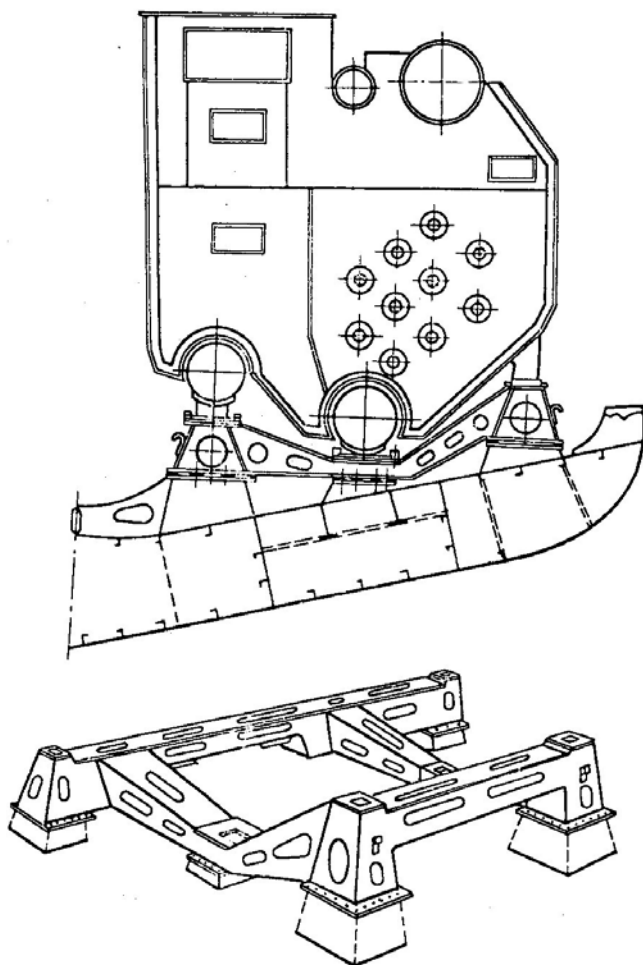
Przykładowy fundament kotła okrętowego ( walczakowego ) pokazano na rys. XIII.110. Kocioł opiera się na dwóch dźwigarach „1”, naciskając na ich mocniki „3” poprzez specjalne podkładki. Dźwigary „1” są wzmocnione węzłówkami „4” i są połączone wiązarami poprzecznymi „2”. Fundament jest ustawiony na dnie wewnętrznym „5”. Wiązary fundamentu są usytuowane w płaszczyznach odpowiednich wiązarów dna podwójnego.



Rys. XIII.110 Fundament kotła

Fundamenty wielu urządzeń okrętowych są często wykonywane wraz z urządzeniem, w wytwórni urządzeń. Urządzenia takie mogą być montowane na statku poprzez np. przykręcenie śrubami takiego integralnego fundamentu urządzenia do fragmentów

fundamentu przygotowanych przez stoczní budujacá statek. Przykładowá sytuacjé tego typu pokazano na rys. XIII.111.



Rys. XIII.111 Przykład integralnego fundamentu kotła

## ZBIORNIKI OKRÉTOWE

Stosowane sá 2 typy zbiorników:

- zbiorniki wstawiane;
- zbiorniki integralne.

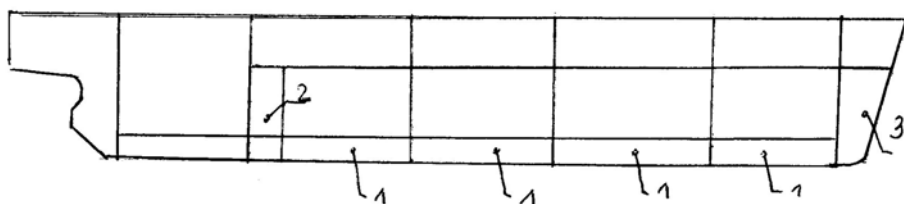
Zbiorniki wstawiane sá elementem wyposażenia statku. Mogá to byé niewielkie zbiorniki np. w maszynowni statku. Stosowane sá takzé zbiorniki wstawiane pełniące funkcjé zbiorników ładunkowych. Jako przykład można podac zbiorniki gazowców lub zbiorniki statków do transportu płynnej siarki.

Zbiorniki integralne to szczelne przestrzenie wydzielone wprost w kadłubie statku. Do tej kategorii należą zbiorniki ładunkowe tankowców i innych statków do transportu ładunków płynnych luzem, zbiorniki balastowe i zbiorniki paliwowe.

Przykłady rozmieszczenia zbiorników integralnych pokazano na rys. XIII.112.

Oznaczenia na tym rysunku:

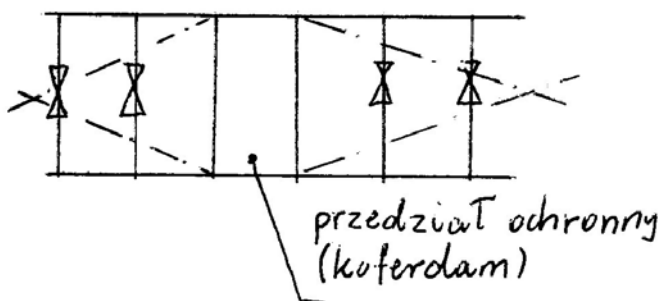
- 1 – zbiorniki w dnie podwójnym;
- 2 – zbiornik wysoki;
- 3 – zbiornik w skrajniku dziobowym.



Rys. XIII.112 Rozmieszczenie zbiorników integralnych w kadłubie statku

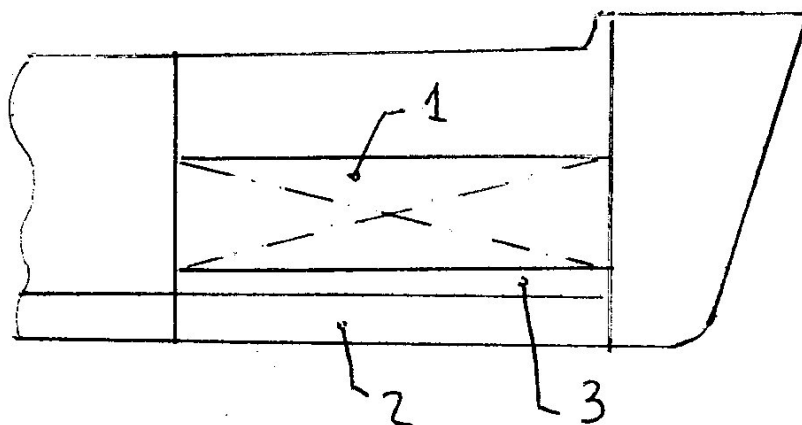
Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych wymagają aby zbiorniki integralne wypełniane różnymi cieczami były oddzielone od siebie przedziałami ochronnymi.

Przykład przedziału ochronnego w dnie podwójnym pokazano na rys. XIII.113. Jest to pusta przestrzeń w dnie podwójnym o szerokości jednego odstepu wręgowego, oddzielająca np. zbiornik paliwa od zbiornika balastu.



Rys. XIII.113 Przedział ochronny w dnie podwójnym

Inny przykład przedziału ochronnego pokazano na rys. XIII.114. W dolnej części dziobowej drobnicowca, gdzie kształt kadłuba jest nieregularny, korzystnie jest usytuować np. zbiornik do transportu oleju jadalnego (pozycja 1 na rysunku). W dnie podwójnym pod ładownią jest np. zbiornik balastu (pozycja „2”). Pomiedzy tymi zbiornikami musi być zastosowany poziomy przedział ochronny (pozycja „3”).



Rys. XIII.114 Poziomy przedział ochronny na drobnicowcu

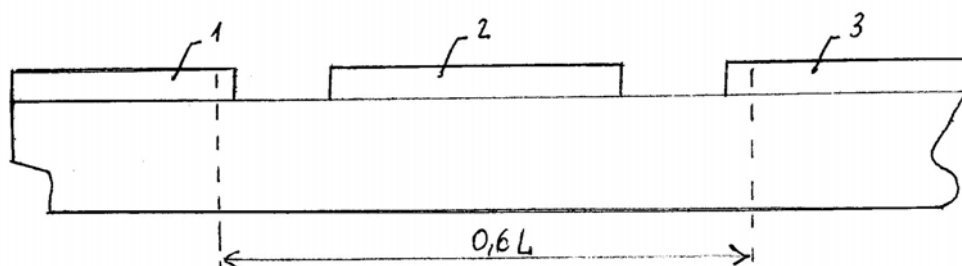


## NADBUDÓWKI I POKŁADÓWKI

Nadbudówki i pokładówki statku to „budowle” posadowione na pokładzie górnym. Jeżeli odległość ściany bocznej takiej budowli od burty jest mniejsza niż  $\frac{1}{25}$  szerokości statku to nazywamy ją nadbudówką a w przeciwnym przypadku – pokładówką.

Długie nadbudówki „włączają się” do zginania ogólnego kadłuba i ich pokład może być pokładem wytrzymałościowym.

Zasięg długich nadbudówek pokazano na rys. XIII.115 ( 1 – długa rufówka; 2 – długa średniówka; 3 – długa dziobówka).



Rys. XIII.115 Zasięg długich nadbudówek

Należy unikać stosowania krótkich nadbudówek w środkowej części statku – ze względu na koncentrację naprężeń w pokładzie wytrzymałościowym i w burtach, w sąsiedztwie ich poprzecznych ścian końcowych.

Jeżeli konieczne jest zastosowanie w środkowej części statku nadbudowy, to lepiej zastosować pokładówkę.

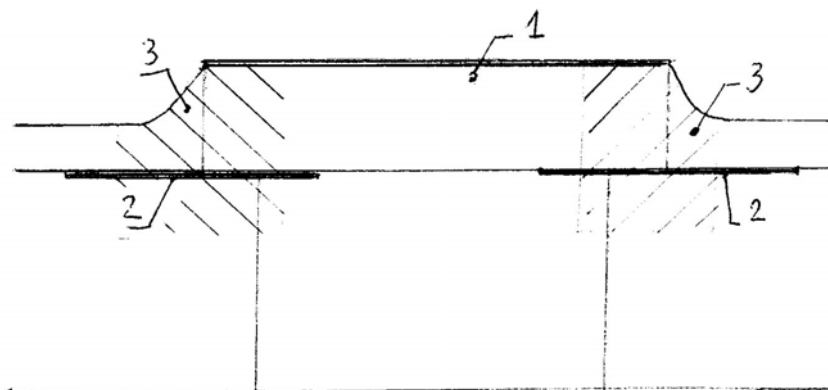
### Konstrukcja nadbudówek

Ściany i pokłady nadbudówek konstruuje się wg zasad obowiązujących przy konstruowaniu burt i pokładów statku.

Jeżeli stosujemy długą nadbudówkę w środkowej części statku, to jej pokład będzie pokładem wytrzymałościowym i wystąpi spiętrzenie naprężeń w rejonie przejścia od pokładu wytrzymałościowego statku (poza nadbudówką) do pokładu nadbudówki. W takiej sytuacji należy zastosować lokalne wzmocnienia konstrukcji (rys. XIII.116).

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – długa nadbudówka;
- 2 – wzmocniony pokład (zgrubione poszycie);
- 3 – zgrubione poszycie burt.



Rys. XIII.116 Wzmocnienia kadłuba w rejonie końców długiej nadbudówki

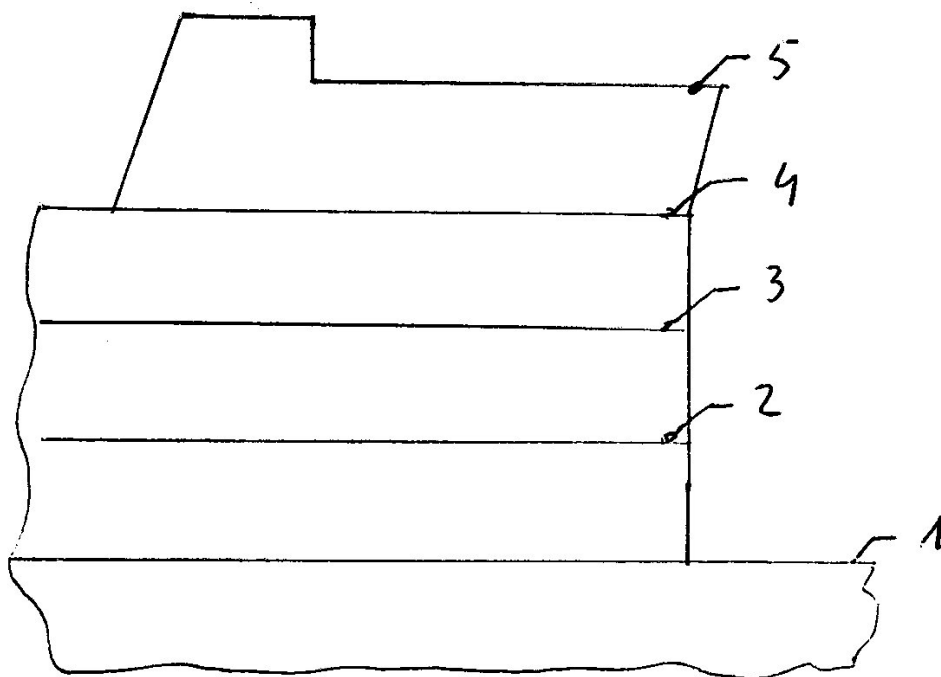
Ściany nadbudówek narażone na oddziaływanie ciśnień wody w warunkach sztormowych powinny być odpowiednio wzmocnione. Dotyczy to np. czołowej ściany rufówki.

Dobłą praktyką jest takie rozplanowanie przestrzeni w kadłubie statku aby końcowe ściany nadbudówek znajdowały się w płaszczyznach grodzi poprzecznych.

Na rys. XIII.117 pokazano schematycznie wielopiętrową nadbudówkę lub pokładówkę. Taki typ nadbudowy stosowany jest powszechnie na dużych statkach towarowych z maszynownią na rufie. Na promach pasażersko samochodowych nadbudówka tego typu może być b. długa (np. 0,8 L).

Zwyczajowe nazwy pokładów zaznaczonych na rys. XIII.117:

- 1 – pokład górny;
- 2 – pokład spacerowy;
- 3 – pokład łodziowy;
- 4 – pokład nawigacyjny;
- 5 – pokład namiarowy.

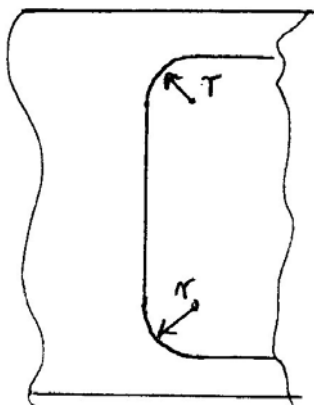


Rys. XIII.117 Nadbudówka lub pokładówka wielopiętrowa

Na kontenerowcach stosowane są nadbudówki wielopiętrowe usytuowane nad nawisem rufowym i nad częścią przedziału maszynowego. Nad pozostałą częścią pokładu górnego nad maszynownią ustawiane są transportowane kontenery. Nadbudówka taka jest krótka i wysoka. Bywają problemy z drganiami wymuszonymi tego typu konstrukcji.

#### Konstrukcja pokładówek

W przypadku pokładówek usytuowanych w środkowej części statku powszechnie stosuje się zaokrąglone przejście ścian wzdłużnych w końcowe ściany poprzeczne ( patrz rys. XIII.118). Dzięki temu unika się nadmiernej koncentracji naprężeń.



Rys. XIII.118 Zaokrąglone przejście ścian wzdłużnych w ściany poprzeczne pokładówki

Dawniej w rejonie naroży pokazanych na rys. XIII.118 stosowano nitowane połączenie pokładówki z pokładem – aby uniknąć pęknięć zmęczeniowych.

Pokład górny pod pokładówką powinien być odpowiednio wzmocniony.

Dobrze jest pod bocznymi ścianami pokładówki usytuować wzdłużniki pokładowe a pod ścianami końcowymi – grodzie lub pokładniki ramowe.

## WZMOCNIENIA LODOWE

Statki przeznaczone do żeglugi w akwenach, gdzie występuje kra lodowa lub pokruszony lód muszą mieć specjalnie wzmocnioną konstrukcję kadłuba i w symbolu klasy zawierają specjalny znak określający typ zastosowanych tzw. „wzmocnień lodowych”.

Wzmocnienia lodowe polegają na:

- zastosowaniu zgrubionego poszycia w obszarze tzw. pasa lodowego;
- zastosowaniu wzmocnionych wiązań burt i dodatkowych usztywnień burt ( np. międzywręgów);
- wzmocnieniu konstrukcji dziobnic, tylnic, sterów;
- wzmocnieniu konstrukcji dna i pokładów.

Dwa ostatnie przypadki wzmocnień dotyczą tzw. wyższych klas lodowych.

PRS stosuje w symbolu klasy statku następujące znaki, określające zasięg i wytrzymałość zastosowanych wzmocnień lodowych:

- **L4** – tzw. podstawowe wzmocnienia lodowe, umożliwiające samodzielną żeglugę statku w okresie zimowym w tzw. lekkich warunkach lodowych ( w zachodnich rejonach Morza Bałtyckiego lub innych akwenach o podobnych warunkach, w drobno pokruszonym lodzie);
- **L3, L2, L1, L1A** – wzmocnienia umożliwiające samodzielną żeglugę w okresie zimowym na Morzu Bałtyckim lub na morzach niearktycznych o podobnych warunkach lodowych; im mniejsza liczba w symbolu tym większa dopuszczalna grubość kry lodowej ( od 0,4 m do 1,0 m).

#### Wzmocnienia lodowe L4

Wzmocnienia poszycia są stosowane tylko w dziobowej części statku, gdzie wyróżnia się tzw. pas lodowy. Pas lodowy, to obszar poszycia rozciągający się w pionie od wodnicy położonej 0,5 m poniżej wodnicy minimalnego zanurzenia statku do poziomu 0,5 m powyżej wodnicy maksymalnego dopuszczalnego zanurzenia statku. Wzdłuż osi statku pas lodowy obejmuje część od dziobnicy do miejsca, gdzie wodnice osiągną pełną szerokość. W części dziobowej, od dziobnicy do przekroju poprzecznego położonego w odległości równej szerokości  $B$  statku, wymagana jest grubość poszycia pasa lodowego nie mniejsza niż ( w milimetrach):

$$t = 6 + 0,11L_0 + \Delta t$$

gdzie:

$L_0$  - długość obliczeniowa statku ( w metrach );

$$\Delta t = 20(s_0 - s_s)$$

$s_0$  - wartość odstepu wręgów ( w metrach);

$s_s = 0,48 + 0,002L_0$  - tzw. standardowy odstep wręgów.

W pozostałej części pasa lodowego grubość poszycia może być stopniowo zmniejszana w kierunku rufy, do wartości wynikającej z Przepisów – bez uwzględniania wzmocnień lodowych.

Zastosowana grubość poszycia w pasie lodowym nie musi być jednak większa niż 25 mm.

W części dziobowej wymagane są odpowiednio mocne wręgi. Wartość ich wskaźnika przekroju w skrajniku dziobowym nie powinna być mniejsza niż ( w  $\text{cm}^3$ ):

$$W = 0,25L_0T$$

gdzie:

$L_0$  – jak wyżej;

$T$  – zanurzenie statku ( w metrach).

W rejonie od grodzi skrajnika dziobowego do miejsca w odległości  $1,5B$  od pionu dziobowego wskaźnik przekroju wręgów nie powinien być mniejszy niż:

$$W = 0,4s_0L_0T$$

gdzie:

$s_0, L_0, T$  – jak wyżej.

Dodatkowe wzmocnienia w części dziobowej to tzw. międzywręgi, tzn. pionowe usztywnienia burty wstawione pomiędzy wręgami. Powinny one rozciągać się w pionie od poziomu 1,0 m poniżej wodnicy najmniejszego zanurzenia statku do poziomu 0,62 m powyżej wodnicy maksymalnego zanurzenia statku. Po długości statków międzywręgi należy zastosować od dziobu do przekroju w odległości  $1,5B$ , w kierunku rufy.

Końce międzywręgów, jeżeli nie znajdują się na poziomach pokładów lub platform, powinny być połączone z wręgami za pomocą wiązań wstawkowych, które nie tworzą ciągłego wzdłużnika.

W skrajniku dziobowym wskaźnik przekroju międzywręgów nie powinien być mniejszy niż ( w  $\text{cm}^3$ ):

$$W = \left( \frac{L_0^2}{100} + 20 \right) \frac{s_0}{s_s}$$

gdzie:

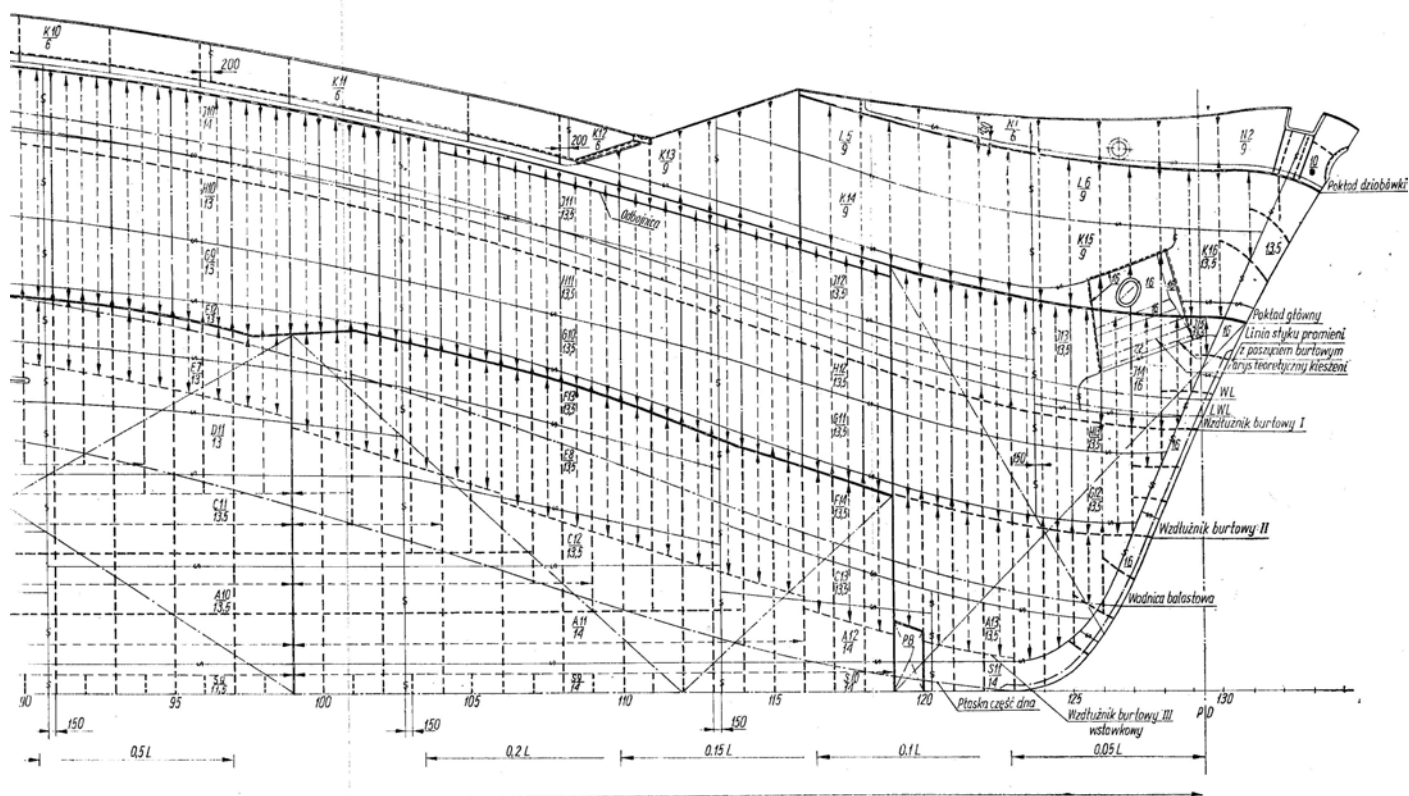
$L_0, s_0, s_s$  – jak wyżej.

Poza skrajnikiem dziobowym wymagany wskaźnik międzywręgów to:

$$W = \left( \frac{L_0^2}{160} + 10 \right) \frac{s_0}{s_s}$$

Na statkach jednopokładowych należy zastosować tzw. wzdluznik lodowy usytuowany na poziomie 0,2 do 0,3 m poniżej wodnicy maksymalnego zanurzenia statku, sięgający od pionu dziobowego w stronę rufy na odległość  $2B$ . Wzdluznik ten może mieć formę szeregu węzłówek przeciwwskrętnych połączonych z wręgami.

Przykład wzmocnień lodowych **L4** pokazano na rysunku rozwinięcia poszycia w dziobowej części pewnego drobniowca (rys. XIII.119). Widać wyraźnie międzywręgi sięgające od pewnego poziomu poniżej wodnicy minimalnego zanurzenia do pokładu górnego – a więc wyżej niż wynika to z formalnych wymagań Przepisów [1].



Rys. XIII.119 Wzmocnienia lodowe L4 widoczne na rysunku rozwinięcia poszycia

### Wzmocnienia lodowe **L3**, **L2**, **L1** i **L1A**

W przypadku tych wzmocnień pas lodowy obejmuje całą długość statku.

W Przepisach [1] podane są wzory do wyznaczania obliczeniowych obciążeń od lodu, które są wykorzystywane do wyznaczania wymaganej grubości poszycia w pasie lodowym, wskaźników przekroju i pola na ścinanie usztywnień burty ( pionowych lub poziomych ), wręgów ramowych i wzdluzników burtowych. Są to umowne wartości naporu lodu na burte, którego grubość zmienia się od 0,4 m dla wzmocnień **L3** do 1,0 m dla wzmocnień **L1A**.

Wymagana jest także odpowiednia wytrzymałość pasów pokładów przy burtach wynikająca z naporu lodu na burty.

Przy projektowaniu pokryw lukowych należy uwzględnić ugięcia burt spowodowane naporem lodu.

Zalecane jest wykonanie stępek przechyłowych w postaci wielu niezależnych segmentów – aby zminimalizować uszkodzenia kadłuba wskutek odrywania stępki przy kontakcie z lodem.

Wymagana jest odpowiednio mocna konstrukcja dziobnicy statku.

W rejonie rufy zalecane jest zastosowanie większych niż normalnie odległości skrzydeł śruby od kadłuba. Wsporniki wałów na statkach wielośrubowych powinny stanowić integralną część kadłuba. Zalecane jest stosowanie pawęży o małej szerokości na poziomie wodnicy maksymalnego zanurzenia statku.

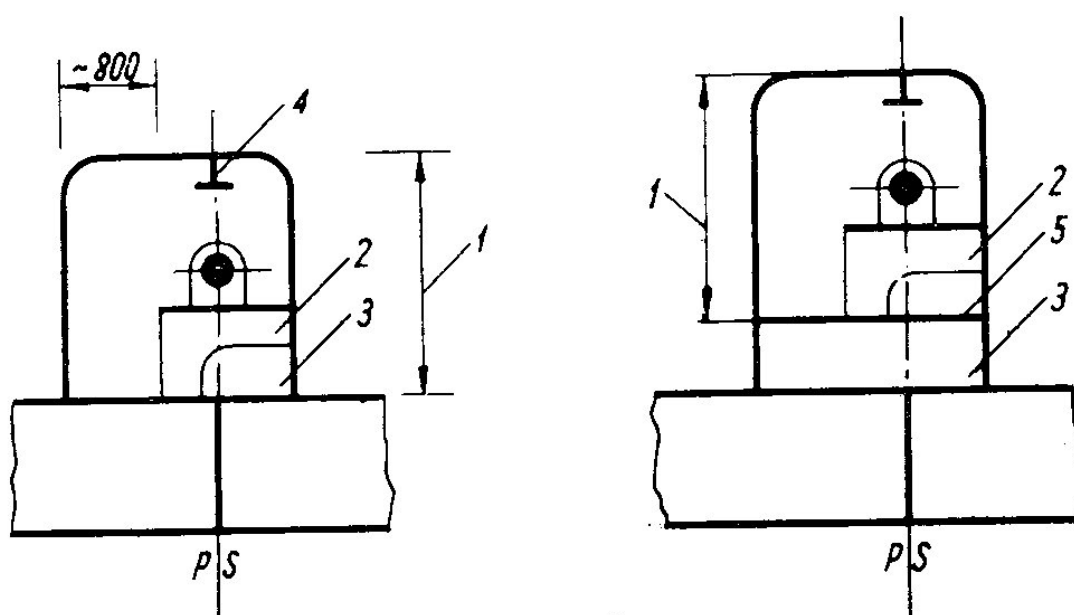
## TUNELE LINII WAŁÓW

W przypadku statków z maszynownią nie położoną w części rufowej stosowana jest szczelna konstrukcja zawierająca wał napędzający śrubę, wydzielona w ładowniach lub zbiornikach ładunkowych. Konstrukcję tą nazywamy tunelem linii wałów. Rozciąga się ona od rufowej grodzi maszynowni do grodzi skrajnika rufowego lub do grodzi, do której doprowadzona jest pochwa wału. Tunel linii wałów jest wodoszczelny. Wymiary poprzeczne tunelu powinny umożliwiać swobodne przemieszczanie się człowieka i unoszenie pokryw łożysk wału ponad wał.

Typowe konfiguracje i wymiary przekroju poprzecznego tunelu linii wałów pokazano na rys. XIII.120. Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – wysokość tunelu (nie mniej niż 2,0 m);
- 2 – fundament łożyska;
- 3 – przedział do umieszczenia rurociągów;
- 4 – szyna suwnicy;
- 5 – podłoga.

Widzimy, że tunel jest na ogół asymetrycznie ulokowany w stosunku do PS statku.

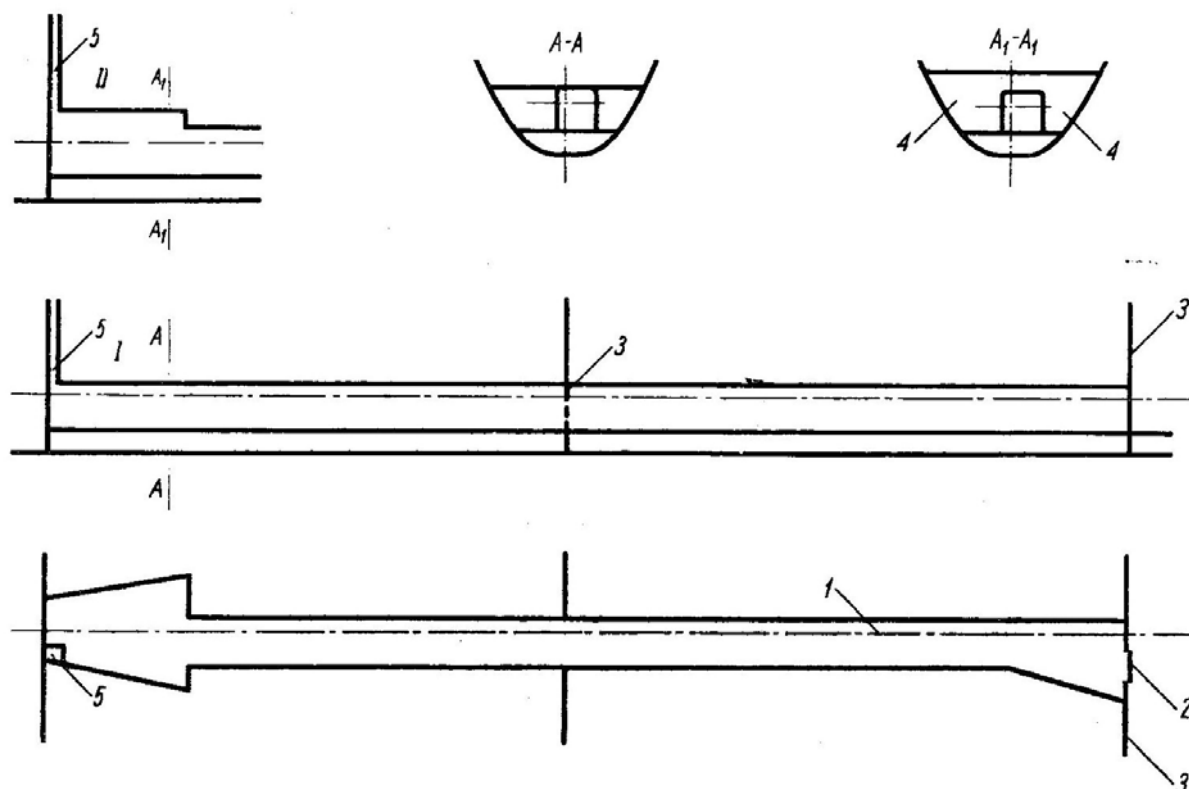


Rys. XIII.120 Typowe konfiguracje przekroju poprzecznego tunelu linii wałów

Konfigurację tunelu linii wałów wzdłuż statku pokazano na rys. XIII.121. Pokazano tam przekroje płaszczyznami poziomą i pionową. Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – oś linii wałów;
- 2 – drzwi wodoszczelne;
- 3 – gródź wodoszczelna;
- 4 – zbiornik;

5 – szyb wyjściowy.



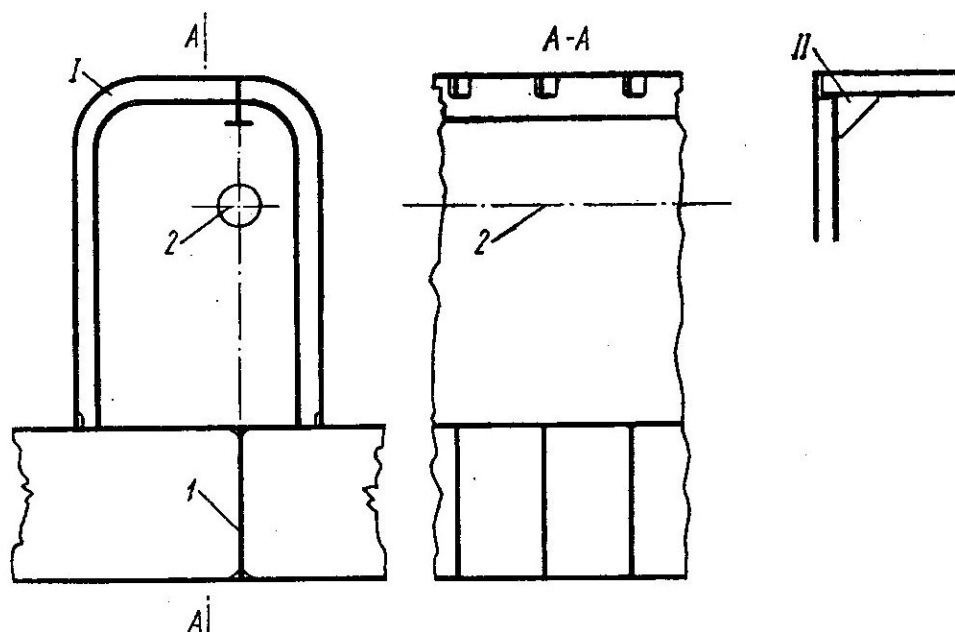
Rys. XIII.121 Typowe konfiguracje tunelu linii wałów ( wzdłuż statku )

Tunel rozszerza się przy grodzi maszynowni ze względu na konieczność umieszczenia tam drzwi wodoszczelnych. W rejonie grodzi skrajnika rufowego tunel może mieć zwiększoną szerokość lub wysokość ze względu na smukły kształt dolnej części kadłuba.

Wymagane jest zastosowanie szybu wyjściowego z tunelu, prowadzącego na górny pokład.

Tunel składa się z usztywnionych ścian bocznych i górnej. Nad wałem zazwyczaj jest usytuowany wzdłużnik poziomej ściany tunelu, który pełni jednocześnie rolę szyny suwnicy. Typowe konstrukcje tunelu pokazano na rys. XIII.122. Symbolem „1” oznaczono denny wzdłużnik środkowy a „2” – oś wału.

W wariantcie „I” zastosowano zaokrąglone naroża tunelu a w wariantcie „II” – naroża klasyczne.



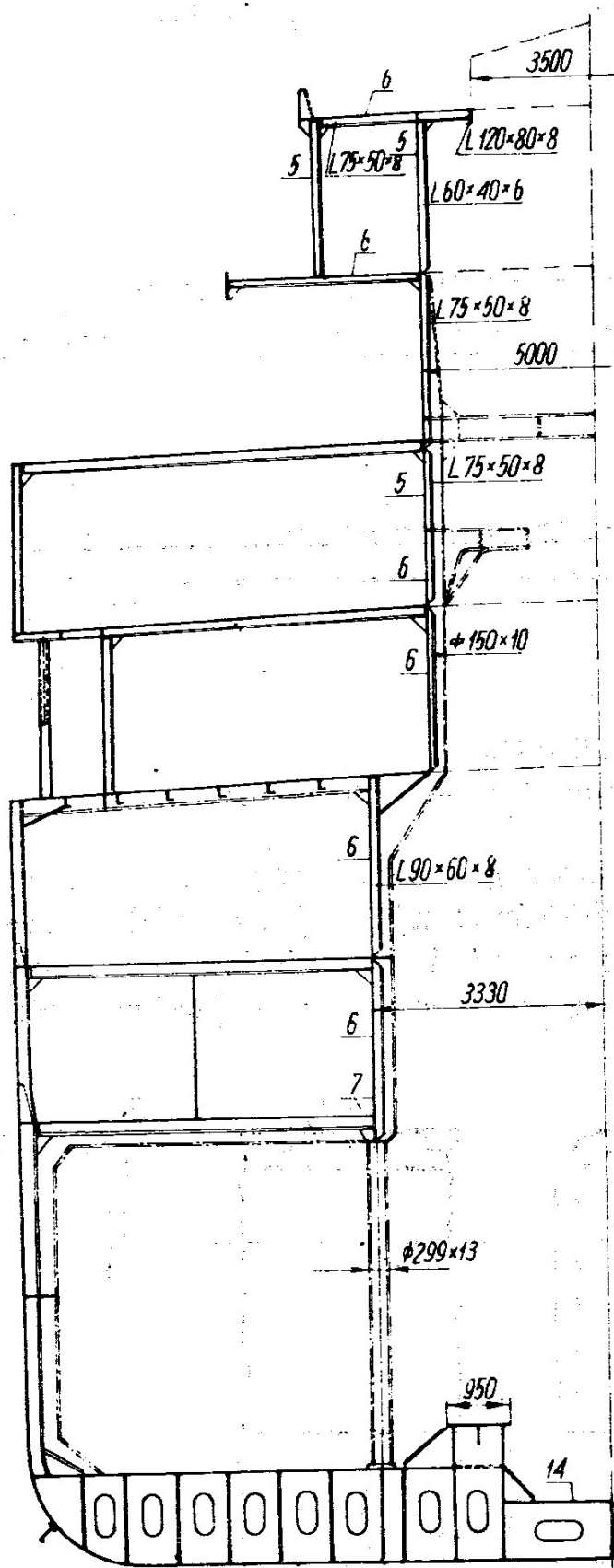
Rys. XIII.122 Konstrukcja tunelu linii wałów

## SZYBY MASZYNOWNI

Jeżeli nad przedziałem maszynowni kadłuba statku znajduje się nadbudówka ( lub pokładówka ), to nad pokładem głównym, nad silnikiem głównym zazwyczaj wydziela się w nadbudówce przestrzeń oddzieloną od niej szczelnymi, pionowymi ścianami. Przestrzeń ta tworzy tzw. szyb maszynowni, który jest niezbędny do montażu i demontażu urządzeń maszynowni. Górne zakończenie szybu stanowi zwykle świetlik lub pokrywa. Konstrukcja szybu przypomina konstrukcję grodzi statku. Ściany te podpierają pokłady w kierunku pionowym i w związku z tym należy zapewnić ich odpowiednią wytrzymałość na wyboczenie.

Typową konfigurację szybu maszynowni pokazano na rys. XIII.123.





Rys. XIII.123 Przykładowy szyb maszynowni

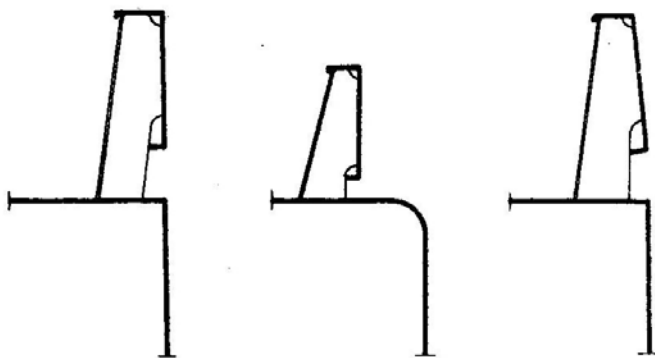
## NADBURCIA

Nadburcie jest barierą zabezpieczającą ludzi lub przedmioty przed wypadnięciem z pokładu otwartego za burtę. Jest to także rodzaj ochrony przed zalewaniem pokładu przez fale w warunkach sztormowych. Z tego powodu stosowanie nadburcia jest zalecane w części dziobowej statku, w przypadku pokładów położonych nisko nad wodnicą konstrukcyjną. W pozostałej części statku można stosować bariery.

Wysokość nadburć lub barier powinna być nie mniejsza niż 1,1 m.

Typowa konstrukcja nadburcia składa się z poszycia o grubości rzędu 5 do 10 mm, zakończonego na górnej krawędzi kształtownikiem lub rurą i opartego na wspornikach (rys. XIII.124 ). Poszycie nadburcia nie może być łączone z mocnicą burtową lub pokładową aby uniknąć pęknięć zmęczeniowych. Nadburcie jest wykonywane z wielu segmentów aby nie przenosiło ono znaczących naprężeń od zginania ogólnego kadłuba statku.

W poszyciu nadburcia muszą znajdować się otwory umożliwiające odpowiednio szybkie spływanie wody z pokładu w warunkach sztormowych. Wielkość tych otworów określa konwencja o liniach ładunkowych. W niektórych przypadkach wystarczająco szybkie spływanie wody zapewnia szczelina pod poszyciem nadburcia.



Rys. XIII.124 Możliwe konstrukcje nadburcia

## XIV. KADŁUBY STATKÓW ŚRÓDLĄDOWYCH

### Specyficzne cechy statków śródlądowych

Są to statki przeznaczone do żeglugi na wodach osłoniętych, takich jak rzeki, jeziora, zatoki, itp.

Wielkość tych statków jest na ogół mała w porównaniu np. ze statkami morskimi wielkości 'panamax'. Porównanie rozmiarów i proporcji wymiarów przekroju poprzecznego masowca wielkości 'panamax' i barki śródlądowej o nośności 700 ton przedstawiono na rys. XIV.1.

Oba statki przedstawiono w tej samej skali.

Wariant „a” to masowiec o parametrach:

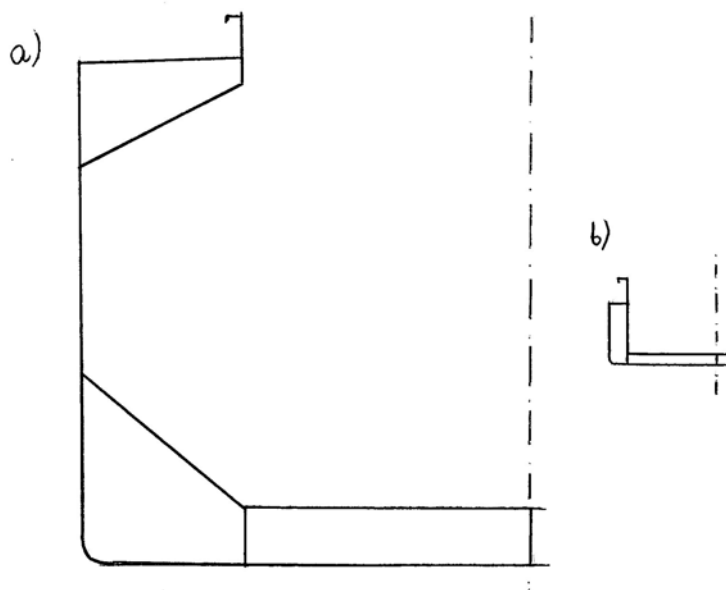
- nośność: 70000 ton;
- długość całkowita  $L = 220$  m;
- szerokość:  $B = 32,2$  m;
- wysokość boczna:  $H = 18$  m;
- $B/H = 1,8$ ;  $L/H = 12$ ;  $L/B = 6,8$ .

Wariant „b” to barka śródlądowa o parametrach:

- nośność: 700 ton;
- długość całkowita  $L = 55,5$  m;
- szerokość:  $B = 8,16$  m;
- wysokość boczna:  $H = 2,2$  m;
- $B/H = 3,7$ ;  $L/H = 25$ ;  $L/B = 6,8$ .

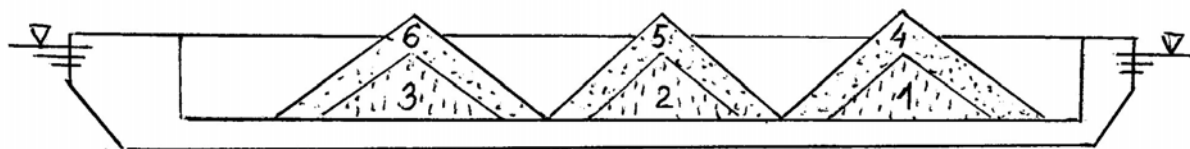
Widzimy, że wartości  $B/H$  i  $L/H$  barki są ok. 2 razy większe niż odpowiednie wartości dla masowca 'panamax'.

Takie proporcje wymiarów kadłuba są typowe dla większości statków śródlądowych, gdyż w ich przypadku ważne jest utrzymanie względnie małego zanurzenia – ze względu na płytkość akwenów. Znaczna wartość ilorazu  $L/H$  oznacza jednak trudności z zapewnieniem odpowiedniej wytrzymałości statku na zginanie ogólne – nawet w przypadku statków względnie małych, przy stosowaniu umiarkowanych grubości blach elementów konstrukcji kadłuba.



Rys. XIV.1 Porównanie wymiarów statku morskiego i statku śródlądowego

W przypadku barek towarowych przeciążeniu barki w warunkach zginania ogólnego zapobiega się dzięki przestrzeganiu tzw. **Planu ładowania barki**. Barka powinna być ładowana względnie małymi porcjami ładunku – np. w sposób pokazany na rys. XIV.2. Cyfry na tym rysunku oznaczają wymaganą kolejność osiągnięcia kilku pośrednich stanów załadunku barki ładunkiem masowym. Widzimy, że na ogół nie powinno się stosować metody załadunku „za jednym przejściem wzdłuż barki” tylko metodę załadunku „w dwóch przejściach”.



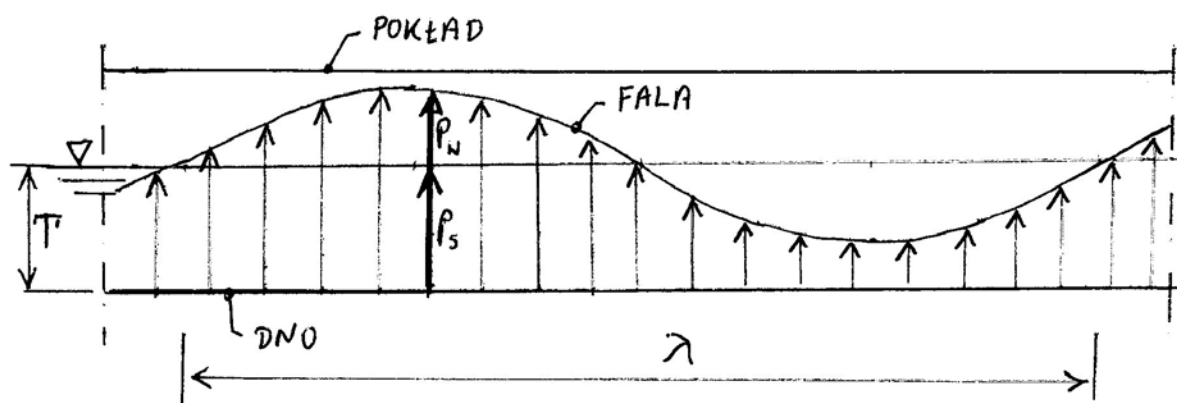
Rys. XIV.2 Plan ładowania barki

### Obciążenia falowe

Falowanie na akwenach śródlądowych jest nieznaczne w porównaniu z falowaniem na morzach. Ma ono jednak istotny wpływ na całkowite obciążenie kadłuba statku. Przepisy PRS [11] dzielą wszelkie akweny śródlądowe na terytorium Polski na 3 podstawowe rejony, o różnych wartościach  $H_{1/10}$  ( $H_{1/10}$  to charakterystyczna wartość wysokości fal, przekraczana przez 1/10 najwyższych fal; pamiętajmy, że falowanie ma charakter losowy) i różnych obliczeniowych długościach fal  $\lambda$ :

- rejon „1” ( $H_{1/10} = 2,0$  m;  $\lambda = 20$  m) – np. Zatoka Gdańska;
- rejon „2” ( $H_{1/10} = 1,2$  m;  $\lambda = 12$  m) – np. Zalew Szczeciński, Zatoka Pucka;
- rejon „3” ( $H_{1/10} = 0,6$  m;  $\lambda = 6$  m) – rzeki i większość jezior.

Obciążenia obliczeniowe wg Przepisów [11] odpowiadają statycznemu postawieniu statku na falach regularnych (sinusoidalnych) o powyższych wartościach  $H_{1/10}$  i  $\lambda$ . Ciśnienie na dno i burty powiększa się więc (lub zmniejsza) ponad ciśnienie statyczne  $p_s = \rho g T$  o wartość  $p_w = \rho g h$ , gdzie  $\rho$  oznacza gęstość wody,  $g$  jest przyspieszeniem ziemskim,  $T$  – zanurzeniem statku a  $h$  oznacza poziom fali ponad poziom wody spokojnej. Rozkład ciśnień obliczeniowych wzdłuż barki pokazano na rys. XIV.3.



Rys. XIV.3 Ciśnienia obliczeniowe od wody – rozkład wzdłuż barki

Ruchy kadłuba statku na tak krótkich falach jak wyżej są pomijalnie małe i w [11] pomija się wpływ przechyłów i przyspieszeń kadłuba na fali na wartość obciążeń obliczeniowych.

### Typy statków śródlądowych

Najbardziej popularne typy statków śródlądowych to:

- barki ( pchane lub motorowe ) do transportu ładunków suchych ( masowych, drobnicowych, kontenerów, itp.);
- barki zbiornikowe ( do transportu paliw, olejów, itp.);
- statki pasażerskie;
- barki do transportu ładunków niebezpiecznych ( chemikalia w formie stałej lub ciekłej, skroplony gaz, itp.);
- promy;
- dźwigi pływające;
- pogłębiarki.

### Przykładowe konstrukcje kadłubów barek

Przykładowe konstrukcje barek pokazano na rys. XIV.4 do XIV.7.

Na rys. XIV.4 pokazano przekroje poprzeczne na wręgu zwykłym i na wręgu ramowym barki o nośności 500 ton, przeznaczonej do transportu ładunków suchych.

Podstawowe wymiary barki :  $L = 45,1$  m,  $B = 8,9$  m,  $H = 1,70$  m,  $T = 1,6$  m.

Barka ma tylko jedną ładownię. Przy transporcie ładunków masowych takich jak np. żwir, węgiel, itp., nie jest wymagane stosowanie pokryw luków. Nad jedynym pokładem znajduje się ciągła wzdłużna zrębница luku a poniżej niej – burta wewnętrzna. Burty, burty wewnętrzne i zrębnice wzdłużne są usztywnione wzdłużnie a dno poprzecznie. Odstęp wręgów wynosi 0,55 m.

Denniki mają formę belek teowych o wysokości 0,3 m. Przy takiej ich wysokości niemożliwe jest zastosowanie klasycznego dna podwójnego. Ponieważ barka ma transportować także ładunki masowe, to potrzebna jest gładka podłoga w ładowni. Warunek ten spełnia się poprzez zastosowanie konstrukcji dna pokazanej na rys. XIV.5.

Znaczenie symboli literowych na tym rysunku:

- 1 – dno;
- 2 – średnik dennika;
- 3 – mocnik średnika;
- 4 – płyty podłogi o szerokości 3 odstępów wręgowych;
- 5 – spawanie otworowe płyty podłogi do mocników denników.

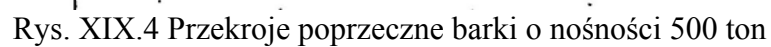
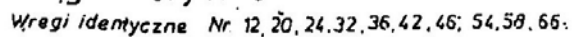
Brzegi płyt podłogi są spawane spoiną pachwinową do mocników denników. Dodatkowo płyty te są spawane otworowo do mocników denników oddalonych od krawędzi blach „4” ustawionych poprzecznie do osi barki. W ten sposób tworzy się konstrukcja podobna do dna podwójnego. Jest ona jednak niedostępna do przeglądów i niemożliwe jest rozpoznanie i kontrolowanie postępów korozji takiej konstrukcji.

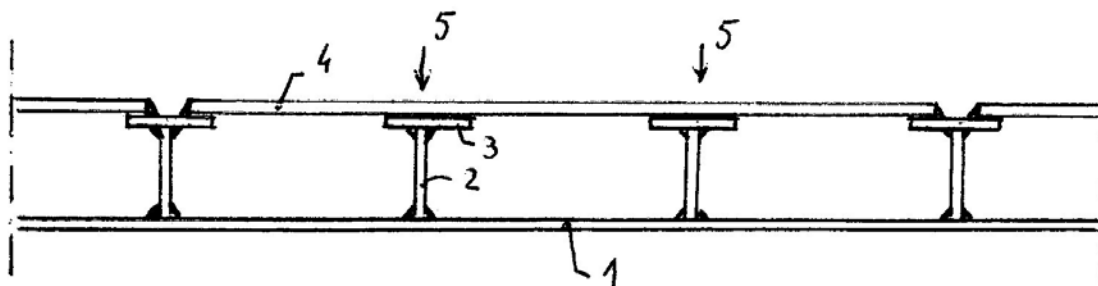
Denniki są jednakowe na wszystkich wręgach. Zastosowano także denny wzdłużnik środkowy ( ciągły ) i wstawkowe wzdłużniki boczne.

Wręgi ramowe w podwójnej burcie i pionowe węzłówki zrębownicy stosowane są co 4 odstępów wręgowe. Wręgi ramowe wykonano z ceowników, o które opierają się mocnikami wzdłużne usztywnienia burt w formie kątowników.

Warto zwrócić uwagę na stosunkowo małe wartości grubości blach w stosunku do stosowanych w kadłubach statków morskich. Wynoszą one 5,0 mm w przypadku dna i burty, 6,0 mm w przypadku burty wewnętrznej, 9,0 mm w przypadku zrębownicy. Średniki denników mają grubość 6,0 mm a ich mocniki to płaskowniki 70 x 8.

Wzrosty identyczne Nr 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 33, 36, 35, 37, 38, 40, 41, 42, 44, 45, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 63, 64, 69.





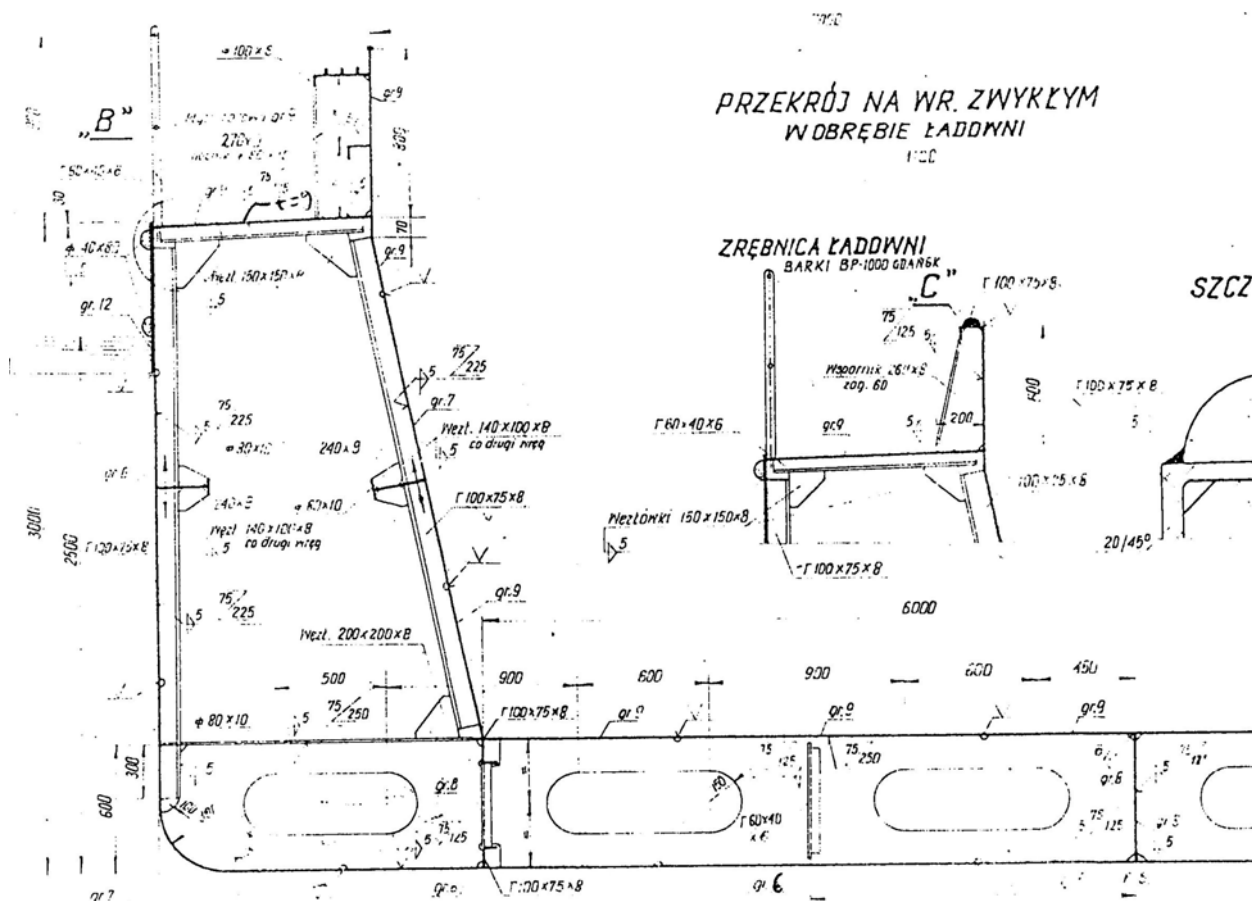
Rys. XIV.5 Podłoga w ładowni barki przystosowanej do transportu ładunków masowych

Przykład konstrukcji barki o nośności 1000 ton, przeznaczonej głównie do transportu ładunków masowych, pokazano na rys. XIV.6.

Podstawowe wymiary barki :  $L = 59,0$  m,  $B = 9,0$  m,  $H = 3,0$  m,  $T = 2,5$  m. Odstęp wręgów wynosi  $0,6$  m.

Na barce zastosowano dno podwójne o wysokości  $0,6$  m, w poprzecznym systemie wiązań ( z dennikami płytowymi na każdym wręgu ) oraz pochyłą burtę wewnętrzną. Burty zewnętrzna i wewnętrzna są usztywnione poprzecznie. Usztywnienia te opierają się na wzdłużnikach burtowych, które z kolei są podpierane przez wręgi ramowe usytuowane co  $4$  odstępy wręgowe. Ciągła zrębica wzdłużna liku jest usztywniona wzdłużnie.

Grubość blach w konstrukcji kadłuba tej barki wynosi od  $6$  do  $12$  mm ( patrz rys. XIV.6).

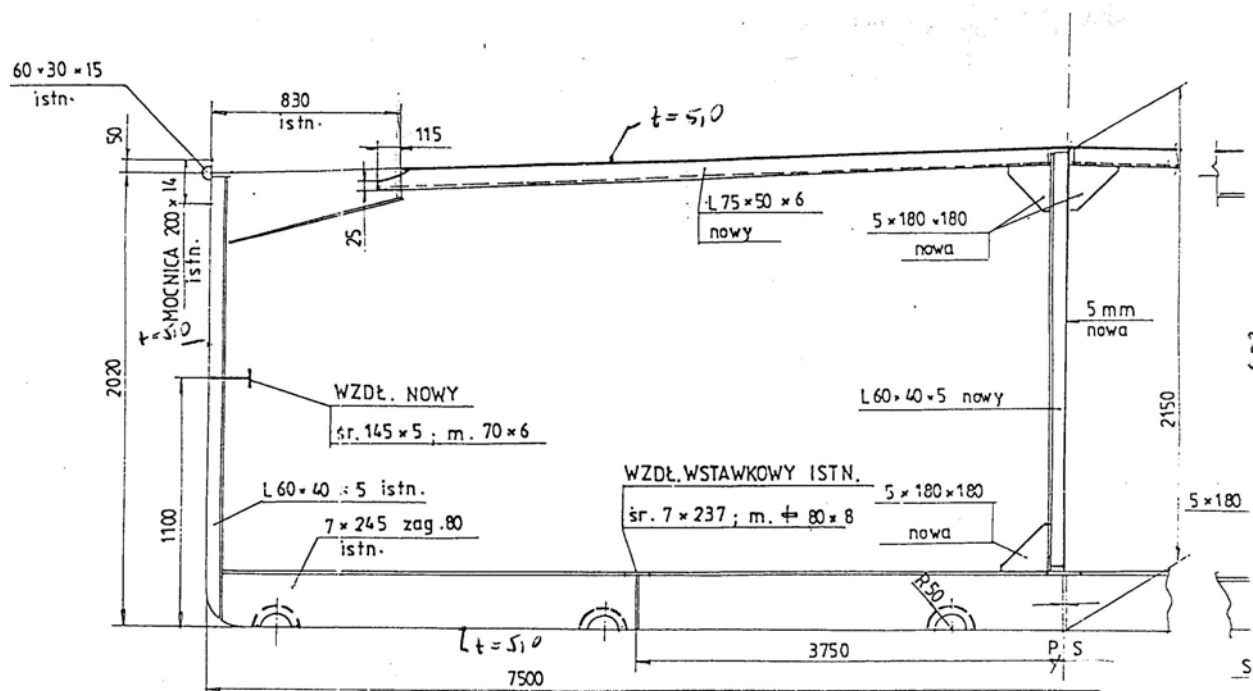


Rys. XIV.6 Przekrój poprzeczny barki o nośności 1000 ton

Przykład konstrukcji kadłuba barki zbiornikowej pokazano na rys. XIV.7. Barkę przebudowano z barki dotransportuj ładunków suchych. Dodano gródź wzdłużną w PS oraz „zamknięto” pokład. Barka jest zbudowana w poprzecznym systemie wiązań.



**WR. 30 WIDOK OD RUFY**  
 PODOBNIĘ WR. 31, 33, 34, 35, 36, 37, 39 ÷ 43 ; 45 ÷ 49 ; 51 ÷ 55 ; 57 ÷ 61  
 ORAZ WRĘGI Z PÓLKAMI DO OWRĘŻA : 63 ÷ 67 ; 69 ÷ 73 ; 75 ÷ 79 ; 81 ÷ 85 ; 87 ÷ 91 ; 93 ÷ 99



Rys. XIX.7 Przekrój poprzeczny barki zbiornikowej o nośności 400 ton

#### Uwagi na temat wytrzymałości kadłubów statków śródlądowych

Problem zapewnienia wystarczającej wytrzymałości ogólnej w warunkach zginania ogólnego zasygnalizowano już na początku niniejszego rozdziału.

Cienkie blachy dna i pokładu, w poprzecznym systemie wiązań, ulegają wyboczeniu sprężystemu przy poziomie naprężeń ściskających  $\sigma$  w warunkach zginania ogólnego rzędu kilkudziesięciu MPa. Rozkład naprężeń w ściskanym płacie poszycia ma wówczas charakter pokazany na rys. VII.13, zależny od wartości początkowych ugięć płyt poszycia pomiędzy usztywnieniami i od ciśnienia wody lub ładunku obciążającego płytę. Wyboczenie sprężyste takich płyt jest dopuszczalne wg [11].

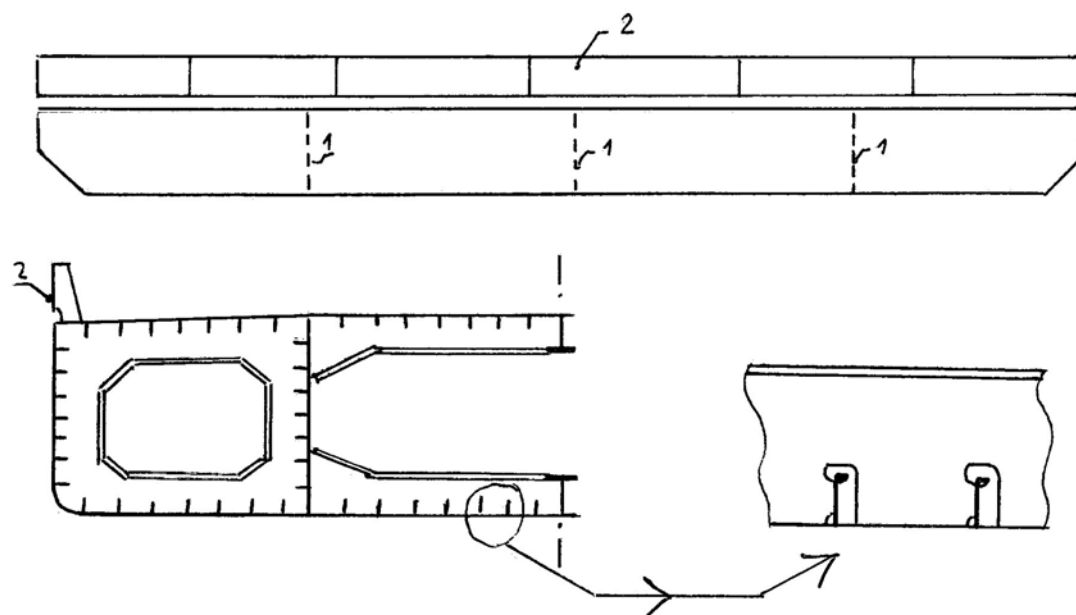
Wyboczenie sprężyste jest niedopuszczalne w przypadku płyt burt ściskanych i ścinanych, usztywnień i ścianek wiązarów. Zapewnienie stateczności tych elementów konstrukcji stwarza wiele problemów z powodu ich delikatnej konstrukcji.

#### Uwagi na temat wymagań Przepisów towarzystw klasyfikacyjnych

Przepisy klasyfikacji i budowy statków śródlądowych ( np. [11]) zawierają tzw. ogólne wymagania konstrukcyjne ( np. rozmieszczenie elementów konstrukcji, konstrukcja połączeń i usztywnień elementów, itp.), definiują obciążenia obliczeniowe, określają sposób obliczania naprężeń w konstrukcji, podają dopuszczalny poziom naprężeń w konstrukcji i zawierają kryteria dotyczące stateczności elementów konstrukcji.

#### Uwagi na temat konstrukcji wybranych typów statków

Przykład konstrukcji tzw. **barki pełnopokładowej** pokazano na rys. XIV.8 (1 – grodzie poprzeczne; 2 – nadburcie). Ładunek jest układany tylko na pokładzie. Przestrzeń kadłuba barki jest podzielona wodoszczelnymi grodziami poprzecznymi i wzdłużnymi co zapewnia niezatapialność takiej barki. Barka jest zbudowana we wzdłużnym systemie wiązań.



Rys. XIV.8 Konstrukcja barki pełnopokładowej

**Pontony** mają konstrukcję podobną do barek pełnopokładowych ale nie mają nadburcia. Są wykorzystywane do wielu celów. Mogą transportować np. ładunki wielkogabarytowe zamocowane do ich pokładu.

**Statki pasażerskie** mają na ogół znacznych rozmiarów nadbudówkę ustawioną na kadłubie o konstrukcji podobnej do wcześniej omówionych kadłubów barek.

**Promy rzeczne** służą do transportu ludzi i pojazdów z jednego brzegu rzeki na drugi. Często płaszczyzna owreża jest płaszczyzną symetrii. Mają własny napęd lub są przeciągane za pomocą liny. Pojazdy są ustawiane na pokładzie o odpowiednio mocnej konstrukcji.

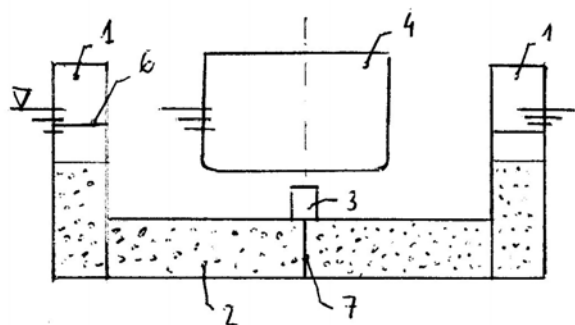
## XV. DOKI PŁYWAJĄCE

Każdy statek powinien być wynurzony z wody nie rzadziej niż co 2,5 roku aby dokonać przeglądu podwodnej części kadłuba i śruby napędowej oraz, w razie potrzeby, wykonać niezbędne naprawy. Proces ten można przeprowadzić w tzw. doku suchym lub z zastosowaniem doku pływającego.

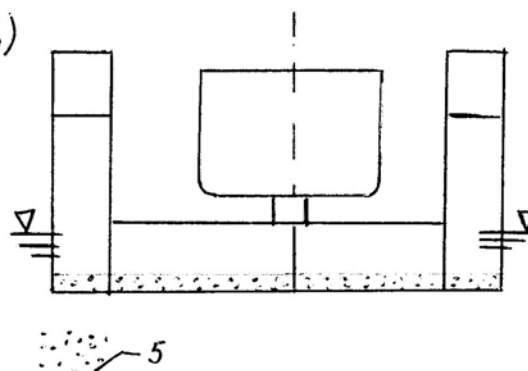
Podnoszenie statku ponad poziom wody z zastosowaniem doku pływającego wyjaśnia rys. XV.1. Znaczenie symboli literowych na tym rysunku:

- 1 – baszty doku;
- 2 – ponton doku;
- 3 – podpory stępkowe ( kilbloki );
- 4 – statek;
- 5 – balast wodny;
- 6 – pokład bezpieczeństwa;
- 7 – gródź wzdłużna w PS doku.

a)



b)



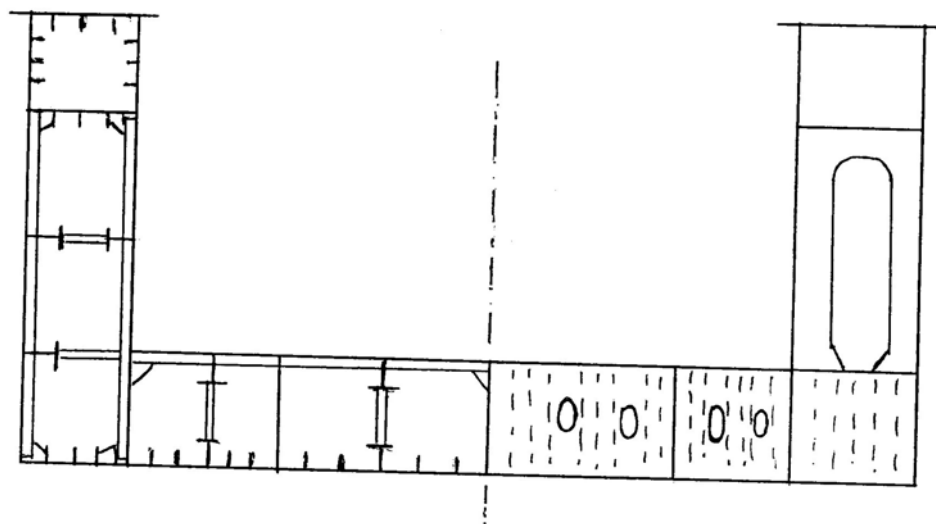
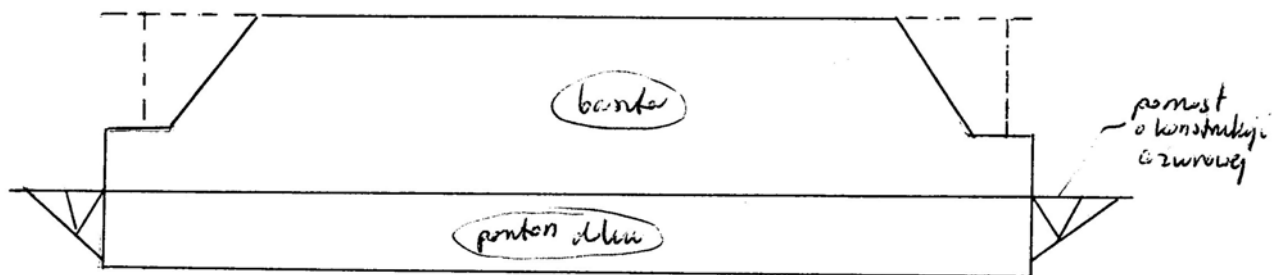
Rys. XV.1 Wynurzanie statku z zastosowaniem doku pływającego

Przekrój poprzeczny doku pływającego przypomina przekrój kontenerowca w rejonie owręża. Nie posiada jednak zamkniętych części skrajnych. Przestrzeń w basztach poniżej pokładu bezpieczeństwa i w pontonie doku są wykorzystywane jako zbiorniki balastowe. Dzięki temu dok można zanurzyć ( patrz część „a” na rys. XV.1) i wprowadzić statek pomiędzy baszty. Następnie usuwa się część balastu ze zbiorników doku. Dok wynurza się a statek opiera się na podporach stępkowych ustawionych w odstępie rzędu 1 m. Dodatkowo statek jest asekurowany przez tzw. podpory boczne – kilka sztuk z każdej strony PS. Przy ostatecznym wynurzeniu doku pokład jego pontonu znajduje się ok. 0,2 do 0,5 m nad poziomem wody ( rys. XV.1 – b ).

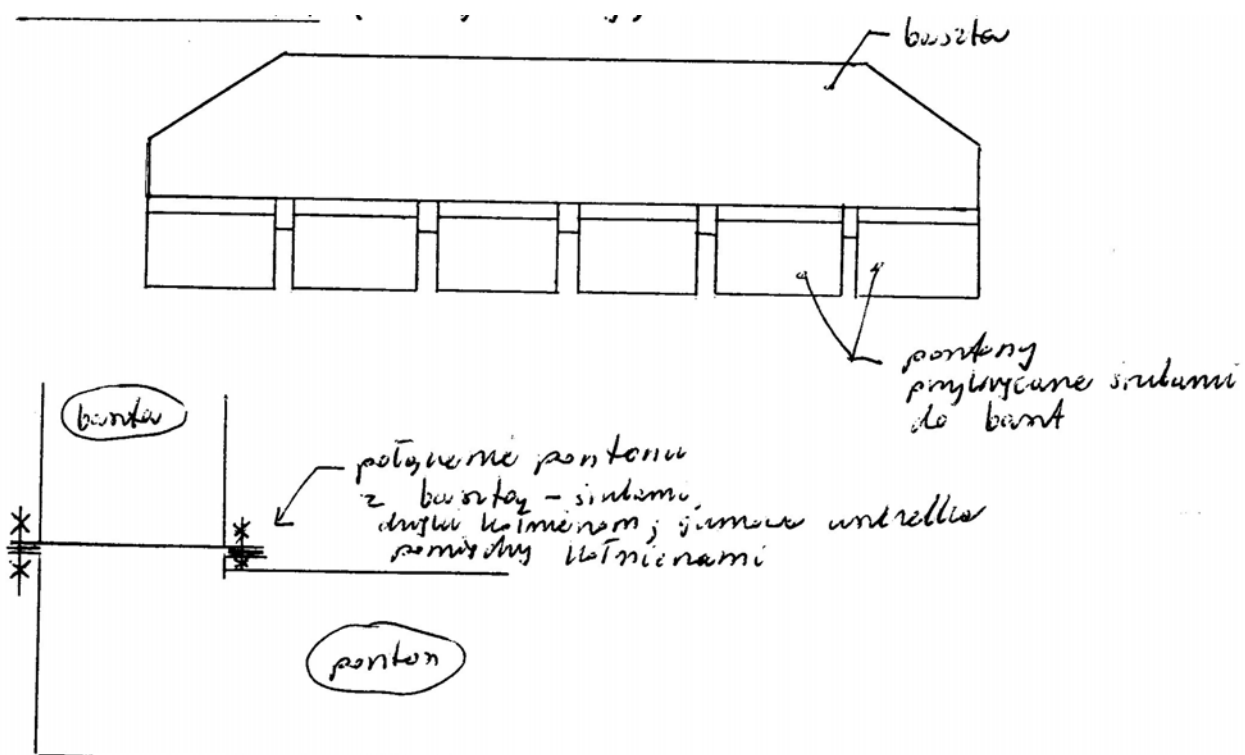
### Typy doków pływających

Stosowane są następujące typy doków pływających:

- skrzyniowe ( rys. XV.2);
- pontonowe ( rys. XV.3);
- podnośniki dokowe.



Rys. XV.2 Dok skrzyniowy

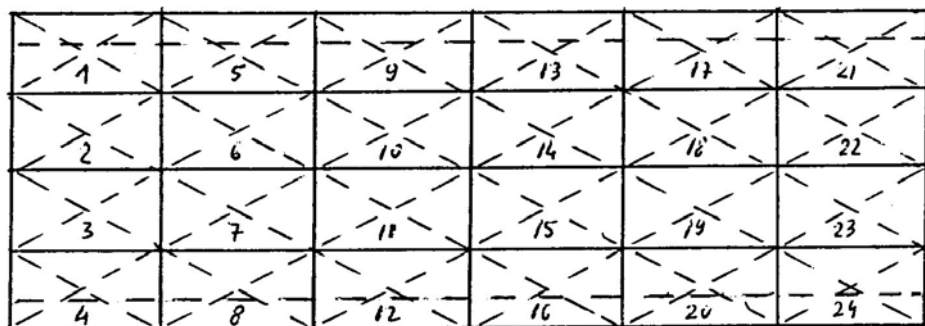
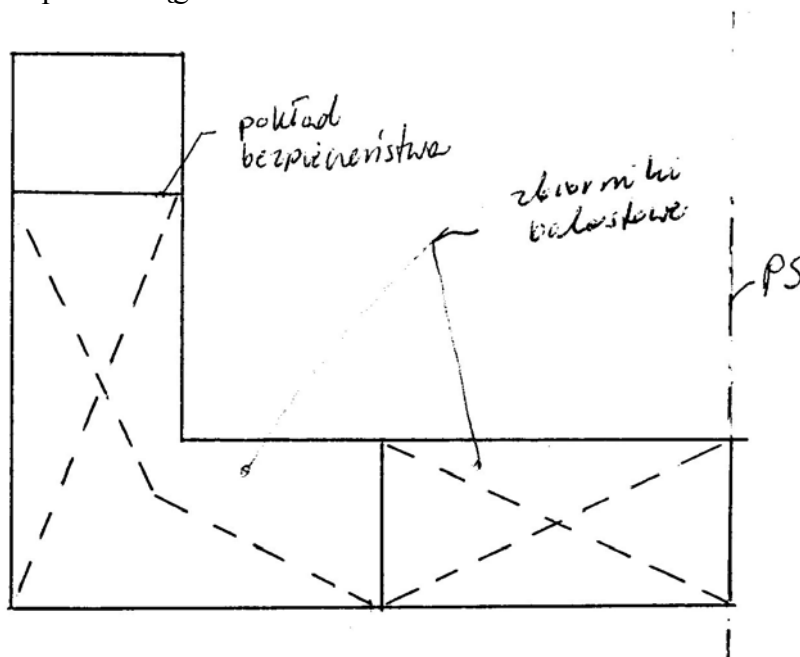


Rys. XV.3 Dok pontonowy

Dok skrzyniowy jest konstrukcją monolityczną, podobną do kadłuba statku. Dok pontonowy składa się z kilku pontonów ( najczęściej 6 ) przykręcanych śrubami do baszt. Pojedynczy ponton doku może być od niego oddzielony i podniesiony ponad wodę przez pozostałe pontony doku z basztami. Można w ten sposób remontować dok bez stosowania innych doków pływających lub podnośników. Podnośnik dokowy jest w pewnym sensie podobny do doku skrzyniowego ale zamiast pontonu ma ażurową konstrukcję spinającą baszty. Do dokowania statków stosowany jest niezależny ponton ustawiany na tej ażurowej konstrukcji. Po zanurzeniu doku można usunąć z niego statek podparty na tym niezależnym pontonie i przystąpić np. do wydokowania innego statku, na innym pontonie.

#### Zbiorniki balastowe doku

Dok można zanurzać lub wynurzać dzięki temu, że posiada on zbiorniki balastowe o znacznej pojemności. Klasyczny podział na zbiorniki balastowe przestrzeni doku poniżej pokładu bezpieczeństwa pokazano na rys. XV.4. Najczęściej stosuje się 24 zbiorniki balastowe. W pontonie doku wydziela się niewielkie przestrzenie, które są przedziałami pompowni. Dok zanurza się po otwarciu zaworów ( zasuw ) umożliwiających samoczynny napływ wody do jego zbiorników. Wodę usuwa się dzięki systemowi balastowemu złożonego z pomp i rurociągów.



Rys. XV.4 Zbiorniki balastowe doku

### Przykładowe parametry doków skrzyniowych

Niewielki dok ma parametry:

- udźwig :  $Q = 3000$  ton;
- długość pontonu :  $L_p = 100$  m;
- długość całkowita:  $L_c = 110$  m;
- szerokość:  $B = 25,5$  m;
- szerokość wewnętrzna ( pomiędzy basztami ) :  $B_w = 19,5$  m;
- wysokość;  $H = 11,2$  m;
- wysokość pontonu w PS:  $h_p = 3,1$  m.

Dok, który można określić jako duży ma parametry:

- udźwig :  $Q = 33000$  ton;
- długość pontonu :  $L_p = 235$  m;
- szerokość:  $B = 53$  m;
- szerokość wewnętrzna ( pomiędzy basztami ) :  $B_w = 45,2$  m;
- wysokość;  $H = 18$  m;
- wysokość pontonu w PS:  $h_p = 4,8$  m.

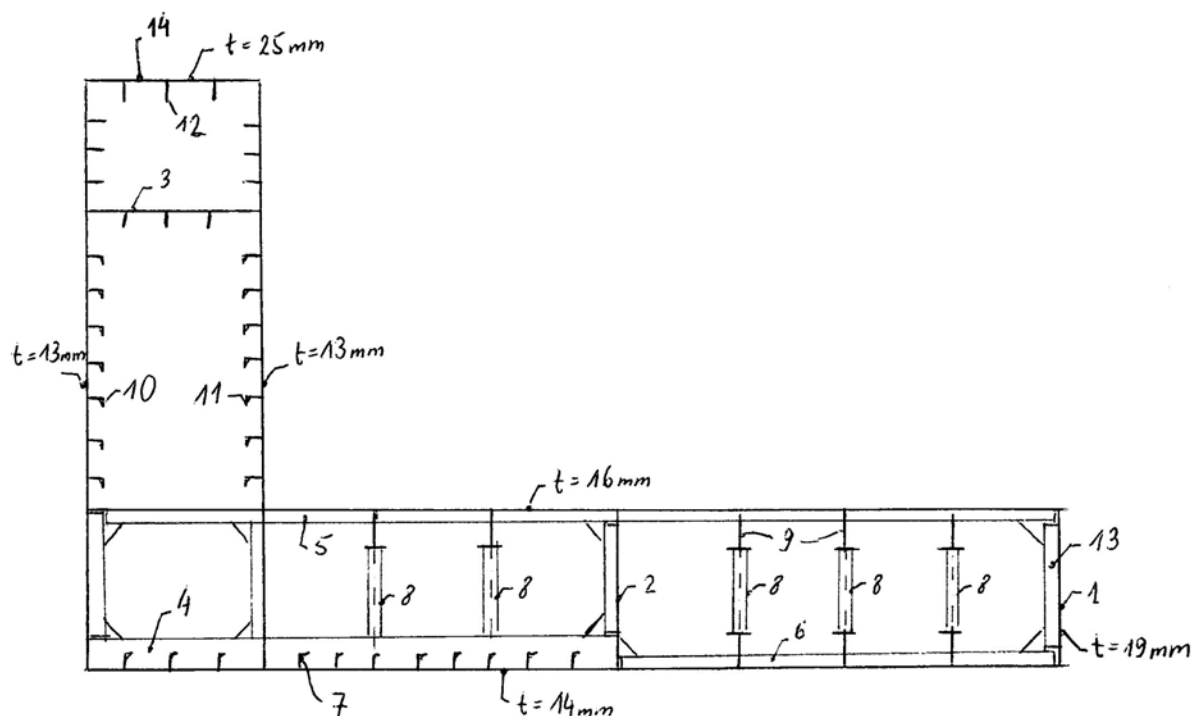
### Konstrukcja doku skrzyniowego

Przekrój poprzeczny na tzw. wręgu zwykłym większego z doków wspomnianych wyżej (  $Q = 33000$  ton ) przedstawiono schematycznie na rys. XV.5.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – gródź wzdluzna w PS doku;
- 2 – wzdluzna gródź boczna;
- 3 – pokład bezpieczeństwa;
- 4 – wiązlar poprzeczny dna pontonu;
- 5 – poprzeczne usztywnienie pokładu pontonu doku;
- 6 – poprzeczne usztywnienie dna pontonu doku;
- 7 – wzdluzne usztywnienie dna pontonu doku;
- 8 – pilersy;
- 9 – wzdluzne wiązary pokładu pontonu doku;
- 10 – wzdluzne usztywnienia zewnetrznej ściany baszty doku;
- 11 – wzdluzne usztywnienia wewnetrznej ściany baszty doku;
- 12 – wzdluzne usztywnienie pokładu górnego doku;
- 13 – pionowe usztywnienie grodzi wzdluznej w PS doku;
- 14 – pokład górny doku.

Na rysunku XV.5 podano także grubości niektórych blach.



Rys. XV.5 Przekrój poprzeczny dużego doku skrzyniowego

**Gródź wzdłużna w PS doku** przejmuje obciążenie od ciężaru dokowanego statku ( za pośrednictwem kilbłoków ) i jest granicą zbiorników balastowych.

**Przegrody poprzeczne** lub **grodzie poprzeczne** pontonu doku podpierają gródź w PS doku przenosząc obciążenie z niej do baszt doku; grodzie poprzeczne ( stosowane zamiast przegród) są granicą zbiorników balastowych. Przegrody poprzeczne są stosowane w odstępach rzędu 8 do 12 odstępów wręgów ( 4m do 8 m). Ich konstrukcja przypomina konstrukcję denników pełnych dna podwójnego statku.

**Wzdłużne grodzie boczne** stanowią granicę zbiorników balastowych. Zwykle na nich ustawia się podpory boczne statku.

**Wiązary teowe** podpierają usztywnienia poszycia oraz stanowią dogodne miejsce do ustawiania nad nimi podpór bocznych statku.

**Usztywnienia poszycia** podpierają płyty poszycia.

Widzimy, że baszty doku pokazanego na rys. XV.5 są usztywnione wzdłużnie. Jest to korzystne rozwiązanie ze względu na konieczność uzyskania odpowiednio dużej wartości wskaźnika przekroju kadłuba doku – aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość doku w warunkach zginania ogólnego.

W podobny sposób usztywniona jest część dna doku, w pobliżu baszt.

Pokład pontonu oraz dno w rejonie PS są usztywnione poprzecznie. Pozwala to zapewnić odpowiednią wartość wskaźnika przekroju przegród poprzecznych doku z pasami współpracującymi pokładu pontonu i dna, aby ponton doku wykazał odpowiednią wytrzymałość w warunkach jego zginania pomiędzy basztami, wskutek ciężaru dokowanego statku.

Poprzeczny system usztywnień pokładu pontonu w rejonie PS pozwala także zapewnić stateczność płyt poszycia w warunkach zginania jak wyżej.

Na dokach mniejszych bywa stosowany klasyczny poprzeczny system usztywnień poszycia dna i pokładu pontonu, baszt i pokładu górnego.

#### Konstrukcja doku pontonowego

W zginaniu ogólnym takiego doku biorą udział tylko baszty, gdyż pomiędzy pontonami są przerwy. Może to stwarzać problemy z zapewnieniem odpowiedniej wytrzymałości doku w warunkach zginania ogólnego. Doki o takiej konstrukcji są więc względnie małe.

Konstrukcja baszt i pontonów jest w zasadzie podobna do ich odpowiedników w dokach skrzyniowych.

Charakterystycznym elementem konstrukcji są połączenia śrubowe pontonów z basztami. Szczelność tego połączenia zapewnia specjalna uszczelka gumowa.

#### Proces dokowania statku

Podnoszenie statku na doku a następnie opuszczanie do wody umożliwiają zbiorniki balastowe doku ( patrz rys. XV.4 ).

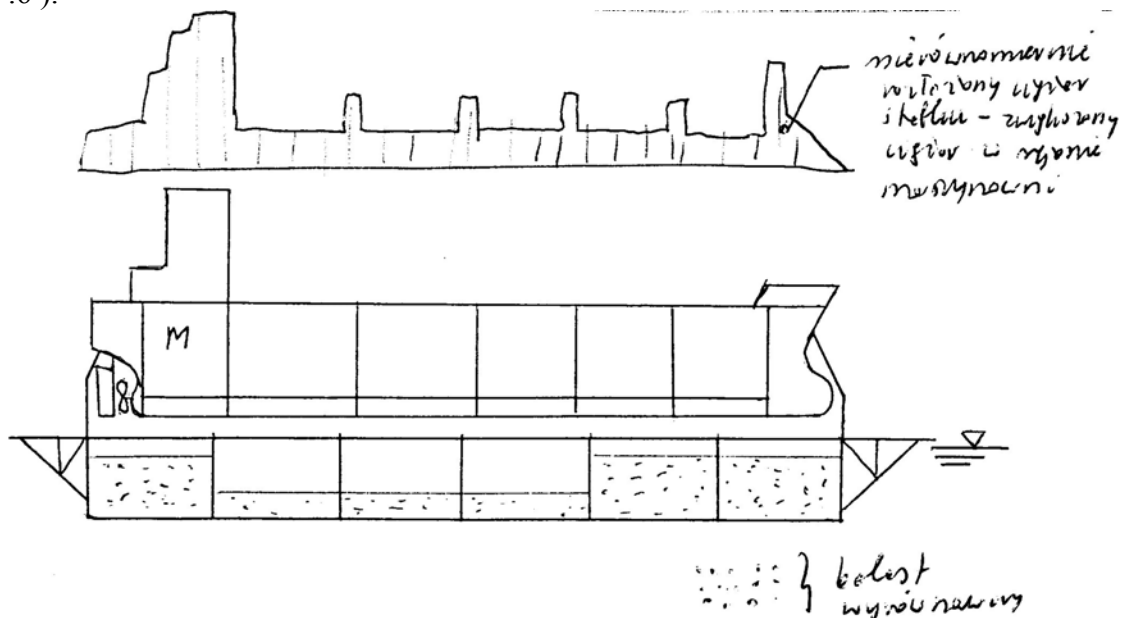
Zapełniając balastem wodnym zbiorniki balastowe doku można go zanurzyć tak, że wolna burta będzie miała wartość rzędu zaledwie 1 m. Wówczas statek zostaje wciągnięty pomiędzy baszty – z użyciem specjalnych wciągarek posadowionych na górnym pokładzie doku.

Usunięcie części balastu wodnego ze zbiorników doku spowoduje częściowe oparcie statku na podporach stępkowych. Dalsze usuwanie balastu spowoduje pełne wynurzenie statku.

Pokład pontonu doku przy baszcie jest wówczas 0,15 do 0,25 m powyżej poziomu wody.

Pokład ten jest lekko pochyły w kierunku baszt – aby ułatwić spływanie wody.

Masa balastu wodnego, który może być umieszczony w zbiornikach balastowych jest na ogół nie mniej niż o 30% większa od udźwigu doku. Dzięki temu balast pozostający w zbiornikach doku pod wydokowanym statkiem pozwala ustawić dok „na równej stępcie”. Rozkład masy statku w stanie do dokowania jest bowiem na ogół nierównomierny wzdłuż statku ( patrz rys. XV.6 ).



Rys. XV.6 Rozłożenie balastu wyrównawczego w zbiornikach doku

Ciężar statku jest przekazywany poprzez kilbloki na gródź wzdłużną w PS pontonu doku.

Wartości sił reakcji kilbloków na ogół są rozłożone bardzo nierównomiernie - ze względu na



charakter rozkładu masy statku wzdłuż jego osi oraz odkształcalność konstrukcji kadłubów statku i doku.

Obliczenia MES wykazują, że w rejonie sztywnego dna statku (zwykle pod grodziami poprzecznymi statku) reakcje kilbłoków osiągają znacznie większe wartości niż w środkowych rejonach przedziałów pomiędzy sztywnymi rejonami dna. Szczególnie duże wartości tych sił występują pod ciężką maszynownią statku usytuowaną w jego części rufowej. Grozi to uszkodzeniem kilbłoków i grodzi pontonu doku w PS. Zmniejszenie wartości tych sił uzyskuje się wskutek odpowiedniego rozłożenia balastu wyrównawczego w zbiornikach doku. Bywa i tak, że trzeba obniżyć wysokość warstwy drewna na wierzchołkach skrajnych kilbłoków w rejonie maszynowni statku.

#### Wymagania Przepisów klasyfikacji i budowy doków pływających w zakresie wytrzymałości konstrukcji kadłuba

Przykład takich Przepisów to pozycja [12].

Podobnie jak w przypadku kadłubów statków należy spełnić kryteria dotyczące:

- wytrzymałości ogólnej;
- wytrzymałości strefowej (poprzecznej);
- wytrzymałości lokalnej.

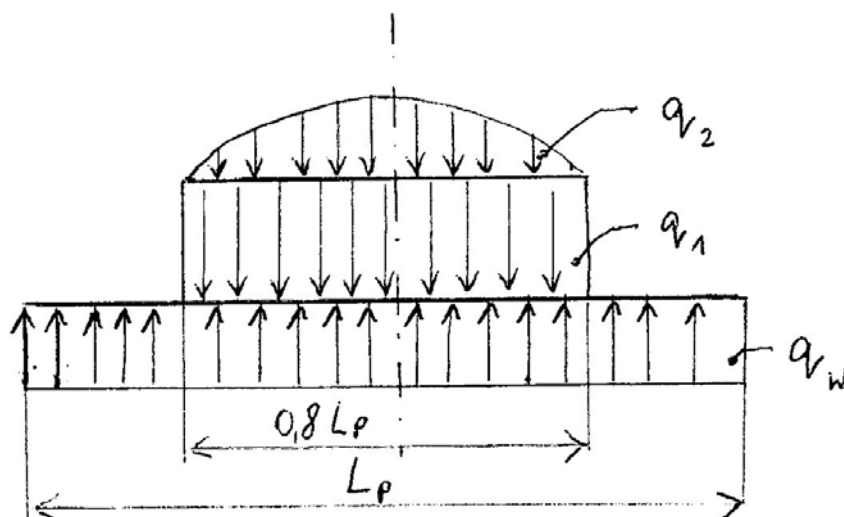
W Przepisach zdefiniowane są obciążenia obliczeniowe i podane są kryteria dotyczące wytrzymałości i stateczności elementów konstrukcji.

#### **Wytrzymałość ogólna**

Dok obciążony ciężarem ustawionego na nim statku podlega zginaniu ogólnemu.

Duże doki są projektowane z zastosowaniem obliczeń MES układu dok – statek, gdzie rozważa się skrajnie niekorzystne sytuacje ze względu na wytrzymałość tego układu.

Wytrzymałość doku powinna być przy tym nie mniejsza od wymaganej dla zrównoważenia momentów zginających od umownego obciążenia modelu belkowego doku, pokazanego na rys. XV.7.



Rys. XV.7 Minimalne wymagania dotyczące wytrzymałości ogólnej doku

$2/3$  udźwigu  $Q$  doku daje obciążenie ciągłe  $q_1$  belki doku, rozłożone równomiernie na długości  $0,8 L_p$  ( $L_p$  – długość pontonu doku). Pozostałe  $1/3 Q$  daje obciążenie ciągłe  $q_2$  parabolicznie rozłożone na długości jak wyżej. Obciążenie ciągłe  $q_w$  od wyporu, o stałej wartości na długości  $L_p$  doku, równoważy ciężar  $Q$ . Takie umowne obciążenie wywołuje

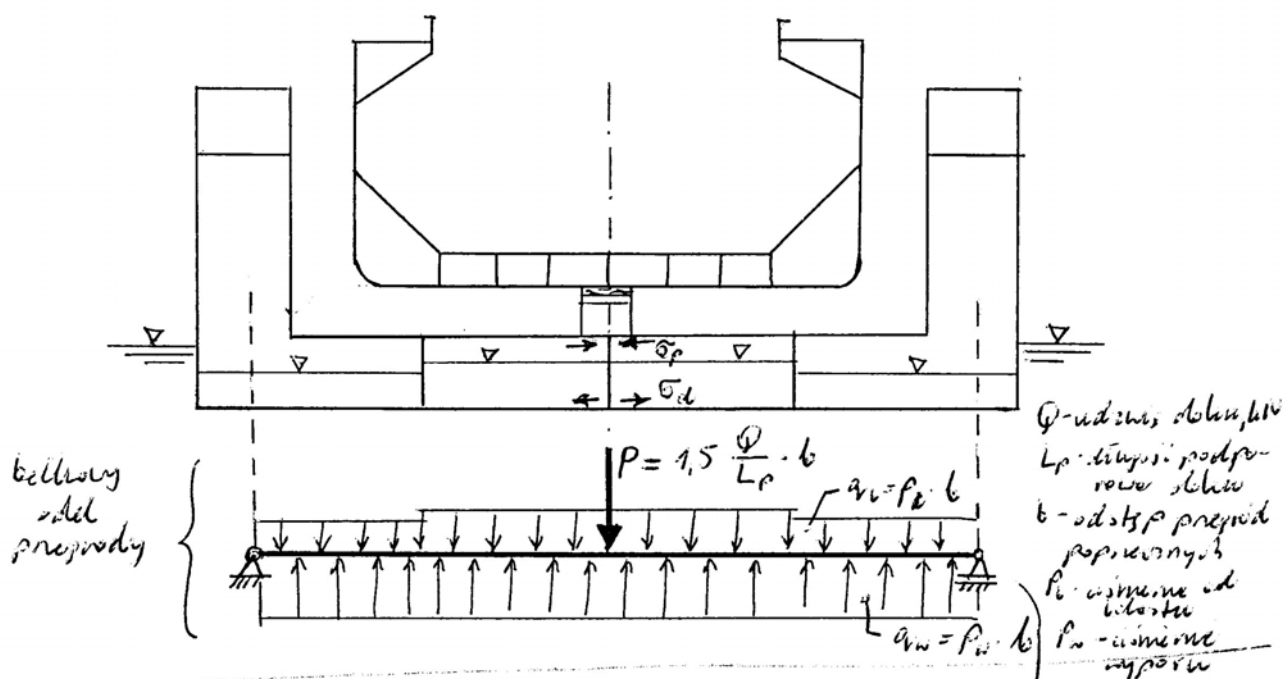
ekstremalną wartość momentu zginającego w przekroju owręża doku. Należy zapewnić tak dużą wartość wskaźnika przekroju kadłuba doku, że naprężenia  $\sigma$  od zginania ogólnego nie przekroczą poziomu  $140k$  MPa (  $k$  – współczynnik uwzględniający wytrzymałość zastosowanej stali ).

Aby zabezpieczyć dok przed jego przeciążeniem w warunkach zginania ogólnego, Przepisy [12] wymagają aby dok był wyposażony w tzw. przyrząd kontroli obciążenia. Przyrząd ten mierzy strzałkę ugięcia lub wygięcia doku, której wartość jest proporcjonalna do ekstremalnej wartości momentu zginającego w kadłubie doku.

### Wytrzymałość strefowa

W ramach analizy wytrzymałości strefowej należy sprawdzić wytrzymałość przegród poprzecznych pontonu doku uginających się między basztami wskutek nacisku kilbłoków na gródź wzdłużną w PS. Przepisy [12] wymagają aby zastosować belkowy model przegrody określony na rys. XV.8. Belka składa się z przegrody poprzecznej i z pasów pokładu i dna pontonu doku o szerokości  $b$  równej wartości odstępu przegród. Belka jest obciążona w PS siłą  $P$  odpowiadającą 150% średniego obciążenia kilbłoków od udźwigu doku rozłożonego na długości  $L_p$  pontonu doku. Belka jest także obciążona obciążeniami ciągłymi od ciśnienia wyporu i od ciężaru balastu wyrównawczego.

ZGINANIE POPRZECZNE – model do oceny wytrzymałości przegrody poprzecznej



Rys. XV.8 Belkowy model przegrody pontonu

Aby poziom naprężeń  $\sigma$  w belce nie przekroczył wartości dopuszczalnej poszycia pokładu i dna pontonu muszą być odpowiednio grube.

W ramach analizy wytrzymałości strefowej należy także sprawdzić przy pomocy bezpośrednich obliczeń MES wytrzymałość systemu przegród i grodzi poprzecznych i wzdłużnych pontonu doku w jego częściach skrajnych.

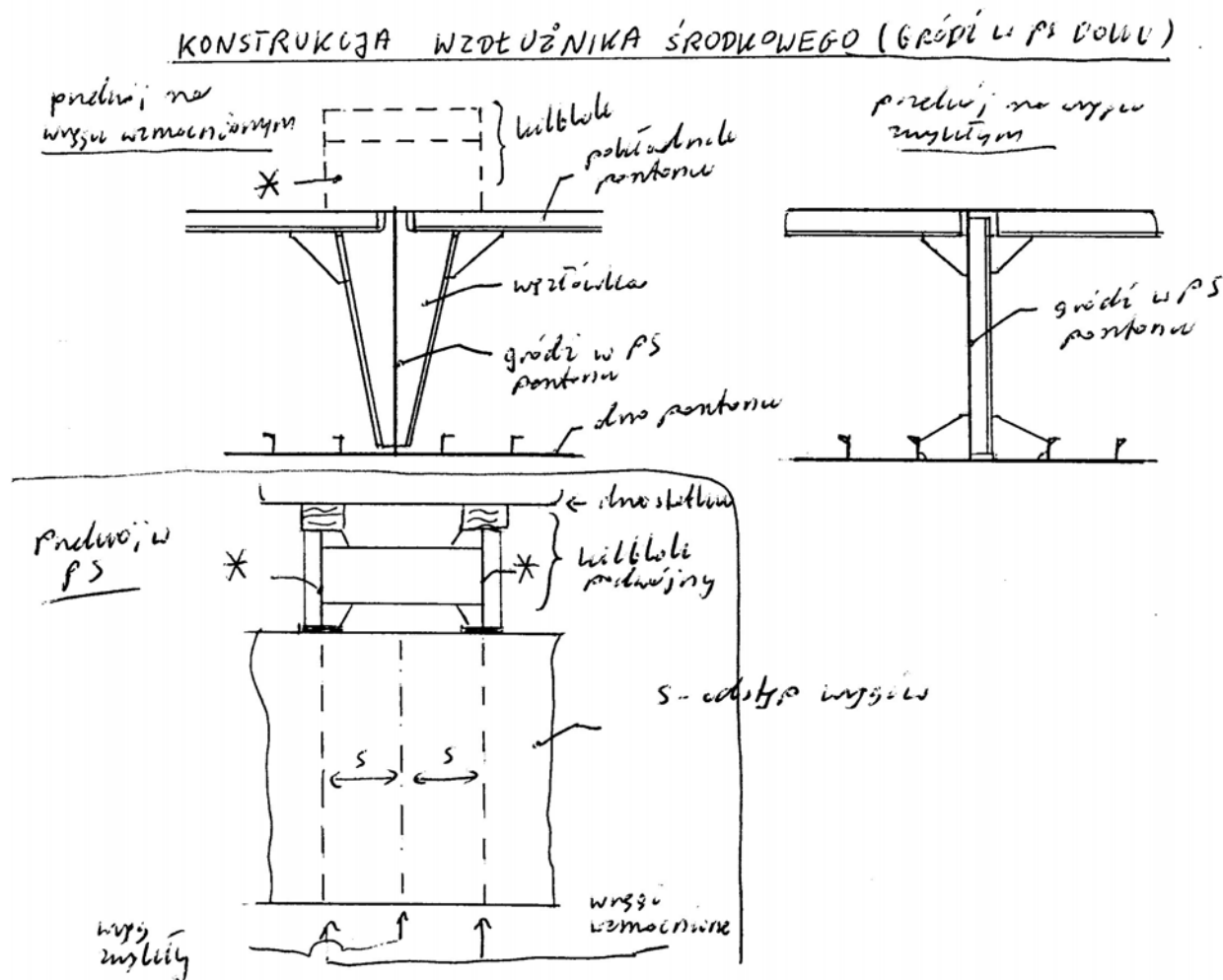
Do kategorii wytrzymałości strefowej należy także wytrzymałość systemu wiązarów teowych widocznych na rys. XV.5.

### Wytrzymałość lokalna

Do tej kategorii należy wytrzymałość poszycia i usztywnień poszycia. Wymagania wytrzymałościowe w tym zakresie są podobne do stosownych wymagań dotyczących kadłubów statków.

### Konstrukcja kilbloków i podpór bocznych

Podstawowym elementem wytrzymałościowym podpory stępkowej jest pionowa płyta oznaczona symbolem „\*„ na rys. XV.9.



Rys. XV.9 Konstrukcja kilbloków i grodzi wzdłużnej w PS

Stosowane są tzw. kilbloki podwójne gdzie ww. 2 płyty są ze sobą połączone i powstaje stabilna konstrukcja przypominająca stół. Płyty te są odpowiednio usztywnione. Nad płytami znajduje się warstwa drewna, na której opiera się bezpośredni dno statku. Drewno jest stosunkowo „miękkie” w porównaniu ze stalą i pozwala rozprzewadzić reakcję podpory na statek w formie nacisku rozłożonego prawie równomiernie na znacznej powierzchni dna statku. Dolna część takiej podbudowy drewnianej jest zbudowana z bali dębowych o łącznej wysokości rzędu 150 mm. Część górna to warstwa miękkiego drewna sosnowego o grubości rzędu 50 mm. Szerokość podbudowy drewnianej ( wymiar wzdłuż osi doku ) wynosi 200 do 300 mm a długość ( wymiar w kierunku poprzecznym do osi doku ) jest rzędu 1000 do 2000 mm.

Pionowe płyty nośne kilbłoków naciskają na gródź wzdłużną w PS doku na co drugim wręgu poprzez specjalne węzłówki wzmacniające tą gródź, widoczne na rys. XV.9.

Stosowane są różnorodne konstrukcje podpór bocznych ale ich idea jest podobna do kilbłoków. Mocna i odpowiednio usztywniona płyta pionowa, zakończona warstwą drewna, jest ustawiana na przegrodach, grodziach lub wiązarach teowych pokładu pontonu.

## XVI. OBIEKTY OCEANOTECHNICZNE

### Wstęp

W niniejszym wykładzie ograniczymy się tylko do podania podstawowych informacji dotyczących kadłubów platform wiertniczych i statków wiertniczych, które są wykorzystywane do poszukiwań i eksploatacji podmorskich złóż ropy naftowej i gazu. Sama technologia wykonywania odwiertów a następnie eksploatacji złóż jw. nie jest tutaj omawiana. Podane niżej informacje opracowano na podstawie [13] i [14].

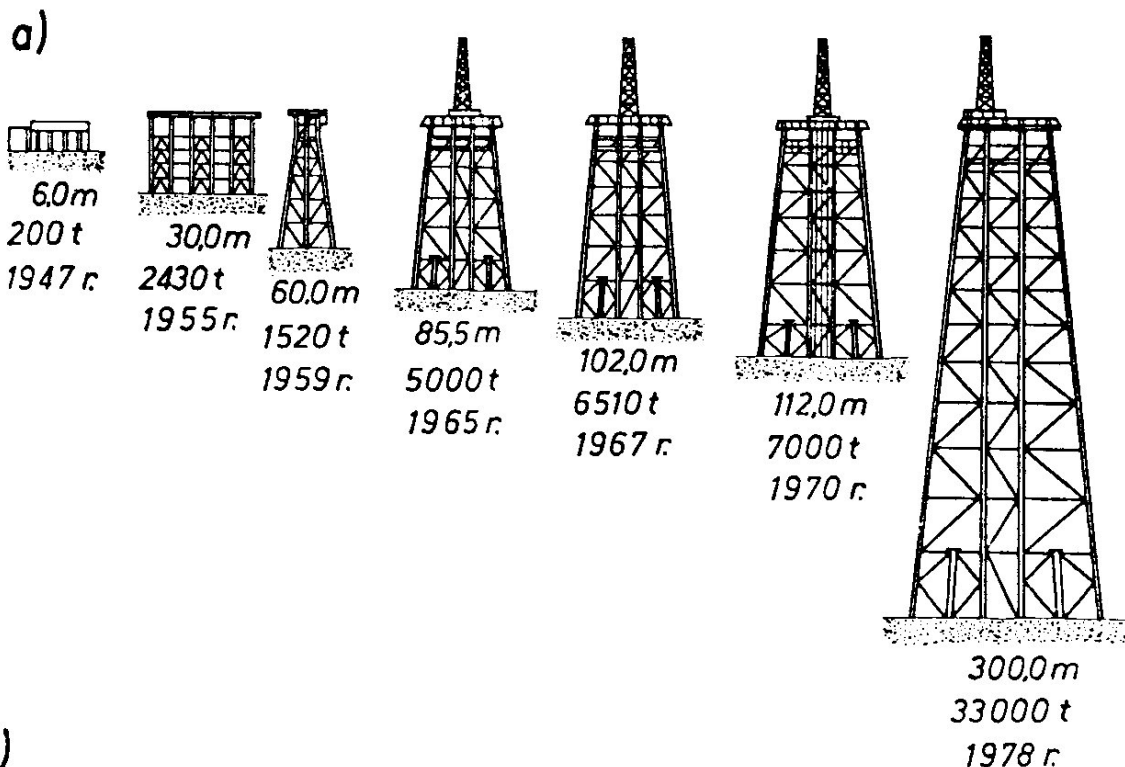
Dotyczą one takich obiektów jak:

- platformy stacjonarne;
- platformy samopodnośne;
- platformy półzanurzalne;
- statki wiertnicze.

### Budowa platform stacjonarnych

Nie są to obiekty pływające. Poniższe zdawkowe informacje na ich temat podano dlatego, że są to budowle służące do eksploatacji podmorskich zasobów ropy i gazu – podobnie jak wymienione wyżej obiekty pływające.

Rozwój tego typu platform stosowanych w Zatoce Meksykańskiej pokazano na rys. XVI.1. Pod szkicami poszczególnych platform podano głębokość akwenu przy jakiej mogą one być stosowane, całkowitą masę konstrukcji oraz rok zastosowania prototypu.



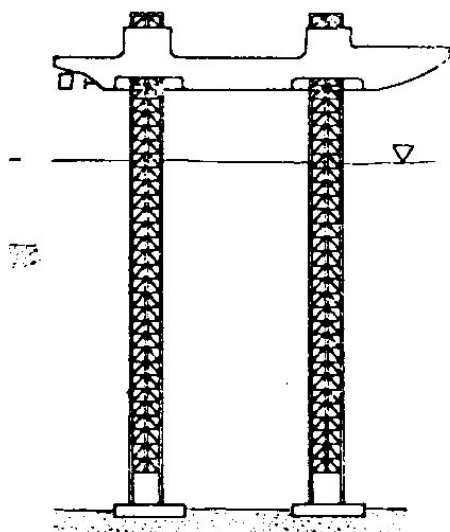
Rys. XVI.1 Rozwój platform stacjonarnych

Widzimy, że są to potężne stalowe konstrukcje spawane zbudowane z rur i kształtowników. Opierają się one na palach wbitych w dno akwenu. Na swoim pokładzie mogą pomieścić całość potrzebnego do wykonania odwiertów wyposażenia wiertniczego. Na ogół platformy te są budowane w stoczniach. Są one holowane na barkach do miejsca eksploatacji i opuszczane na dno akwenu.

Zbudowano także wiele platform żelbetowych. Ich konstrukcja nie jest omawiana w ramach niniejszego wykładu.

#### Budowa platform samopodnośnych

Platforma samopodnośna ma stalowy kadłub przypominający ponton, w którym są osadzone 3 ( nieraz 4 ) słupy nośne ( nogi). Dzięki specjalnemu mechanizmowi złożonemu z zębatach listew będących integralną częścią nóg, z którymi współpracują koła zębate napędzane silnikami elektrycznymi lub hydraulicznymi, nogi mogą być opuszczane z pontonu na dno akwenu. Po oparciu nóg na dnie ten sam mechanizm służy do podniesienia pontonu ponad poziom wody. Nogi są wówczas klinowane w kadłubie i platforma przypomina platformę stacjonarną, gdyż jest ustawiona na dnie akwenu. Schemat takiej konstrukcji przedstawiono na rys. XVI.2.



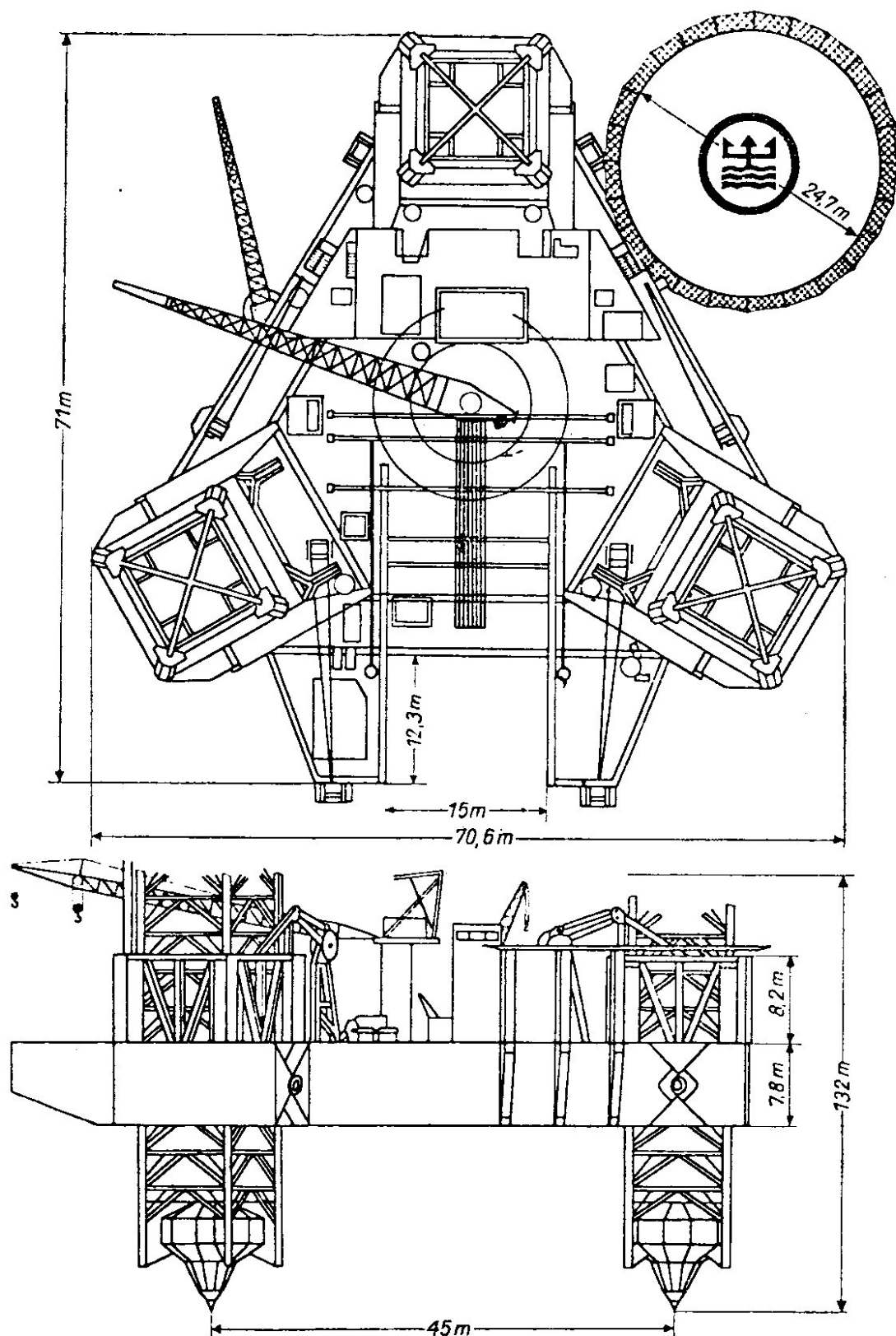
Rys. XVI.2 Schemat platformy samopodnośnej

Długość słupów nośnych największych zbudowanych platform tego typu osiąga 130 m, co umożliwia wiercenie na wodach głębokości nie większej niż 100 m. Budowa platform tego typu na wody głębsze przestaje mieć sens. Wynika to z problemu zapewnienia stateczności pływania tego typu obiektu w stanie, gdy słupy są maksymalnie wysoko uniesione w górę – aby holować platformę na płytkiej wodzie ( np. na okresowy przegląd do stoczni remontowej). Budowa platform samopodnośnych do eksploatacji na wody o głębokości większej niż 100m wymagałaby, z powodu konieczności zapewnienia stateczności pływania we wszelkich konfiguracjach, zwiększenia wymiarów pontonu. Wzrastałby ciężar pontonu i wymagane byłyby bardziej masywne słupy nośne, co oznaczałoby znów problemy z zapewnieniem stateczności. Pojawiłyby się także trudności z zapewnieniem wytrzymałości w warunkach oddziaływania fal morskich w ekstremalnych warunkach sztormowych.

W przypadku głębszych akwenów stosowane więc są platformy półzanurzalne, przedstawione pobieżnie w dalszej części rozdziału.

Nogi klasycznej platformy samopodnośnej to potężne, smukłe konstrukcje stalowe w formie ramy przestrzennej, zbudowane z rur. Cała platforma przystosowana do ustawiania na dnie akwenu o głębokości rzędu 80 m może ważyć nawet 10000 ton. Posadowienie takiej budowli na gruncie dna akwenu wymaga specjalnego zakończenia nóg na ich dolnym końcu. Mogą tam być zastosowane potężne „stopy” stalowe czyli konstrukcje o najczęściej stożkowym dnie, zdolne do przeniesienia potężnych ciśnień oddziaływania gruntu.

Schemat konstrukcji dużej platformy samopodnośnej przedstawiono na rys. XVI.3. Górna część rysunku to widok z góry a dolna – widok z boku. Na rysunku widać podstawowe wymiary tego obiektu.



Rys. XVI.3 Duża platforma samopodnośna

Platforma ta jest wyposażona w 3 słupy nośne o kwadratowym przekroju poprzecznym, zbudowane z rur stalowych. Podstawowe elementy słupów to potężne pionowe rury stanowiące ich krawędzie. Rury te zawierają wspomniane wcześniej listwy zębate. Słupy są zakończone stopami o szczelnym poszyciu.

Platforma jest wyposażona w urządzenie wiertnicze, dźwigi do przemieszczania rur osłonowych wsuwanych do odwiertu oraz składowisko takich rur. Poza obrysem pontonu znajduje się lądowisko śmigłowców.

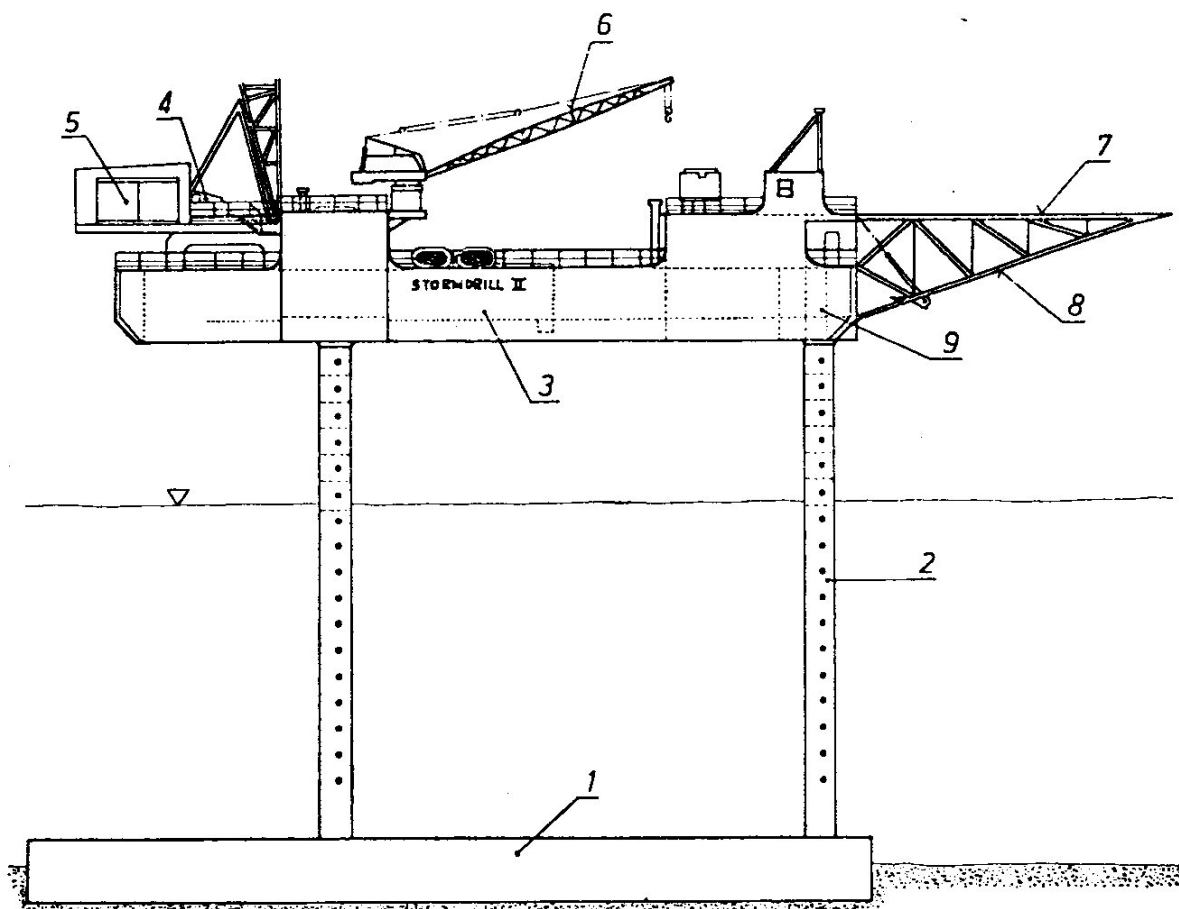
Sam ponton jest klasyczną konstrukcją przystosowaną do pływania, złożoną z poszycia, usztywnień poszycia i systemu wiązarów. Przestrzeń w pontonie podzielona jest grodziami i przegrodami, które stanowią istotny element systemu zapewniającego jego wytrzymałość w warunkach pływania i w warunkach opierania się na słupach. W pontonie znajdują się także integralne zbiorniki paliwa do agregatów prądotwórczych, wody słodkiej oraz zbiorniki systemu technologicznego związanego z procesem wiercenia lub wydobywania surowca ( zbiorniki na tzw. materiały płuczkowe, wodę i płuczkę wiertniczą ).

Przykład mniejszej platformy samopodnośnej, przystosowanej do eksploatacji w akwenach o głębokości do 21 m, przedstawiono na rys. XVI.4. Ponton może być unoszony do 9 m ponad poziom wody. Pomimo niewielkich gabarytów platforma ta może wykonywać odwierty o głębokości do 6000 m. Platforma jest ustawiana na 4 słupach w formie monolitycznych rur z otworami umożliwiającymi jej podnoszenie lub opuszczanie oraz klinowanie w wybranym położeniu. Słupy są ustawiane na specjalnej płycie fundamentowej ( zwanej matą denną ) wcześniej kładzionej na dno akwenu.

Znaczenie symboli cyfrowych na tym rysunku:

- 1 – mata denną;
- 2 – słupy;
- 3 – pompy płuczkowe;
- 4 – wyciąg wiertnicy;
- 5 – silniki napędzające wiertnicę;
- 6 – dźwig;
- 7 – lądowisko śmigłowców;
- 8 – konstrukcja nośna lądowiska;
- 9 – mechanizm podnoszenia lub opuszczania słupów.





Rys. XVI.4 Niewielka platforma samopodnośna

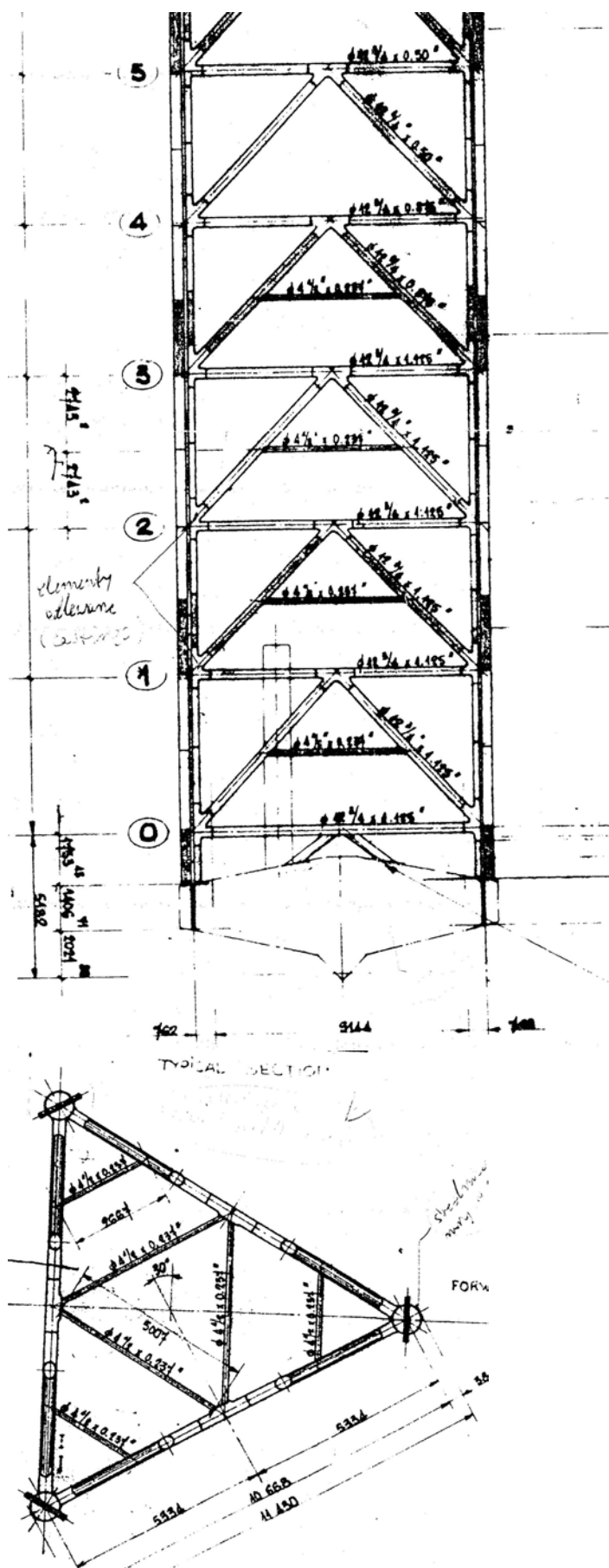
Widok z boku na dolną część słupa nośnego platformy samopodnośnej eksploatowanej na Bałtyku, na polskich wodach terytorialnych ( głębokość wody ok. 80 m ) oraz przekrój słupa płaszczyzną poziomą , przedstawiono na rys. XVI.5. Słupy tej platformy mają całkowitą długość ok. 147 m i są rozstawione w wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku ok. 52 m. Kadłub ma długość ok. 70 m i szerokość ok. 65 m. Całkowita masa platformy wynosi ok. 9000 ton.

Przekrój poziomy słupów jest trójkątem równobocznym o długości boku ok. 11,5 m.

Pionowe grubościennne rury nośne w narożnikach tego trójkąta mają średnicę rzędu 800 mm i są wykonane z odcinków z wysokowytrzymałej stali, o granicy plastyczności 690 MPa. Rury te są przecięte wzdłuż w celu zamontowania listew zębatych o grubości 90 do 110 mm. Te podstawowe elementy nośne są powiązane rurami poziomymi i ukośnymi o mniejszej średnicy. Segmenty rur nośnych oraz pozostałe rury wymienione wyżej są łączone ze sobą spawaniem, z zastosowaniem specjalnych łączników wykonanych w formie odlewów. Takie rozwiązanie pozwala złagodzić karby poniżej pewnego poziomu, który zagrażałby przedwczesnym pękaniem zmęczeniowym.

Na dole każdego słupa jest potężna stalowa stopa o szczelnym poszyciu, której średnica wynosi ok. 13,4 m a wysokość – 4,5 m. Poszycie jest z blach o grubości rzędu 50 mm.

Wewnątrz znajduje się system mocnych przegród. Stopa przenosi siły o wartości do 400 MN.



Rys. XVI.5 Rysunek konstrukcyjny fragmentu słupa platformy

### Platformy półzanurzalne

Platformy samopodnośne nie nadają się do wierceń podmorskich przy głębokościach wody większych niż 100 m (orientacyjnie). Do takich celów powszechnie są tzw. platformy półzanurzalne. Tego typu obiekt pływający składa się z pokładu roboczego wspartego na pływakach, które w trakcie prac wiertniczych lub w trakcie pobierania urobku ze złoża są ulokowane względnie głęboko pod poziomem wody. Pomost roboczy opiera się na pływakach za pośrednictwem pionowych, stosunkowo smukłych słupów. Ważną cechą takiego obiektu jest to, że jest on mało czuły na falowanie wody. Głęboko pod powierzchnią wody wpływ falowania jest mało odczuwalny i zmienne w czasie składowe sił oddziaływania wody na pływak są niewielkie. Dzięki temu nawet w warunkach sztormowych ruchy nurzania platformy (przemieszczenia pionowe) są względnie małe i nie przeszkadzają w prowadzeniu operacji wykonywania odwiertu w dnie morza.

Platforma jest utrzymywana w pobliżu zamierzonej pozycji odwiertu dzięki systemowi lin kotwicznych zamocowanych do kotwic ułożonych na dnie morza.

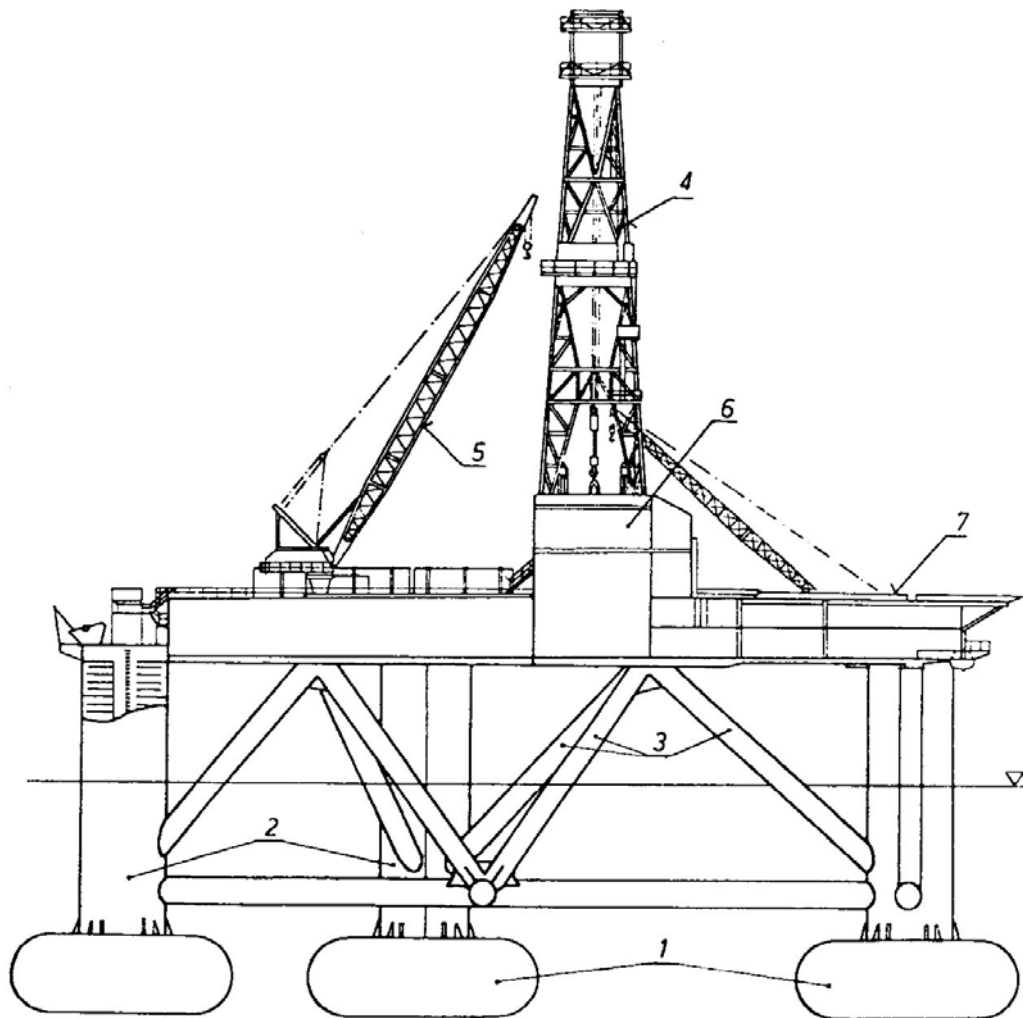
Przestrzeń w pływakach jest wykorzystywana jako zbiorniki balastu wodnego. Zanurzenie platformy aby pływak znalazły się odpowiednio głęboko pod powierzchnią wody uzyskuje się poprzez przyjęcie odpowiedniej ilości balastu. Jeżeli platforma ma być holowana po morzu, to zbiorniki balastowe są puste a pływak wypornościowe tylko częściowo są zanurzone. Dzięki temu opór platformy w warunkach holowania jest względnie mały.

Przykład platformy półzanurzalnej, opierającej się na pięciu pływakach o osiach tworzących pięciokąt foremny, pokazano na rys. XVI.6. Taki układ pływaków zapewnia praktyczną niezależność amplitud wszelkich ruchów platformy od kierunków fal a amplitudy tych ruchów są dopuszczalnie małe.

Rysunek pokazuje platformę w stanie pracy, gdzie dna pływaków znajdują się 21,6 m poniżej poziomu wody. Można więc łatwo oszacować pozostałe wymiary tej platformy. Jej całkowita masa wynosi 9260 ton. W stanie rejsowym zanurzenie wynosi 7,2 m. Platforma jest dostosowana do prowadzenia odwiertów w dnie akwenów o głębokości do 200 m.

Symbole cyfrowe na tym rysunku oznaczają:

- 1 – pływak wypornościowe;
- 2 – pionowe słupy nośne;
- 3 – zastrzały łączące słupy między sobą i z pokładem roboczym;
- 4 – wieża (potrzebna do wykonywania odwiertów);
- 5 – dźwig;
- 6 – wyciąg (do podtrzymywania tzw. 'risera');
- 7 – lądowisko śmigłowca.



Rys. XVI.6 Platforma wsparta na pięciu pływakach

Przykład platformy o nieco innej konstrukcji niż opisano wyżej podano na rys. XVI.7. Pokład roboczy opiera się na dwóch wydłużonych pływakach za pośrednictwem pionowych słupów o kształcie osiowo – symetrycznym ( 4 słupy na każdym z pływaków ); każdy z pływaków przypomina kadłub klasycznego statku bez otworów w pokładzie. Pływaki i słupy nośne są wzmocnione przy pomocy potężnych zastrzałów w formie rur.

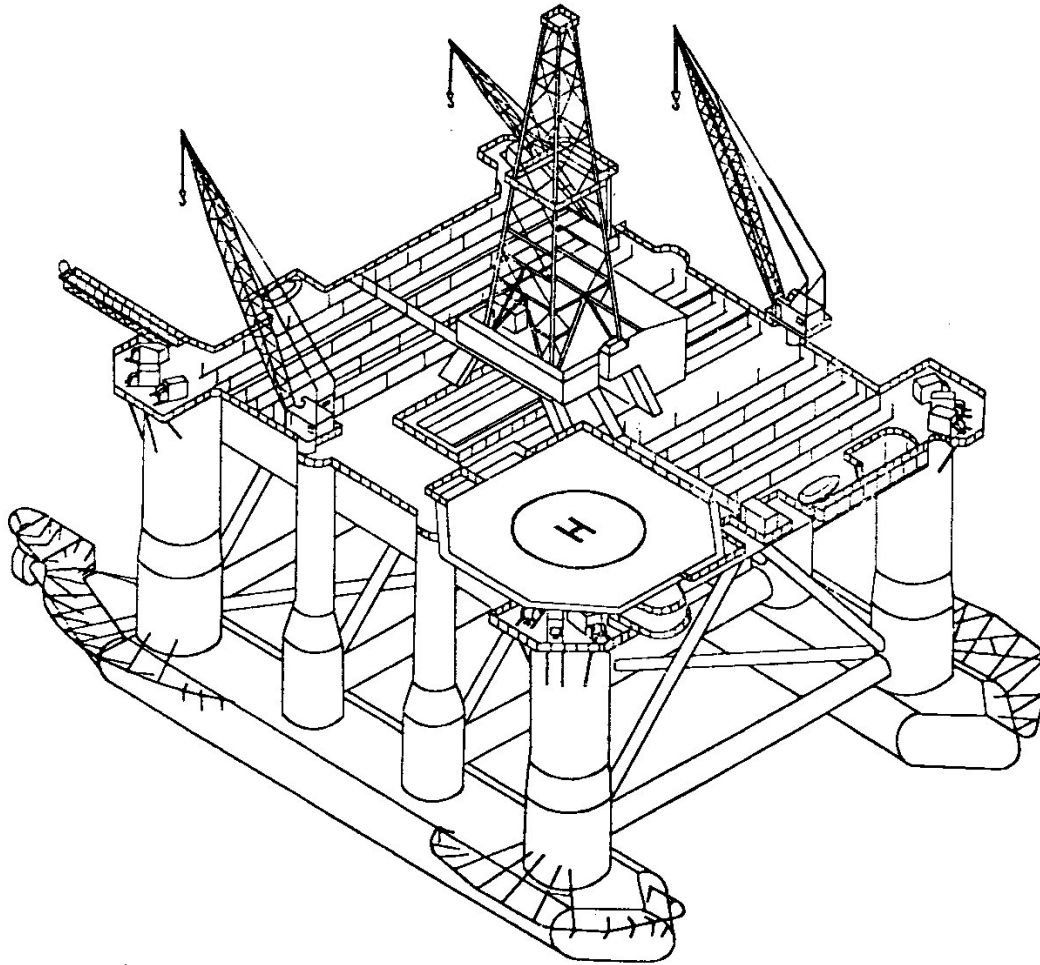
Odległość w pionie od dna pływaka do górnej płaszczyzny pokładu roboczego wynosi 46 m.

Kadłub tej platformy waży 14500 ton. Wyporność platformy podczas wiercenia wynosi do 36000 ton.

Platforma może wykonywać odwierty w dnie akwenów o głębokości do 900 m.

Głębokość wiercenia – do 7500 m.

Pozycja platformy jest w przybliżeniu utrzymywana poprzez 12 lin kotwicznych o długościach ok. 2200 m; masa kotwic na końcach lin : 25 ton.



Rys. XVI.7 Platforma wsparta na dwóch pływakach

Pływaki przedstawionych platform, to klasyczne stalowe konstrukcje przystosowane do przejmowania obciążeń w formie ciśnienia wody. Ich konstrukcja przypomina więc kadłub statku, tzn składa się z poszycia usztywnionego usztywnieniami, które opierają się na systemie wiązarów.

Słupy nośne mają formę rur o średnicy nawet kilku metrów i należą do kategorii powłok wzmocnionych usztywnieniami i wiązarami. Wytrzymałość tych słupów na zginanie wskutek sił poprzecznych i wzdłużnych działających na pływaki jest zapewniona dzięki zastosowaniu zastrzałów. Mają one formę rur o średnicach mniejszych niż średnica kolumn i nie wymagają stosowania usztywnień.

Pokład roboczy podlega zginaniu – głównie wskutek ciężaru ustawionych na nim elementów wyposażenia i ciężaru własnego. Składa się więc on z systemu mocnych wiązarów podpierających usztywnienia, które z kolei podpierają poszycie.

#### Budowa statków wiertniczych

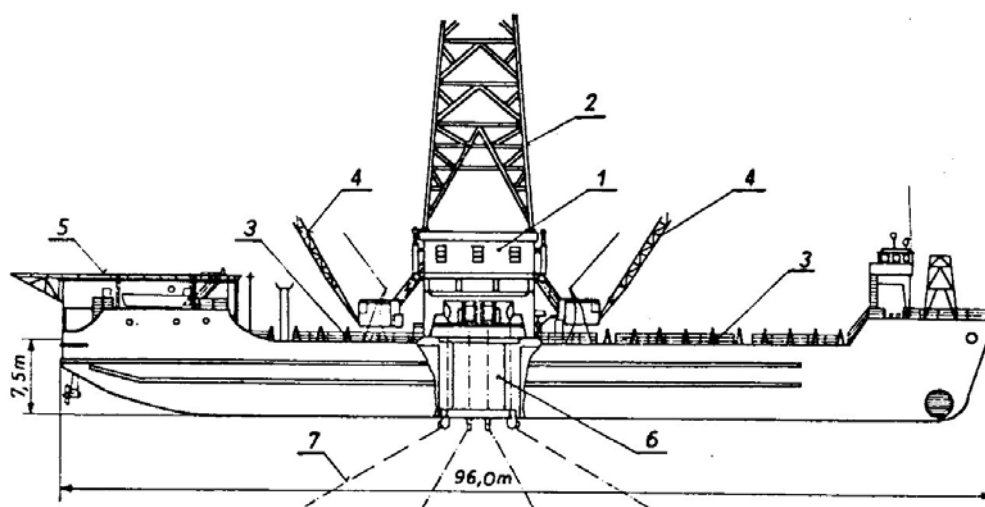
Równolegle z platformami wiertniczymi stosowane są statki wiertnicze. Ich wadą w stosunku do platform półzanurzalnych są większe wartości ruchów na fali. W związku z tym trzeba stosować bardziej skomplikowane urządzenia wiertnicze, które ma system teleskopowy pozwalający prowadzić wiercenia w warunkach nurzań statku. Charakterystycznym elementem statku wiertniczego jest tzw. obrotnica, która jest kotwiczona a statek może obracać się wokół niej ( wokół pionowej osi ) dzięki specjalnemu ułożyskowaniu. Pozwala to samoczynnie ustawiać statek prostopadle do linii grzbietów fal i dzięki temu unikać

przechyłów bocznych, których amplitudy byłyby wielokrotnie większe niż wartości amplitud kołysań.

Typowy statek wiertniczy pokazano schematycznie na rys. XVI.8. Ma on wyporność 10000 ton, długość 96 m, szerokość 21 m i wysokość boczną 7,5 m.

Znaczenie symboli cyfrowych na rysunku XVI.8:

- 1 – wyciąg wiertniczy;
- 2 – wieża wiertnicza;
- 3 – skład rur płuczkowych z miejscem do manewrowania nimi;
- 4 – dźwigi;
- 5 – lądowisko śmigłowców;
- 6 – obrotnica;
- 7 – liny kotwiczne.



Rys. XVI.8 Przykładowy statek wiertniczy

#### Platformy TLP (‘tension leg platform’)

Są to obiekty pływające połączone naprężonymi linami pionowymi z masywnym blokiem kotwicznym. Gdy siły naporu fal lub wiatru usiłują przemieścić platformę w bok, pojawia się dodatkowa siła wyporu, która sprzeciwia się takim ruchom.

#### Obciążenia platform

Podstawowe znaczenie mają obciążenia związane z oddziaływaniem środowiska w formie falowania morza, prądów morskich i wiatru.

**Falowanie morza** powoduje przemieszczanie się cząsteczek wody. Prędkość tego ruchu zmniejsza się wraz z odległością od powierzchni swobodnej. Uzasadnia to celowość stosowania platform półzanurzalnych ( patrz wcześniejsze uwagi na ten temat). Ruch wody w warunkach falowania powoduje oddziaływanie na omywane elementy konstrukcji, proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu i do wartości przyspieszeń ruchu wody. Wg Przepisów [14] obciążenie wydłużonych elementów konstrukcyjnych zależne od prędkości przepływu oblicza się wg wzoru ( w [kN/m], na metr długości elementu w kierunku jego osi):

$$P_D = 0,5 \rho C_s V^2 b \cos^2 \beta \quad (1)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość wody;

$V$  – prędkość przepływu wody w miejscu osi elementu ( z pominięciem wpływu

konstrukcji na przepływ);  
 $b$  – charakterystyczny wymiar opływającego elementu ( np. średnica rury nośnej );  
 $\beta$  – kąt pomiędzy wektorem prędkości wody a osią elementu;  
 $C_s$  – współczynnik zależny od kształtu przekroju poprzecznego elementu ( przepisy [14] podają wartości tego współczynnika dla wielu kształtów przekrojów poprzecznych).

Obciążenie od ruchu wody, proporcjonalne do przyspieszeń w przepływie, wg [14] oblicza się wg wzoru ( całkowita siła):

$$P_M = \rho C_M a V_{el} \quad (2)$$

gdzie:

$\rho$  – jak w (1);  
 $C_M$  – współczynnik masy wody towarzyszącej, zależny od kształtu opływającego elementu;  
 $a$  – średnia wartość przyspieszenia w przepływie, w obszarze elementu;  
 $V_{el}$  – objętość elementu.

Obiekty oceanotechniczne projektuje się zazwyczaj z zastosowaniem koncepcji tzw. fali projektowej czyli fali regularnej ( sinusoidalnej ) o odpowiednio dobranej wysokości i długości, wg wskazań Przepisów ( np. [14]), z uwzględnieniem danych statystycznych dotyczących falowania w zakładanym miejscu eksploatacji platformy. Do wyznaczania prędkości i przyspieszenia przepływu wody związanego z falą regularną stosuje się wzory znane z hydromechaniki. Na wodach płytkich uwzględnia się wpływ głębokości wody.

Obciążenia od **prądu morskiego** wyznacza się wg wzoru (1). Wartość ekstremalnej prędkości prądu ( na poziomie swobodnej powierzchni wody ) przyjmuje się wg danych statystycznych dotyczących planowanego miejsca eksploatacji obiektu. Rozkład prędkości prądu w zależności od odległości od powierzchni wody przyjmuje się wg wskazań np.[14] ( wg odpowiedniego wzoru) lub na podstawie dostępnych danych statystycznych.

Obciążenie od **wiatru** oblicza się także wg wzoru (1) ale  $\rho$  oznacza tam gęstość powietrza. Prędkość wiatru ( uśrednioną) na poziomie 10 m nad powierzchnią wody przyjmuje się na podstawie danych statystycznych dla zakładanego rejonu eksploatacji jednostki a rozkład prędkości w funkcji odległości od powierzchni wody – wg odpowiedniego wzoru Przepisów ( np. [14]).

W procesie projektowania zakłada się skrajnie niekorzystną sytuację, gdzie wektory prędkości przepływu pofalowanej wody, prędkości prądu i prędkości wiatru mają ten sam kierunek.

Oprócz obciążeń środowiskowych wymienionych wyżej należy uwzględnić tzw. obciążenia robocze czyli ciężar własny konstrukcji, siły reakcji ( np. reakcja dna akwenu na słupy nośne platformy samopodnośnej, oddziaływanie lin kotwicznych, itp.) oraz siły wyporu na wodzie spokojnej.

W procesie projektowania rozważa się stany naprężenia w poszczególnych elementach konstrukcji odpowiadające następującym wariantom obciążeń:

- a) obciążenia robocze;
- b) maksymalne wartości ( tzw. obliczeniowe ) obciążeń środowiskowych działające razem z obciążeniami roboczymi;
- c) obciążenia nadzwyczajne ( stany awaryjne – np. upadek ciężaru spadającego z dźwigu, kolizja ze statkiem ) działające jednocześnie z obciążeniami roboczymi;

d) obciążenia środowiskowe o okresie powtarzalności 1 roku ( ekstremalne wartości obciążeń, które statystycznie pojawiają się w ciągu 1 roku) oraz obciążenia robocze, po założeniu sformułowanych w Przepisach form uszkodzenia konstrukcji ( np. pęknięcia zmęczeniowe podstawowych elementów nośnych, uszkodzenie wskutek wystąpienia wspomnianych wyżej obciążeń nadzwyczajnych, itp.);

e) obciążenia jak w „d”, ale w warunkach przechyłu obiektu wskutek awaryjnego zatopienia wybranych przedziałów wodoszczelnych.

Do każdej z wyżej wymienionych kombinacji obciążeń Przepisy podają kryteria wytrzymałościowe, które trzeba spełnić.

Kryteria te dotyczą takich form zniszczenia elementów konstrukcji jak:

- lokalne uplastycznienie ( Przepisy podają poziom naprężeń dopuszczalnych);
- wyboczenie;
- nadmierne odkształcenia sprężyste;
- zmęczenie;
- wyczerpanie nośności granicznej.
- nadmierne drgania.

Stosowana jest taka koncepcja projektowania, że dopuszcza się prowadzenie wierceń tylko do określonego poziomu obciążeń środowiskowych ( intensywność falowania, prędkość wiatru ). Platforma musi mieć jednak zdolność do przetrwania w ekstremalnych warunkach pogodowych. Znaczne obciążenia konstrukcji mogą wystąpić także np. w warunkach instalowania obiektu w miejscu przeznaczenia. W związku z tym Przepisy [14] wymagają aby w procesie projektowania uwzględnić następujące warunki pracy obiektu:

- a) proces instalowania obiektu;
- b) proces wiercenia lub wydobywania urobku;
- c) przygotowanie do przemieszczenia obiektu;
- d) proces „przeczekiwania” ekstremalnych warunków pogodowych;
- e) przemieszczanie obiektu.

Zakłada się przy tym odpowiednie ograniczenia warunków pogodowych ( oprócz „d”).

Proces projektowania platform jest znacznie bardziej złożony i pracochłonny niż proces projektowania konstrukcji kadłuba statku co wynika ze wspomnianych wyżej obciążeń, które trzeba uwzględnić. W przeciwieństwie do kadłubów statków, powszechnie stosowane są elementy nośne w formie rur. Problemem jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej połączeń takich rur. Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych określają metody obliczeniowe, które należy stosować oraz podają kryteria pozwalające ocenić wytrzymałość konstrukcji. W procesie projektowania stosowane w szerokim zakresie są obliczenia MES.