

XIII SESJA NAUKOWA OKRETOWCÓW

dr inż. Tadeusz JASTRZEBSKI
mgr inż. Zbigniew SEKULSKI
Instytut Okrętowy
Politechnika Szczecińska

1.4. ANALIZA OPTIMALIZACYJNA KONSTRUKCJI KADŁUBA
JEDNOSTKI ZANURZALNEJ

1. WPROWADZENIE

W licznych ośrodkach na świecie prowadzi się intensywne prace badawcze i projektowe związane z budową różnego rodzaju obiektów zanurzalnych /ang. submersibles/. Ilość obiektów przekazywanych do eksploatacji świadczy, że ta dziedzina projektowania w oceanotechnice wykracza śmiało poza ramy eksperymentów i nowatorstwa. Można już mówić nawet o pewnych rutynowych zasadach projektowania i standardowych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Wyraża się to też w fakcie, iż szereg liczących się na świecie towarzystw klasyfikacyjnych wydało stosowne przepisy klasyfikacji i budowy obiektów zanurzalnych, a niektóre z tych przepisów doczekały się już nawet swej drugiej, unowocześnionej generacji. W przepisach tych ważną część zajmują mniej lub bardziej szczegółowe wymagania i reguły projektowania konstrukcji ciśnieniowych kadłubów obiektów zanurzalnych. I aczkolwiek stosowanie bardziej wyrafinowanych metod obliczeń oraz badania eksperymentalne są nadal nie do zastąpienia w ostatecznej ocenie losowych przecięż cech wytrzymałościowych konstrukcji, to jednak reguły i wzory wymiarowania z przepisów klasyfikacyjnych są dziś w pierwszym przybliżeniu przez projektantów wykorzysty-

wane z powodzeniem również i w tej dziedzinie.

Referat, który przedstawiamy zawiera na wstępie krótki przegląd wspomnianych przepisów, a zwłaszcza ich części odnoszących się do kadłuba ciśnieniowego. Następnie zaprezentowano próbę wykorzystania proponowanych w przepisach procedur wymiarowania wiązań wytrzymałościowych do parametrycznych obliczeń optymalizacyjnych kadłubów ciśnieniowych obiektów zanurzalnych.

2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH PRZEPISÓW WYMIAROWANIA CIŚNIENIOWYCH KONSTRUKCJI ZANURZALNYCH.

W wielu krajach morskich opublikowano mniej lub bardziej szczegółowe przepisy budowy, testowania i bezpiecznego eksploataowania ciśnieniowych konstrukcji podwodnych. Najważniejszą dziś grupę stanowią przepisy towarzystw klasyfikacyjnych, a przede wszystkim przepisy American Bureau of Shipping (ABS) [1] Bureau Veritas (BV) [2], Det Norske Veritas (DNV) [3], Germanischer Lloyd (GL) [4], Lloyd's Register of Shipping (LRS) [5] oraz przepisy Rejestru ZSRR (RS) [6].

Wszystkie opublikowane przepisy podają definicje obiektów zanurzalnych, określają zasady klasyfikacji i nadzoru, precyzują wymagania materiałowe, określają wymagania stawiane kadłubom ciśnieniowym i innym elementom konstrukcji i wyposażenia jednostek. Ponadto ważną częścią przepisów są wymagania co do zasad i zakresu niezbędnych prób konstrukcji ciśnieniowych oraz ściśle sprecyzowane dopuszczalne odchyłki wykonawcze (tolerancje) [7].

Bliższa analiza przepisów pozwala stwierdzić, że zawarte w nich wymagania i wskazówki projektowe, a zwłaszcza w przepi-

sach ABS, BV, DNV i LRS, są wystarczające do zwymiarowania podstawowych elementów konstrukcji kadłuba jednostki zanurzalnej. Istnieją jednak zastrzeżenia, że obliczenia naprężeń w skomplikowanych węzłach konstrukcji, a szczególnie w miejscach koncentracji naprężeń, wymagają użycia specjalnych metod obliczeniowych (np. metody elementów skończonych).

Obok wymienionych przepisów towarzystw klasyfikacyjnych, przy projektowaniu i budowie jednostek zanurzalnych stosuje się inne jeszcze normy i wymagania. Należą do nich normy i standardy krajowe odnoszące się do konstrukcji i materiałów naczyń ciśnieniowych. W Polsce są to przepisy Dozoru Technicznego [8] oraz normy RWPG [9]. Z zagranicznych warto wymienić np. Amerykański Standard Krajowy [10].

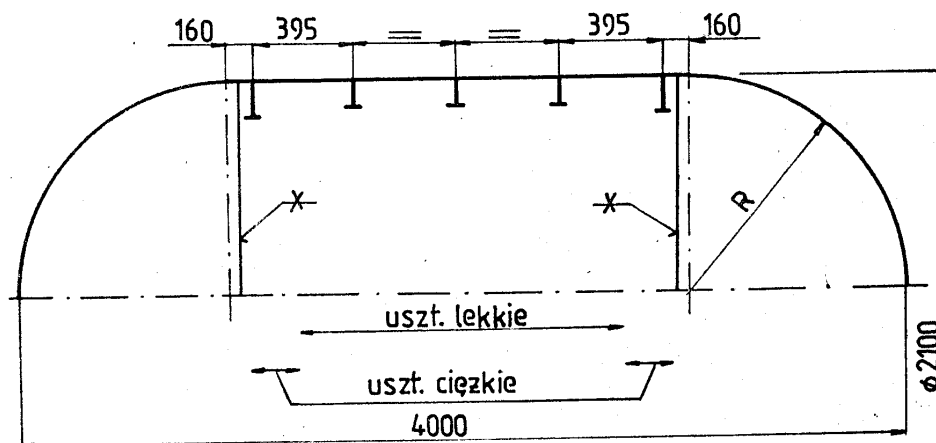
3. WYBÓR MODELU OBLICZENIOWEGO KONSTRUKCJI.

Podstawowym elementem konstrukcyjnym decydującym o walorach techniczno-eksploatacyjnych jednostek zanurzalnych jest kadłub ciśnieniowy. Jest to złożona konstrukcja, poddawana działaniu dużych ciśnień i obciążeń cyklicznych, wywołanych faktem zanurzenia jednostki i zmianami tego zanurzenia podczas pracy. Konstrukcja powinna zabezpieczyć załogę i wyposażenie przed działaniem sił i wpływem czynników zewnętrznych, a także umożliwić bezpieczną pracę na głębokości operacyjnej, również w przypadku przeciążenia w warunkach awaryjnych.

Zasadnicze zadanie w projektowaniu optymalnego kadłuba ciśnieniowego jako cienkościennego zbiornika, znajdującego się pod działaniem ciśnienia zewnętrznego, można w sposób ogólny sformułować następująco: przy zadanych ciśnieniu hydrostatycznym i

objętości kadłuba ciśnieniowego określić kształt kadłuba, rozplanowanie i parametry geometryczne wiązań oraz charakterystyki materiału, w taki sposób, aby masa konstrukcji była minimalna.

Analiza budowanych obecnie na świecie jednostek przeznaczonych do pracy na średnich głębokościach (600 - 6000 m) wskazuje, że jednostki te mają zwykle kadłuby kuliste lub składające się z kul lub ich części łączonych bezpośrednio, albo poprzez elementy cylindryczne [11]. Natomiast kadłuby jednostek na małe głębokości (200 - 600 m) są z reguły połączeniem czasz sferycznych z częściami cylindrycznymi.



Rys. 1. Wymiary przyjętego modelu obliczeniowego konstrukcji.

Biorąc pod uwagę powyższe oraz prowadzone w kraju prace badawczo-projektowe jako model obliczeniowy przyjęto kadłub stalowy o kształcie walcowym z półkulistymi zakończeniami, usztywniony pięcioma pierścieniami teowymi (w tym dwa ciężkie w rejonie

nach styku walca i półkuli). Dla celów niniejszej pracy dokonano też pewnych założeń upraszczających co do parametrów geometrycznych usztywnień [11]. Wyniary kadłuba o tak dobranym układzie wiązań przedstawiono na Rys.1.

4. ALGORYTMY OBLICZENIOWE.

Obliczenia parametryczne wykonane zostały na mikrokomputerze Schneider CPC6128. Programy komputerowe do wielowariantowego obliczania grubości poszycia, wymiarów wiązań usztywniających oraz masy konstrukcji opracowano na podstawie procedur zaczerpniętych z przepisów ABS [1], DNV [3] i LRS [5]. Tok obliczeń przedstawionych szczegółowo w pracy [11] był następujący:

- ABS - obliczenie dopuszczalnej liczby zanurzeń bez potrzeby prowadzenia analizy zmęczeniowej,
 - obliczenie powłok półkulistych,
 - dobór usztywnienia lekkiego,
 - obliczenie stateczności powłoki cylindrycznej,
 - obliczenie naprężeń membranowych powłoki cylindrycznej,
 - dobór usztywnienia ciężkiego,
 - obliczenie masy kadłuba i jej stosunku do objętości,
- DNV - obliczenia sztywności wyboczeniowej powłoki sferycznej,
 - dobór usztywnienia lekkiego,
 - obliczenia sztywności wyboczeniowej powłoki cylindrycznej
 - dobór usztywnienia ciężkiego,
 - obliczenie masy kadłuba i jej stosunku do objętości,
- LRS - obliczenia naprężeń membranowych powłoki cylindrycznej,
 - obliczenia stateczności powłoki sferycznej w zakresie sprężystym,

- obliczenia naprężeń membranowych powłoki sferycznej,
- obliczenia stateczności powłoki cylindrycznej w zakresie sprężystym,
- dobór lekkich pierścieni usztywniających,
- obliczenie ciśnienia ogólnego zapadnięcia usztywnionego cylindra,
- dobór ciężkich pierścieni usztywniających,
- obliczenie masy kadłuba i jej stosunku do objętości.

5. WYNIKI OBLICZEŃ.

Spośród szeregu przeprowadzonych obliczeń [1] wybrano wyniki tych, które wydają się najbardziej interesujące przy ustalaniu parametrów kadłuba ciśnieniowego we wczesnych etapach projektowania. Chodzi tu przede wszystkim o wybór przepisów towarzystw klasyfikacyjnych, układu wiązań oraz gatunku stali użytej do budowy. Ponadto z uwagi na objętość referatu ograniczono się do wyników obliczeń przeprowadzonych wg przepisów DNV mimo, że wyniki uzyskane wg przepisów ABS i LRS są równie interesujące.

Zgodnie z założeniami pracy celem obliczeń było dostarczenie danych dla optymalizacji masy kadłuba jednostki. Optymalną (minimalną) masę konstrukcji poszukiwano posługując się współczynnikiem projektowym: masa konstrukcji/wyporność (objętość) kadłuba, t/m^3 .

Parametrami zmiennymi były - granica plastyczności stali, głębokość operacyjna, liczba pierścieni usztywniających, średnica kadłuba. Wyniki obliczeń zaprezentowano w formie wykresów na rys. 2 - 6. Dodatkowo jako interesujące ze względów projek-

towo-technologicznych zamieszczono też wykresy podane na rys.7 obrazujące stosunek masy powłoki do masy usztywnień.

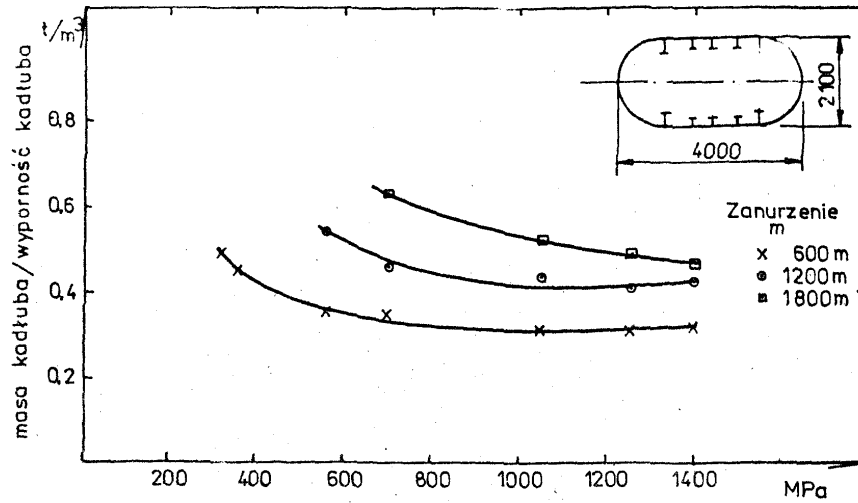
6. WNIOSKI PROJEKTOWE.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń parametrycznych pokazane na rys. 2 - 6 oraz zawarte w pracy [11] nasuwają szereg praktycznych wniosków projektowych. Omówimy niektóre z nich.

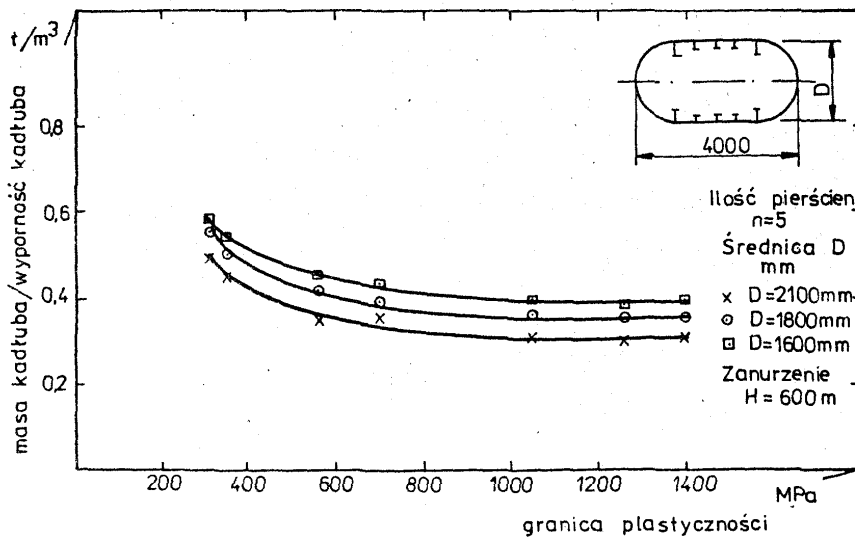
Spodziewany wpływ granicy plastyczności na masę konstrukcji ujawnił się praktycznie we wszystkich procedurach klasyfikacyjnych; przy czym jest on ogólnie wyraźniejszy dla niższych wartości Re . Na podstawie wykresów można określić przedziały wartości granicy plastyczności, dla których otrzymuje się najniższe wskaźniki masy. Przejście z tych zakresów - tak w lewo jak i w prawo - powoduje wzrost masy konstrukcji, przy czym materiały o bardzo dużych Re tracą swe zalety przez ograniczenia wynikające ze stateczności wytrzymałościowej konstrukcji.

Wpływ zwiększonego zanurzenia na wzrost wskaźnika masy jest z oczywistych przyczyn bardzo wyraźny i większy dla mniejszych i średnich wartości granicy plastyczności, rys. 2 (dla $Re = 300 + 800$ MPa). Natomiast mniejsze znaczenie posiada średnica kadłuba - D , rys. 3, przy czym korzystniejsze wskaźniki masy uzyskuje się dla kadłuba o mniejszej smukłości (większej D). W przybliżeniu dla rozważanej konstrukcji, w prawie całym zakresie Re , zwiększenie średnicy o ok. 30% powoduje zmniejszenie wskaźnika masy o ok. 15%.

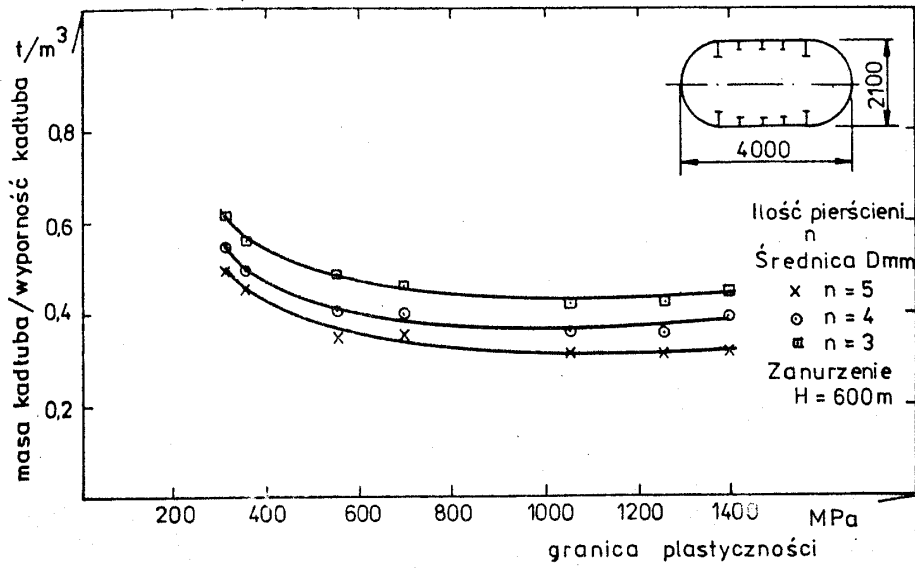
W projektowaniu konstrukcji należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór ilości pierścieni usztywniających. Wskaźnik masy



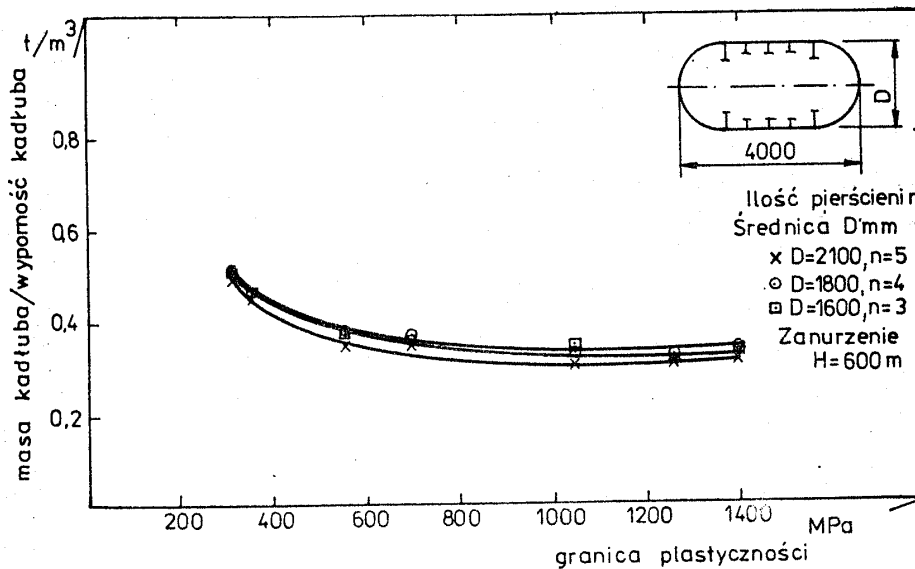
Rys.2. Wykres stosunku masy do wyporności kadłuba z pięcioma pierścieniami usztywniającymi ($n=5$) w funkcji granicy plastyczności, dla trzech głębokości operacyjnych H m, określony wg DNW.



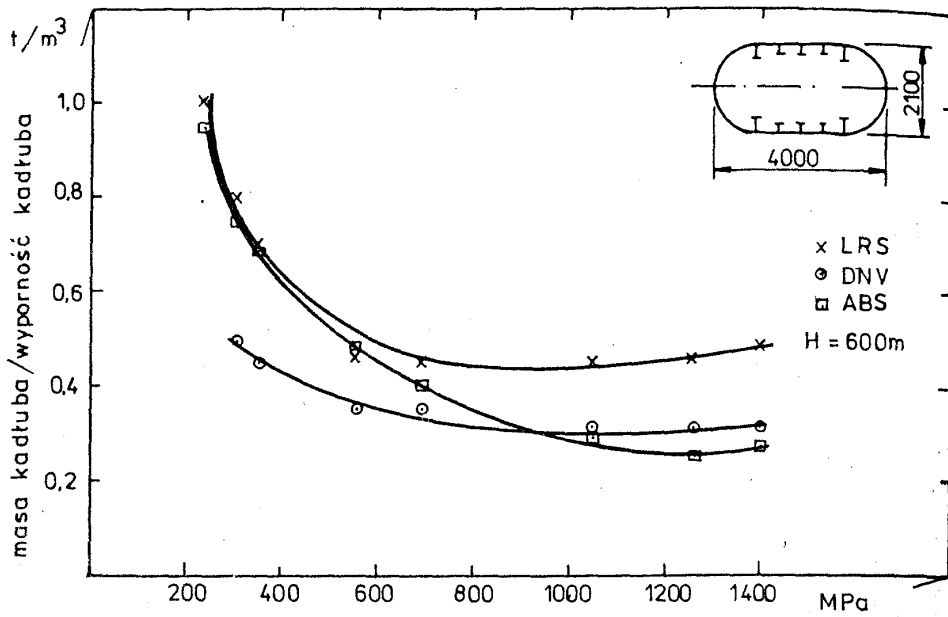
Rys.3. Wykres stosunku masy do wyporności kadłuba dla głębokości operacyjnej 600m i pięciu pierścieni usztywniających $n=5$, w funkcji granicy plastyczności, określony dla trzech średnic kadłuba D mm wg DNW.



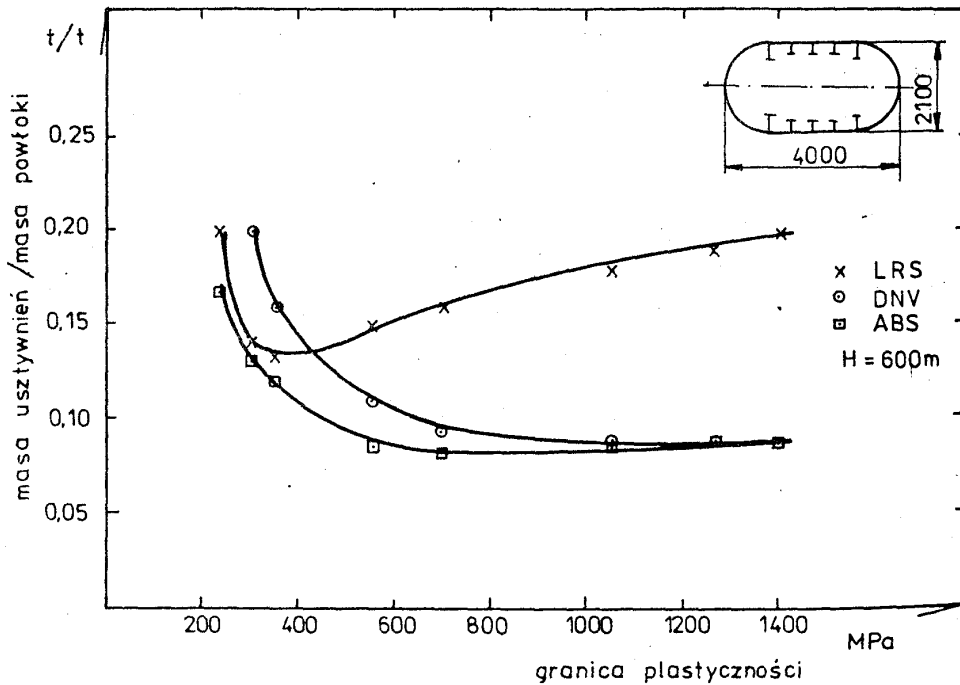
Rys.4. Wykres stosunku masy do wyporności kadłuba dla głębokości operacyjnej 600m, w funkcji granicy plastyczności, dla zmiennej liczby pierścieni usztywniających $n=5$, $n=4$ i $n=3$, określony wg DNV.



Rys.5. Wykres stosunku masy do wyporności kadłuba dla głębokości operacyjnej 600m, liczby pierścieni usztywniających $n=5$ dla $D=2100\text{mm}$, $n=6$ dla $D=1800\text{mm}$ i $n=7$ dla $D=1600\text{mm}$, w funkcji granicy plastyczności, określony wg DNV.



Rys.6. Wykres stosunku masy do wyporności kadłuba z pięcioma pierścieniami usztywniającymi ($n=5$), dla zanurzenia operacyjnego 600m, w funkcji granicy plastyczności, określony wg przepisów LRS, DNV i ABS.



Rys.7. Wykres stosunku masy powłoki do masy usztywnień dla głębokości operacyjnej 600m, liczby pierścieni usztywniających $n=5$, średnicy $D=2100mm$ w funkcji granicy plastyczności, określony wg LRS, DNV i ABS.

badanej konstrukcji wyraźnie maleje, gdy ilość usztywnień rośnie, rys. 4. Dla przyjętej średnicy kadłuba, zastosowanie 5 pierścieni w miejsce 3 zmniejsza wskaźnik o ok. 20 - 25%. Optymalna ilość pierścieni jest jednak związana z wartością średnicy - D . Przykładowo na rys. 5 pokazano, iż zachowując zbliżone relacje ilości pierścieni usztywniających do średnicy D uzyskuje się zbliżone wartości wskaźnika masowego.

Ograniczenia projektowe masy konstrukcji wymusiły, iż w istniejących przepisach współczynniki bezpieczeństwa jednostek zanurzalnych są niższe w porównaniu z innymi konstrukcjami - lądowymi i morskimi. Współczynnik ten w niektórych przepisach osiąga nawet wartość niewiele większą niż $k=1.5$, podczas gdy w przypadku stalowych konstrukcji lądowych osiąga on nieraz wartości $k=3$ i większe. Tak niskie wartości współczynnika bezpieczeństwa rozważanych jednostek mogą być akceptowane tylko pod warunkiem, że konstrukcja zanurzalna będzie starannie zaprojektowana, wykonana z zachowaniem wysokich wymagań technologicznych [7] oraz przejdzie z powodzeniem odpowiedni program prób i testów. Wpływ przyjmowanych współczynników bezpieczeństwa w procedurach wymiarowania kadłuba ciśnieniowego według różnych towarzystw klasyfikacyjnych pokazano na rys. 6. Łatwo zauważyć znaczne różnice wartości tego współczynnika dla przepisów ABS, DNV i LRS, przy czym przepisy DNV w zakresie najczęściej spotykanych w konstrukcjach okrętowych i oceanotechnicznych wartości R_e pozwalają na uzyskanie najniższej masy konstrukcji. Wskazówka ta wydaje się istotna przy ewentualnym podejmowaniu decyzji odnośnie wyboru przepisów i procedur projektowania jednostki.

Projektanci mogą też skorzystać z rys. 7, gdy analizować

będą swą konstrukcją pod względem techniczno-eksploatacyjnym. Wskaźnik masy usztywnień wewnętrznych do masy powłoki może między innymi wskazywać na wymiary usztywnień, a więc i na możliwości wykorzystania wewnętrznej objętości kadłuba.

Wykonane parametryczne badania masy kadłuba ciśnieniowego jednostki zanurzalnej dostarczyły jeszcze jednego istotnego dla naszej praktyki wniosku. Otóż dla jednostek o zanurzeniu ok. 600 m i większych nie dysponujemy w kraju optymalną ze względów masowych stałą konstrukcyjną. Projektant decydować więc będzie o budowie nie optymalnej jednostki (o zwiększonej masie) ze stali polskiej lub o imporcie stali o wartości granicy plastyczności zbliżonej do optymalnej. Przedstawione w poniższej tabelicy dla wybranego zanurzenia 600 m wielkości mas kadłuba jakie można uzyskać stosując zamiast stali krajowej 15G2ANb ($Re=355\text{MPa}$) np. stal amerykańską HY100 ($Re=700\text{MPa}$) wskazują na godne uwagi oszczędności masowe. Pozwalają one zwiększyć masę przewożonego ładunku (np. przyrządów naukowo-badawczych) lub poprawić zdolności operacyjne jednostki (np. zasięg określający roboczą autonomiczność pojazdu przy założonej prędkości).

Masa kadłuba, kg wg przepisów		
	LRS	DNV
Stal 15G2ANb	8460	5280
Stal HY100	5277	4086
Oszczędności, kg	3183	1194
Oszczędności, %	37,6	22,6

LITERATURA

1. Rules for Building and Classing Underwater Systems and Vehicles. American Bureau of Shipping, 1979.
2. Rules and Regulations for the Classification of Submersibles - Tentative Rules. Bureau Veritas, 1986.
3. Proposed Rules for Certification/Classification of Submersibles. Det Norske Veritas, 1984.
4. Regulations for the Classification and Construction of Submersibles. Germanischer Lloyd, 1971.
5. Rules and Regulations for the Construction and Classification of Submersibles and Diving Systems. Lloyd's Register of Shipping, 1980.
6. Prawila Klasyfikacji i Postrojki Obrotajemych Podwodnych Aparatów i Głubokowodnych Wodolaznych Kompleksów. Register SSSR, 1986.
7. Jastrzębski T. Analysis of existing shipbuilding quality standards. Submersibles. Report Comm.III.3. ISSC-86 (w przygotowaniu).
8. Przepisy Dozoru Technicznego. Obliczenia wytrzymałościowe naczyń ciśnieniowych. Wydawnictwo Katalogów i Cenników. Warszawa, 1974.
9. Sosudy i aparaty. Normy i metody racheta na prochnost. ST SEV 597-77, Standard SEV.
10. An American National Standard. Safety Standard for Pressure Vessels for Human Occupancy. United Engineering Center, New York, 1987.
11. Sekulski Z. Projekt konstrukcji kadłuba załogowego pojazdu podwodnego - Praca magisterska, Szczecin, 1987.