

Dizajn i izbor materijala za razvoj luksuznih polarnih brodova za krstarenje

Norac-Kljajo, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:527602>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Norac-Kljajo

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Irena Žmak, izv. prof.

Student:

Ante Norac-Kljajo

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Irena Žmak na strpljenju i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Također, želio bih zahvaliti svim kolegama, prijateljima i obitelji na podršci i razumijevanju tijekom cijelog preddiplomskog studija.

Ante Norac-Kljajo



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Norac-Kljajo** JMBAG: **0246068287**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dizajn i izbor materijala za razvoj luksuznih polarnih brodova za krstarenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and material selection for development of luxury polar cruise ships**

Opis zadatka:

Kruzer ili brod za krstarenje je putnički brod, čija namjena nije prijevoz putnika od jednog do drugog odredišta, već je namijenjen uživanju u putovanju i dodatnim sadržajima na brodu. Krstarenje već dugo čini značajan dio turističke industrije, te se s vremenom razvio i vid istraživačkog krstarenja u inače teško dostupne dijelove planeta, kao što su polarna područja.

Polarni kruzer Scenic Eclipse projektiran i izgrađen 2019. godine u Hrvatskoj jedinstven je proizvod vrhunske kvalitete, koji osim zadovoljavanja vrlo zahtjevnih radnih i sigurnosnih uvjeta, putnicima pruža i luksuzan boravak na brodu. Unatoč krizi u turističkoj industriji uzrokovanoj pandemijom koronavirusne bolesti (COVID-19), u Hrvatskoj je ove godine započela izgradnja drugog polarnog kruzera, Scenic Eclipse II, što ukazuje na očekivani oporavak turističke industrije.

U okviru ovog završnog rada potrebno je istražiti propise Međunarodne pomorske organizacije (IMO, engl. *International Maritime Organization*) o plovilima koja djeluju u polarnim područjima i kategorije polarnih plovila. Potrebno je odrediti funkcionalne i eksploatacijske zahtjeve na izbor materijala i tehnologije izrade kod polarnih kruzera, te zahtjeve po kriterijima estetičnosti. Navedene zahtjeve potrebno je usporediti s izvedbom polarnog kruzera Scenic Eclipse.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. BROD SCENIC ECLIPSE	2
2.1. Općenito o brodu Scenic Eclipse.....	2
2.2. Dizajn broda	3
2.3. Slikoviti plan palube broda	3
2.4. Povijest broda	5
2.5. Opremljenost broda.....	5
2.6. Plan puta.....	5
3. Pregled zahtjeva pravila za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata	6
3.1. Polarne klase.....	6
3.2. Gornja i donja ledena vodena linija	7
3.3. Područje trupa	7
3.4. Projektna opterećenja ledom	8
3.4.1. Općenito.....	8
3.4.2. Pogled na karakteristike udarnog opterećenja	8
3.4.3. Pramčano područje	9
3.4.4. Područje trupa izvan pramca.....	10
3.4.5. Zakrpa projektiranog opterećenja	10
3.4.6. Tlak unutar projektirane površine opterećenja	11
3.5. Zahtjevi za ploče ljuske.....	12
3.6. Uokvirivanje- općenito	14
4. MATERIJALI	15
4.1. Materijali izloženi morskoj vodi.....	15
4.2. Materijali izloženi temperaturama morske vode	15
4.3. Općenito o koroziji u morskim uvjetima	15
4.4. Morska voda kao korozijski medij	16

4.5. Primjena nehrđajućih čelika u morskoj vodi	18
4.6. Vrste nehrđajućih čelika za primjenu u morskim uvjetima.....	21
4.6.1. Austenitni nehrđajući čelici.....	21
4.6.2. Dupleks nehrđajući čelik	22
4.6.3. Martenzitni, feritni i percipitacijsko očvrnuti čelici.....	23
4.6.4. Ponašanje bakra i njegovih legura u morskoj vodi	24
5. ZAKLJUČAK.....	27
6. LITERATURA	28

POPIS SLIKA

Slika 1. Scenic Eclipse 1 [2]	1
Slika 2. Dolazak helikoptera na brod [15]	2
Slika 3. Predvorje broda [14]	3
Slika 4. Vanjski bazen sedme palube [14]	4
Slika 5. Prikaz osme palube [16]	4
Slika 6. Raspored zona [3]	7
Slika 7. Definicija kutova trupa [3]	9
Slika 8. Kut između rebara i vodne linije [3]	13
Slika 9. Podjela morskog okoliša [6]	18
Slika 10. Mikrostruktura austenitnog čelika X5CrNiMo17-12-2 AISI – 316 (EN 1,4401) [8]	21
Slika 11. Odnos austenita i ferita u dupleks čeliku pri različitim temperaturama [10]	22
Slika 12. Mikrostruktura feritnog čelika X2CrNi12 AISI 410L (EN 1,4003) [8]	23
Slika 13. Mikrostruktura feritnog čelika [8]	24
Slika 14. Bakar kakav se ponekad može vidjeti u prirodi [11]	25
Slika 15. Dubina korozijskog oštećenja ovisno u udjelu klorida za 90/10 Cu – Ni leguru pri brzini strujanja morske vode od 9 m/s [12]	25
Slika 16. Dubina korozijskog oštećenja ovisno u udjelu klorida za 70/30 Cu – Ni leguru pri brzini strujanja morske vode od 9 m/s [12]	26

POPIS TABLICA

Tablica 1. Opis polarnih klasa [3]	6
Tablica 2. Proračunski koeficijenti ovisni o klasi [3].....	8
Tablica 3. Čimbenici klase [3]	9
Tablica 4. Vrijednosti koeficijenta Ppfi [3]	12
Tablica 5. Ovisnost količine otopljenog kisika o temperaturi morske vode pri uobičajenom salinitetu (35%) i u ravnoteži s atmosferskim zrakom [6].....	17
Tablica 6. Uobičajena primjena nehrđajućih čelika u morskim uvjetima[5].....	19

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
AF	/	Koeficijent područja trupa
A_w	cm ²	Površina struka
A_{pn}	cm ²	Neto površina flanže
A_{fn}	cm ²	Površina flanže
B	m	Širina broda
b_{nonbow}	m	Visina površine opterećenja
b	mm	Sunosiva širina lima
b_w	mm	Udaljenost središta flanže od centralne linije nosača
CF_C	/	Koeficijent loma
CF_D	/	Koeficijent površine opterećenja
CF_{DIS}	/	Koeficijent istisnine klase
CF_F	/	Koeficijent kolapsa savijanja
CF_L	/	Koeficijent uzdužne čvrstoće
C_B	/	Koeficijent punoće
DF	/	Faktor istisnine broda
D	kt	Istisnina broda
F_{nonbow}	MN	Sila
h	mm	Visina profila
h_w	mm	Visina struka
h_{fc}	mm	Visina nosača mjerena od središta flanže
P_{avg}	MPa	Srednji tlak
PPF_p	/	Koeficijent najvećeg tlaka
Q_{nonbow}	MN/m	Kontinuirano opterećenje
s	m	Razmak rebara

SAŽETAK

Cilj ovog rada je detaljan prikaz luksuznog broda Scenic Eclipse i odabir eksploatacijskih zahtjeva na izbor materijala i tehnologija izrade kod polarnih kruzera. Scenic Eclipse je luksuzni brod koji se proizvodi u Hrvatskoj koji podiže putovanja s 5 zvjezdica na potpuno novu razinu. Slikovito je prikazan unutrašnji i vanjski dio broda. U radu je proveden pregled zahtjeva pravila za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata te su odabrani najpogodniji materijali za izradu dijelova luksuznog broda.

SUMMARY

The aim of this thesis is a detailed presentation of the luxury ship Scenic Eclipse and the selection of exploitation requirements for the choice of materials and manufacturing technology for polar cruisers. Scenic Eclipse is a luxury ship built in Croatia that takes 5-star travel to a whole new level. The interior and exterior of the ship are vividly depicted. The paper reviewed the requirements of the rules for dimensioning structural elements and selected the most suitable materials for making parts of a luxury ship.

1. UVOD

Kruzer ili brod za krstarenje je putnički brod, čija namjena nije prijevoz putnika od jednog do drugog odredišta, već je namijenjen uživanju u putovanju i dodatnim sadržajima na brodu. Krstarenje već dugo čini značajan dio turističke industrije, te se s vremenom razvio i vid istraživačkog krstarenja u inače teško dostupne dijelove planeta, kao što su polarna područja. Polarni kruzer Scenic Eclipse projektiran i izgrađen 2019. godine u Hrvatskoj jedinstven je proizvod vrhunske kvalitete, koji osim zadovoljavanja vrlo zahtjevnih radnih i sigurnosnih uvjeta, putnicima pruža i luksuzan boravak na brodu. Unatoč krizi u turističkoj industriji uzrokovanoj pandemijom koronavirusne bolesti (COVID-19), u Hrvatskoj je ove godine započela izgradnja drugog polarnog kruzera, Scenic Eclipse II, što ukazuje na očekivani oporavak turističke industrije. [1]



Slika 1. Scenic Eclipse 1 [2]

2. BROD SCENIC ECLIPSE

2.1. Općenito o brodu Scenic Eclipse

Scenic Eclipse je možda najpoznatiji po svojim velikim i skupim igračkama: dva helikoptera sa šest putnika i jedna podmornica sa šest putnika. I podmornica i helikopter dolaze uz dodatne naknade, a izleti traju 20 ili 40 minuta. Objema vrstama vozila također upravljaju stručni piloti koji pažljivo objašnjavaju kakvo će iskustvo biti i što vidite ili osjećate. Helikopteri su opremljeni kontrolom vibracija, klima uređajem i prostranim kožnim sjedalima. Ako vremenski uvjeti dopuštaju, helikopteri mogu djelovati u mnogim posjećenim lukama. Podmornica koja može doseći dubinu od gotovo 1000 stopa ima okretna sjedala, tako da putnici mogu vidjeti u svim smjerovima kroz akrilne sfere. Može napraviti do 8 urona dnevno, iako nije dopušteno raditi u vodama SAD-a. Većina aktivnih izleta nije prikladna za osobe s poteškoćama u kretanju, iako su druge ležernije opcije općenito dostupne izvan polarnih itinerera. Cijena jednog noćenja je oko tisuću eura po osobi. [1]



Slika 2. Dolazak helikoptera na brod [15]

2.2. Dizajn broda

Dizajnirana od strane finske tvrtke za projektiranje brodova Foreship, Scenic Eclipse je najsigurnija i tehnološki najnaprednija jahta za istraživanje na svijetu.

Dizajn plovila uključuje najsuvremenije inženjerstvo i vanjski dizajn inspiriran elegantnim konturama mega jahte. Ukupna mu je duljina 168 m, širina 21,5 m. [4]

2.3. Slikoviti plan palube broda

Luksuzna jahta ima osam paluba, od treće do desete. Na prvoj palubi nalaze se prostorije za lakši ulazak u brod i samoposlužna praonica za goste.

Četvrta paluba sastoji se od predvorja dobrodošlice i recepcije, glavnog salona, bara u predvorju, panazijskog restorana, talijanskog restorana i restorana s odrescima, butika, kazališta, izletišta i knjižnice. [4]



Slika 3. Predvorje broda [14]

Peta paluba sadrži suvremeni vrhunski restoran, oceanski kafić i salon, salon za promatranje i bar te otvorenu palubu za promatranje na pramcu i apartmane za goste. Šesta paluba sadrži spa utočište, plitke bazene i apartmane za goste. Sedma paluba sadrži unutarnji/vanjski bazen, kozmetički salon, teretanu, studio za jogu i pilates, vanjsku terasu i apartmane za goste. [4]



Slika 4. Vanjski bazen sedme palube [14]

Osma paluba opremljena je heliodromom i hangarima, kao i apartmanima za goste. Deveta paluba ima hangar za helikoptere, spa i penthouse apartmane, dok deseta paluba ima terasu za sunčanje. [4]



Slika 5. Prikaz osme palube [16]

2.4. Povijest broda

Osnivač i predsjednik Scenic Grupe Glen Moroney odlučio je izgraditi Scenic Eclipse nakon što ga je inspirirala jahta Octopus Paula Allena. Izgradnja Scenic Eclipse započela je 2017. godine, ali je nebrojeno puta odgađana zbog stečaja brodogradilišta. Brod je konačno stupio u službu u kolovozu 2019. godine. Scenic Eclipse ima bruto masu od 17,545 t, duljinu 545 stopa (166,1 m), brzinu od 17 čvorova.

Scenic Eclipse prvi je put napustila svoje brodogradilište 27. srpnja 2019. za Vallettu na Malti gdje je plovilo registrirano. Zatim je otplovila u Reykjavik na Islandu gdje je 15. kolovoza 2019. ukrcao svoje prve goste, a prvo putovanje završilo je u Quebecu 27. kolovoza 2019. Scenic Eclipse službeno je imenovala glumica Helen Mirren u New Yorku 10. rujna 2019. [4]

2.5. Opremljenost broda

Scenic Eclipse prevozi do 228 putnika, iako je to ograničeno na 200 u polarnim regijama gdje se ukrcava opsežan tim ekspedicijskog osoblja kako bi održao predavanja, vodio i upravljao Zodijak Nautic brodovima. Plovilo se sastoji od svih apartmanskih smještaja sa svakom kabinom s balkonom.

ScenicEclipse opremljen je s dva helikoptera Eurocopter EC130, a također nosi podmornicu sa sedam osoba s posadom pod nazivom „Scenic Neptun“ koju je izgradio U-Boat Worx koja je sposobna roniti u dubinama do 300 metara. [4]

2.6. Plan puta

Plovilo je projektirano i izgrađeno prema pravilima polarnog koda i nosi oznaku Polar klase 6 za rad u polarnim regijama. Dok plovilo značajan dio godine provodi u polarnim regijama, također obavlja redovita putovanja u Americi, Europi, Karibima i Južnoj Americi. [4]

3. Pregled zahtjeva pravila za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata

3.1. Polarne klase

Opis u tablici je namijenjen za usmjeravanje vlasnika, dizajniranje i uprave za odabir odgovarajuću polarnu klasu koja odgovara zahtjevima za brod s njegovim namjerenim putovanjem ili službom. Oznaka polarne klase koriste se u ujedinenim zahtjevima za polarnu klasu brodova za prenošenje razlika između klasa s obzirom na operativnu sposobnost i snaga.

[3]

Tablica 1. Opis polarnih klasa [3]

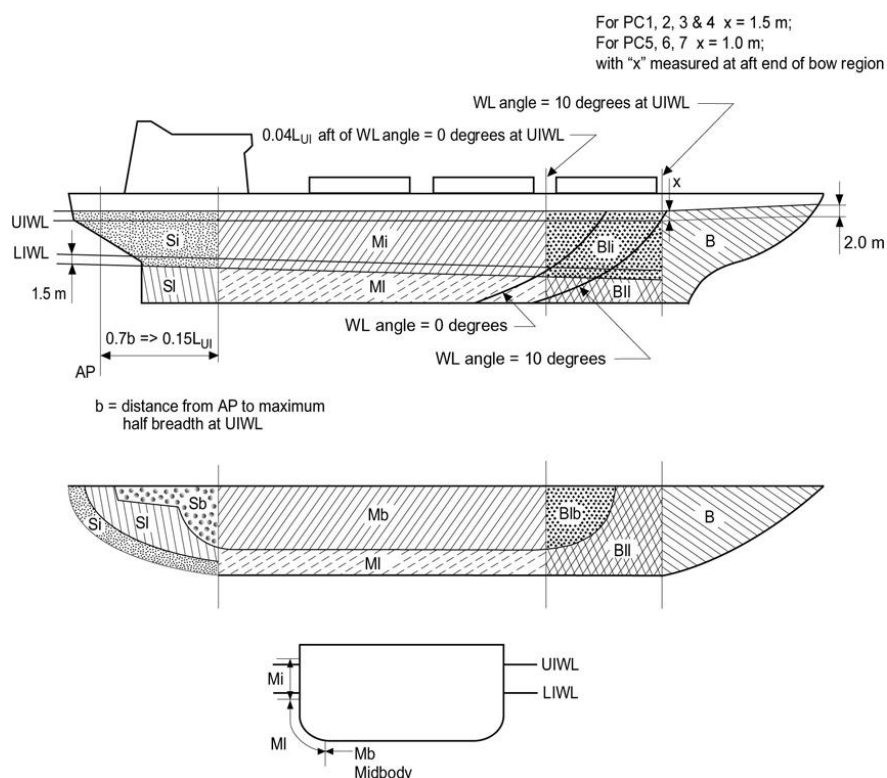
Polarna klasa	Opis (na temelju WMO nomenklature morskog leda)
PC 1	Cjelogodišnji rad u svim polarnim uvjetima
PC 2	Cjelogodišnji rad u uvjetima umjerenog višegodišnjeg leda
PC 3	Cjelogodišnji rad u drugogodišnjem ledu koji može uključivati višegodišnje uključke leda
PC 4	Cjelogodišnji rad u debelom prvogodišnjem ledu koji može uključivati stari led
PC 5	Cjelogodišnji rad u srednjoj prvoj godini leda koji može uključivati stari led
PC 6	Ljeto/jesen rad u srednjoj prvoj godini leda koji može uključivati stari led
PC 7	Ljeto/jesen rad u tankom prvogodišnjem ledu koji može uključivati stari led

3.2. Gornja i donja ledena vodena linija

Gornja i donja ledena vodena linija na kojima se temelji dizajn broda treba bit navedena u potvrdi o klasifikaciji. Gornja vodena linija leda treba biti definirana najvećim gazom pramca, sredine i krme. Donju vodenu liniju leda treba definirati minimalnim gazom na pramcu, sredini i krmi. Donja ledena vodena linija mora se odrediti uzimajući u obzir kretanje broda ledom. Propeler mora biti potpuno uronjen na dnu ledene vodene linije. [3]

3.3. Područje trupa

Trup broda polarne klase podijeljen je na područja koja održavaju veličinu opterećenja za koja se očekuje da će djelovati na njih. U uzdužnom smjeru postoje četiri područja: pramac, srednji pramac, srednji dio trupa i krma. Pramčani srednji, srednji i krmeni dio područja se dalje dijele u okomitom smjeru na područje dna, donje područje i područje ledenog pojasa. Opseg svake površine trupa ilustriran je na slici. [3]



Slika 6. Raspored zona [3]

3.4. Projektna opterećenja ledom

3.4.1. Općenito

Na konstrukciju pramca utječe određivanje dimenzija potrebnih za otpornost na opterećenje leda. Projektirano opterećenje ledom karakterizirano je prosječnim tlakom ravnomjerno raspoređenim preko pravokutnog tereta visine i širine. Unutar pramčanog područja svih brodova polarne klase i unutar pramčanog srednjeg ledenog pojasa području polarne klase PC6 i PC7, parametri opterećenja ledom su funkcije stvarnog pramca. Za određivanje parametara opterećenja ledom potrebno je izračunati praćenje karakteristika opterećenja ledom za područja pramčanog područja, koeficijent oblika, ukupna udarna sila, opterećenje vodova i tlak. [3]

3.4.2. Pogled na karakteristike udarnog opterećenja

Tablica 2 i tablica 3 prikazuju koeficijente koji definiraju karakteristike udarnog opterećenja.

Tablica 2. Proračunski koeficijenti ovisni o klasi [3]

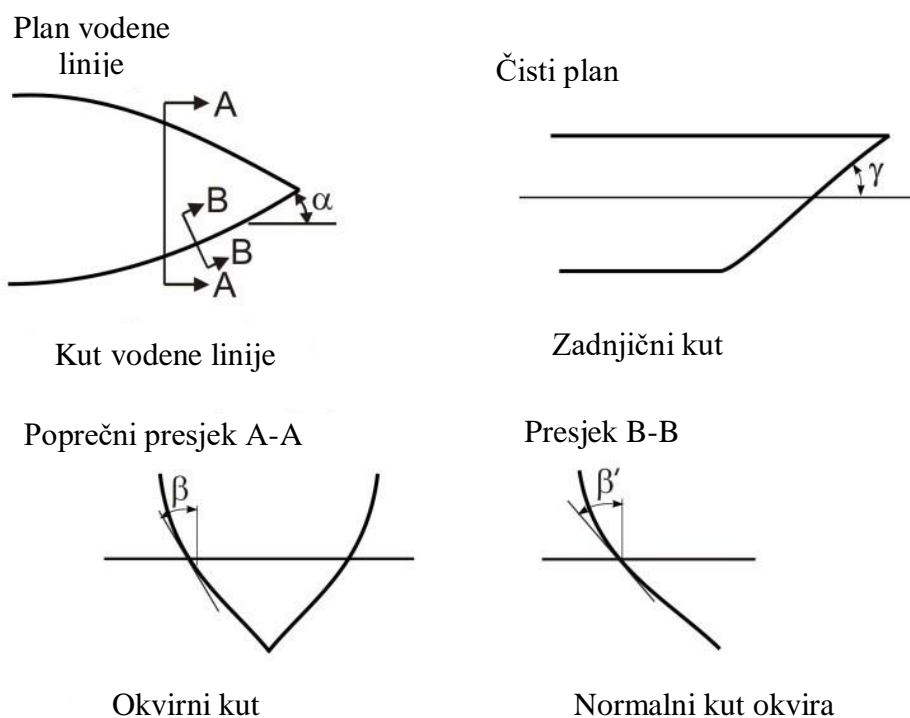
Polarna klasa	CF_C	CF_F	CF_D	CF_{DIS}	CF_L
PC1	17,69	68,60	2,01	250	7,46
PC2	9,89	46,80	1,75	210	5,46
PC3	6,06	21,17	1,53	180	4,17
PC4	4,50	13,48	1,42	130	3,15
PC5	3,10	9,00	1,31	70	2,50
PC6	2,40	5,49	1,17	40	2,37
PC7	1,80	4,06	1,11	22	1,81

Tablica 3. Čimbenici klase [3]

Polarna klasa	Faktor klase kvara udarnog loma	Faktor opterećenja vodene linije	Faktor tlaka
PC6	3,43	2,82	0,65
PC7	2,60	2,33	0,65

3.4.3. Pramčano područje

U pramčanom području, sila, opterećenje uzice, tlak i omjer širine i visine zakrpe opterećenja povezane sa scenarijem udarnog opterećenja su funkcije izmjerenih kutova trupa na gornjoj vodenoj liniji leda. Utjecaj kutova trupa je uhvaćen kroz izračun koeficijenta oblika luka. Kutovi trupa su definirani na slici [3]



Slika 7. Definicija kutova trupa [3]

3.4.4. Područje trupa izvan pramca

U području trupa izvan pramca sila opterećenja (F_{nonbow}) se određuje pomoću formule:

$$F_{nonbow} = 0,36 \cdot CF_C \cdot DF / MN$$

gdje je:

DF-koeficijent istisnine broda

D- istisnina broda

$$DF = D^{0,64} \quad \text{ako je } D < CF_{DIS}$$

$$DF = CF_{DIS}^{0,64} + 0,1 \cdot (D - CF_{DIS}) \quad \text{ako je } D > CF_{DIS}$$

U tablici 1. dane su vrijednosti koeficijenta CF_C u odnosu na različite polarne klase

Kontinuirano opterećenje za područje koje se nalazi izvan područja pramca određeno je prema formuli :

$$Q_{nonbow} = 0,639 \cdot F_{nonbow} \cdot 0,61 \cdot CF_D \quad [MN/m]$$

U tablici 1. dane su vrijednosti koeficijenta CF_D u odnosu na različite polarne klase. [3]

3.4.5. Zakrpa projektiranog opterećenja

U pramčanom području i pramčanom srednjem ledenom pojasu za brodove s oznakom klase PC6 i PC7 projektirana površina opterećenja ima dimenzije širine (w_{bow}) i visine (b_{bow}) koje se računaju prema izrazima:

$$w_{bow} = F_{bow} / Q_{bow} / m$$

$$b_{bow} = Q_{bow} / P_{bow} / m$$

F_{bow} = maksimalna sila F u području pramca

Q_{bow} = maksimalno opterećenje Q u području pramca

P_{bow} = maksimalan tlak P u području pramca

U područjima trupa osim onih obuhvaćenih 2.4.2.3 projektirano opterećenje ima dimenzije širine w_{nonbow} i visine b_{nonbow} definirane izrazima:

$$w_{\text{NonBow}} = F_{\text{NonBow}} / Q_{\text{NonBow}} \text{ [m]}$$

$$b_{\text{NonBow}} = w_{\text{NonBow}} / 3,6 \text{ [m]}$$

F_{nonbow} - sila

Q_{nonbow} - opterećenje vodova [3]

3.4.6. Tlak unutar projektirane površine opterećenja

Prosječni tlak, P_{avg} , unutar projektirane površine opterećenja određuje se izrazom:

$$P_{\text{avg}} = F / (b \cdot w) / \text{MPa}$$

$F = y_{\text{bow}}$ ili F_{nonbow} sila prema potrebi za područje trupa koje se razmatra / MN

$b = b_{\text{bow}}$ ili b_{nonbow} prema potrebi za razmatranu površinu trupa / m

$w = w_{\text{bow}}$ ili w_{nonbow} prema potrebi za razmatranu površinu trupa / m

Područje većeg, koncentriranog tlaka postoji unutar područja opterećenja. Općenito, manja područja imaju veći lokalni pritisak. U skladu s tim, faktori vršnog tlaka navedeni su u tablici 3 i koriste se za izračun koncentracije naprezanja na pojedinim konstrukcijskim elementima.

Tablica 4. Vrijednosti koeficijenta Ppfi [3]

Dio konstrukcije		PPF_i
Oplata	Poprečno orebrena	$PPF_p = (1,8 - s) \div 1,2$
	Uzdužno orebrena	$PPF_p = (2,2 - 1,2 \cdot s) \div 1,5$
Rebra u poprečnom sustavu gradnje	S provezama	$PPF_t = (1,6 - s) \div 1,0$
	Bez proveza	$PPF_t = (1,8 - s) \div 1,2$
Rebra u strukturi dna		$PPF_s = 1,0$
Proveze Uzdužnjaci Okvirna rebra		$PPF_s = 1,0$, if $S_w \div 0,5 \cdot w$ $PPF_s = 2,0 - 2,0 \cdot S_w / w$, if $S_w < (0,5 \cdot w)$
s = razmak rebara / m S_w = razmak okvira / m w = širina površine opterećenja / m		

Uz svaku površinu trupa povezan je faktor površine koji održava relativnu veličinu očekivanog opterećenja u tom području. Faktor površine (AF) za svaku površinu trupa naveden je u tablici 4.

U slučaju da se strukturni član proteže preko granice područja trupa, najveći faktor površine trupa mora se koristiti za određivanje veličine člana.

Zbog svoje povećane sposobnosti manevriranja, brodovi koji imaju pogonske uređaje s azimutnim propelerima ili propelerima s podstavljenim propelerima moraju imati posebno razmatrani Stern Icebelt (Si) [3]

3.5. Zahtjevi za ploče ljske

Potrebna minimalna debljina ploče ljske t dana je kao:

$$t = t_{net} + t_s \text{ / mm}$$

Gdje je: t_{net} – debljina ploče potrebna za otpornost na opterećenja ledom

t_s - debljina dopuštene korozije i abrazije

U slučaju oplata s poprečnim okvirom ($\Omega \geq 70^\circ$) uključujući sve donje oplata, tj. oplata u području trupa, neto debljina je dana s:

$$t_{\text{net}} = 500 \cdot s \cdot ((AF \cdot PPF_p \cdot P_{\text{avg}}) / \sigma_y)^{0.5} / (1 + s / (2 \cdot b)) / \text{mm}$$

U slučaju oplata s uzdužnim okvirom ($\Omega \leq 20^\circ$) kada je $b \geq s$, neto debljina je dana:

$$t_{\text{net}} = 500 \cdot s \cdot ((AF \cdot PPF_p \cdot P_{\text{avg}}) / \sigma_y)^{0.5} / (1 + s / (2 \cdot l)) / \text{mm}$$

U slučaju oplata s uzdužnim okvirom ($\Omega \leq 20^\circ$) kada je $b < s$, neto debljina dana je:

$$t_{\text{net}} = 500 \cdot s \cdot ((AF \cdot PPF_p \cdot P_{\text{avg}}) / \sigma_y)^{0.5} \cdot (2 \cdot b / s - (b / s)^2)^{0.5} / (1 + s / (2 \cdot l)) / \text{mm}$$

gdje je:

Ω - kut između vodne linije i orebrenja

s- razmak rebara

AF - koeficijent iz tablice 3.

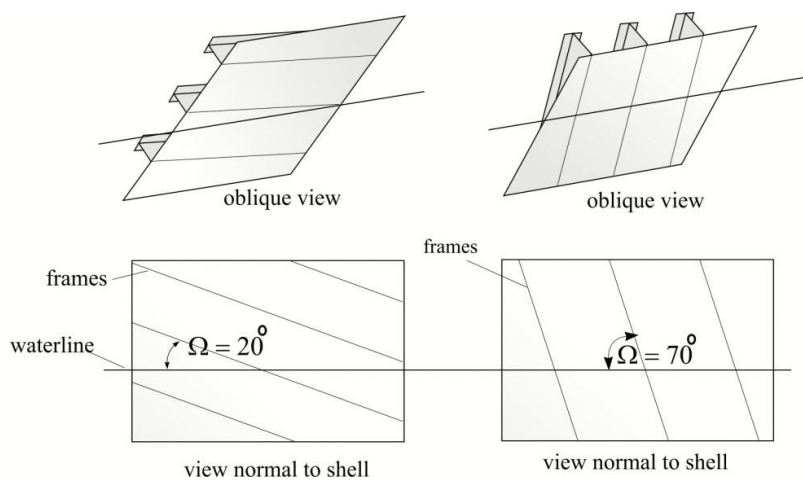
PPFP - koeficijent iz tablice 4.

P_{avg} - srednji tlak, / MPa

σ_y - granica razvlačenja/ N/mm²

b- visina površine opterećenja

l-udaljenost između oslonaca rebara [3]



Slika 8. Kut između rebara i vodne linije [3]

3.6. Uokvirivanje- općenito

Elementi okvira brodova Polar Class moraju biti dimenzionirani da izdrže opterećenja ledom.

Izraz „član okvira“ odnosi se na poprečne i uzdužne lokalne okvire koji nose teret, uzice i mrežne okvire u području trupa izloženim pritisku leda.

Tamo gdje su postavljene trake za raspodjelu opterećenja, njihov raspored i veličina moraju biti u skladu sa zahtjevima klasifikacijskog društva.

Čvrstoća elementa okvira ovisi o učvršćenosti koja je osigurana na njemu.

Fiksnost se može pretpostaviti tamo gdje su okvirni članovi kontinuirani kroz oslonac ili pričvršćen na potporni dio s priključnim nosačem.

U drugim slučajevima jednostavno potporanj se pretpostavlja osim ako se može dokazati da veza pruža značajno rotacijsko ograničenje.

Fiksnost se mora osigurati na osloncu bilo kojeg okvira koji završava unutar ledom ojačanog područja.

Pojedinosti križanja okvirnog člana s drugim okvirnim članovima, uključujući obložene strukture, kao i detalji za učvršćivanje krajeva okvirnih elemenata na potpornim dijelovima moraju biti u skladu sa zahtjevima klasifikacijskog društva.

Efektivni raspon elemenata okvira treba odrediti na temelju njegove oblikovane dužine. Ako su nosači postavljeni, efektivni raspon može se smanjiti u skladu s uobičajenom praksom.

Zagrade je potrebno konfigurirati kako bi se osigurala stabilnost u području elastičnosti i odziva nakon popuštanja.

Pri izračunavanju modula presjeka i posmične površine elementa okvira, treba koristiti debljine rebra, prirubnice (ako postoji) i pričvršćene oplatae. [3]

4. MATERIJALI

4.1. Materijali izloženi morskoj vodi

Materijali izloženi morskoj vodi kao što su lopatice propelera, glava brodskog vijka i glava brodskog vijka moraju imati istežanje najmanje 15% na proporcionalno kratkom ispitnom tijelu.

Za materijale koji nisu bronca i austenitni čelik provodi se ispitivanje udarom na Charpyjevom batu s V utorom. Ispitni komadi uzeti iz odljevka propelera moraju biti reprezentativni za najdeblji dio. Prosječna vrijednost energije udarca je 20 J uzeta iz tri Charpyjeva V-testa treba biti dobivena na -10 °C. [7]

4.2. Materijali izloženi temperaturama morske vode

Materijali izloženi temperaturi morske vode moraju biti od čelika ili drugog odobrenog duktilnog materijala. Prosječna vrijednost energije udarca od 20 J uzeta iz tri ispitivanja treba se dobiti na minus 10 °C. [7]

4.3. Općenito o koroziji u morskim uvjetima

Koroziju možemo definirati kao nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala, uzrokovano kemijskim, biološkim ili fizikalnim agensima. Korozija je spontani proces koji se ne može spriječiti, ali se može usporiti. Osim metala korodirati mogu i drugi materijali kao što su staklo, beton, keramika te polimerni materijali. Ukoliko se govori o koroziji, a ne spominje se posebno materijal, misli se na koroziju metala. Korozija metalnih struktura uzrokuje gubitak njihove funkcionalnosti, a time nanosi i znatne štete gospodarstvu te uzrokuje onečišćenje okoliša, ali i što je najopasnije ugrožava ljudske života.

U današnje vrijeme treba posvetiti puno više pažnje pojavi korozije zbog :

- Povećanja upotreba metala u svim područjima tehnologije
- Upotrebe metalnih konstrukcija sve tanjih dimenzija koje ne toleriraju korozijske napade istog intenziteta kao nekad upotrebljavane teške konstrukcije

- Upotrebe metala za specijalnu primjenu ili upotrebe rijetkih i skupih metala čija zaštita zahtjeva posebne mjere opreza
- Pojačane korozivnosti okoline uslijed povećanog zagađenja tla, zraka i vode

Najpoznatiji metalni konstrukcijski materijal je čelik. Njegove konstrukcije izložene su agresivnom djelovanju različitih korozijskih medija kao što su morska voda, atmosfera, plinovi, kiseline, lužine i dr. Legure bakra s niklom su najčešće korišteni metalni materijali koji dolaze u doticaj s morskom vodom. Ovi materijali se primjenjuju u postrojenjima za desalinizaciju kao i za brodske i lučke konstrukcije. Često se upotrebljavaju inhibitori korozije, posebice kod zatvorenih sustava, kao što su rashladni sustavi. Zbog osjetljivosti morskog ekosustava, inhibitori koji se koriste ne smiju biti štetni za morske organizme. Zbog toga danas se intenzivno radi na pronalasku novih inhibitora korozije koji su ekološki prihvatljivi za primjenu u morskoj vodi. [7]

4.4. Morska voda kao korozijski medij

Morska voda prekriva oko 2/3 površine Zemlje. Osim što se brojne konstrukcije nalaze u moru ili uz more, morska voda ima veliku ulogu u nekim industrijskim procesima pri čemu u oba slučaja direktno utječe na ponašanje materijala koji su joj izloženi.

Osnovne karakteristike morske vode su:

- Visoka koncentracija soli (uglavnom natrijeva klorida)
- Visoka električna vodljivost koja ovisi o temperaturi i koncentraciji klorida
- Prisutnost otopljenog kisika [6]

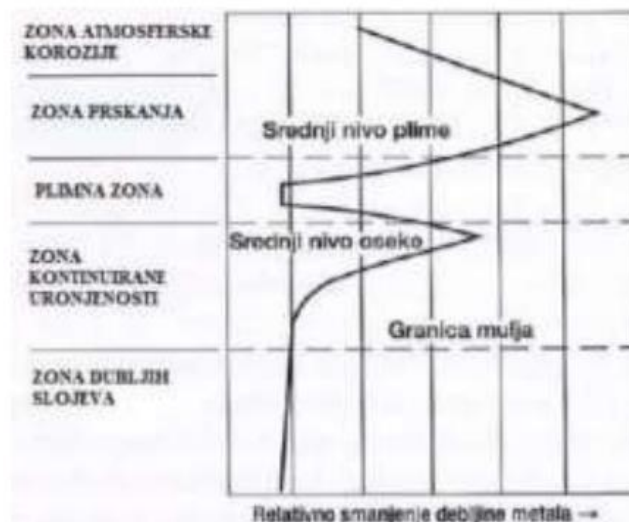
Tablica 5. Ovisnost količine otopljenog kisika o temperaturi morske vode pri uobičajenom salinitetu (35%) i u ravnoteži s atmosferskim zrakom [6]

Temperatura (°C)	-2	0	5	10	15	20
Otopljeni kisik (mL/L)	8,25	8,08	7,16	6,44	5,68	5,38

Osim toga, morska voda sadrži veliki broj organizama i mikroorganizama koji uzrokuju obrastanje i mogu izazivati mikrobiološki uzrokovanu koroziju. Sulfidi i amonijevi ioni koji imaju utjecaj na različite oblike korozijskih oštećenja nalaze se u onečišćenoj morskoj vodi. Morska voda je mješavina 96,5% čiste vode i 3,5% drugih sastojaka kao što su soli, otopljene soli i organske tvari. Od soli najviše sadrži natrijev klorid, u iznosu od čak 85%. Uz natrijeve ione najzastupljeniji su kalcijevi, magnezijevi i kalijevi ioni, koji čine jake lužine te bikarbonati i sulfati, koji čine slabe kiseline što daje morskoj vodi lužnatu pH-vrijednost oko 8 [9]

Morski okoliš podijeljen je u 5 zona prema La Queu: [9]

1. Zona atmosferske korozije
2. Zona prskanja
3. Zona plimnog sloja
4. Zona kontinuirane uronjenosti
5. Zona dubljih slojeva (zona mulja)



Slika 9. Podjela morskog okoliša [6]

Za većinu konstrukcijskih materijala morska voda je izrazito korozivan medij, a rijetki su metalni materijali koji pokazuju otpornost prema korozijskom djelovanju morskog okoliša. Jedni od tih materijala su legure bakra i nikla, aluminijske bronce, mjedi i legure bakra i berilija, te nehrđajući čelik. [6]

4.5. Primjena nehrđajućih čelika u morskoj vodi

Nehrđajući čelici koriste se za brojne primjene u morskoj vodi i to iz puno različitih razloga, a jedan od čimbenika je otpornost na koroziju dok drugi uključuju čvrstoću, oblikovljivost te uštedu na materijalu. U tablici su prikazani primjeri upotrebe nehrđajućih čelika u morskim uvjetima. Mogu biti dio sustava različitih metala i zaštićeni nekim drugim manje plemenitim metalima, ali u tom slučaju glavni razlog njihove upotrebe nije visoka otpornost prema koroziji. [5]

Tablica 6. Uobičajena primjena nehrdajućih čelika u morskim uvjetima[5]

Uvjeti	Tip legure	Primjena
Morska atmosfera	X5CrNiMo1712 AISI (316)/ X2CrNiMo1712(AISI 316L); Superdupleks	Cijevi, električni konektori, armatura(beton),kućišta instrumenata, nosači kablova, ograde, vijčani i zakovični spojevi, obloge dijelova naftnih platformi te brodska oprema
Morska voda s galvanskom zaštitom	X5CrNiMo1712 (AISI 316)/ X2CrNiMo1712(AISI 316L); „Lean“ dupleks Dupleks Precipitacijski očvrnuti	Oprema na trupu broda, cijevne rešetke, rotori pumpi, pramčana statva, ventili, vijčani i zakovični spojevi za aluminij i čelik, osovine pumpe Temperaturna desalinacijska postrojenja Podmorski sustavi za rukovanje s mokrim CO ₂ Specijalni pričvršćivači, vijci i sl.
Morska voda bez galvanske zaštite	X1NiCrMoCuN25-20-5 (AISI 904L) 6% Mo	Cijevi, prskalice kod toplinskih desalinizacijskih postrojenja, korita Kondenzatori u elektrani, cjevovod kondenzatora, cijevi za balastnu, morsku vodu i vodu za gašenje, pumpe, ventili i postrojena za RO desalinizaciju

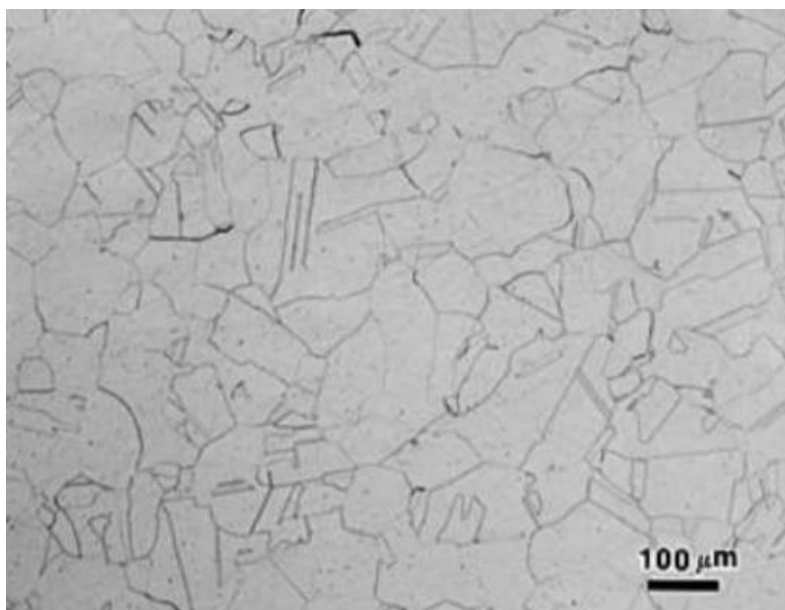
	Superdupleks	Visokotlačne injektirajuće pumpe (naftne bušotine)
--	--------------	--

	Superferitni čelici	Pumpe za morsku vodu i vodu za gašenje, propeleri, osovine, pomični pramčani sustavi, cjevovodi i ventili za morsku vodu, izmjenjivači topline (cijevni i pločasti), vijčani i zakovični spojevi, vezni kablovi ronilaca, cjevovod za RO desalinizaciju Cjevovod kondenzatora u elektrani
Deaerirana slana voda	X5CrNiMo1712 (316)/ X2CrNiMo1712 (316L); Dupleks	Obloge za komoru postrojenja za višestupanjsku destilaciju bljeskom, cijevi za ubrizgavanje vode

4.6. Vrste nehrdajućih čelika za primjenu u morskim uvjetima

4.6.1. Austenitni nehrdajući čelici

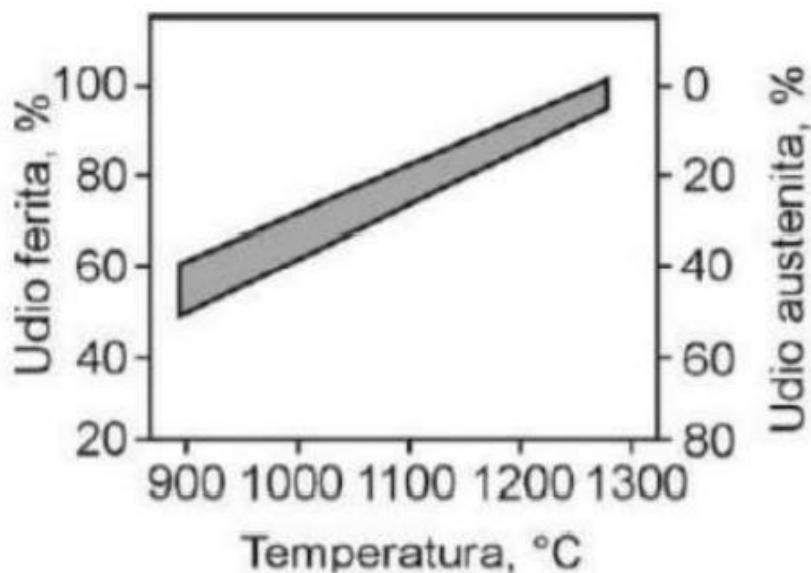
Čelici s $<0,03\%C$ ili stabilizirani čelici upotrebljavaju se isključivo za zavarene komponente u svrhu izbjegavanja interkristalne korozije u zoni utjecaja topline. Osnovni austenitni čelici za upotrebu u morskoj vodi su: EN X5CrNiMo17-12-2 koji sadrži 17% Cr, 2% Mo i 10% Ni te EN X2CrNiMo17-12-2 koji ima nizak udio ugljika. Ovi čelici imaju ograničenu otpornost prema lokalnoj koroziji pa u slučajevima ako postoje napuknuća ili su izloženi mirujućoj morskoj vodi zahtijevaju galvansku ili katodnu zaštitu od komponenti koje ih okružuju. Današnji čelici AISI 316 i 316L često se proizvode uz minimalni dodatak legiranih elemenata pa imaju nižu postojanost prema koroziji u morskim uvjetima od verzija čelika koji su se prije koristili. Austenitni čelik X1NiCrMoCuN25-20-5 (AISI 904L) ima više legiranih elemenata (nikla i kroma) u odnosu na čelik AISI 316L. Prvobitno je razvijen za rad sa sumpornim kiselinama, ali danas se primjenjuje u morskim uvjetima posebno u desalinaciji .[5]



Slika 10. Mikrostruktura austenitnog čelika X5CrNiMo17-12-2 AISI – 316 (EN 1,4401) [8]

4.6.2. Dupleks nehrđajući čelik

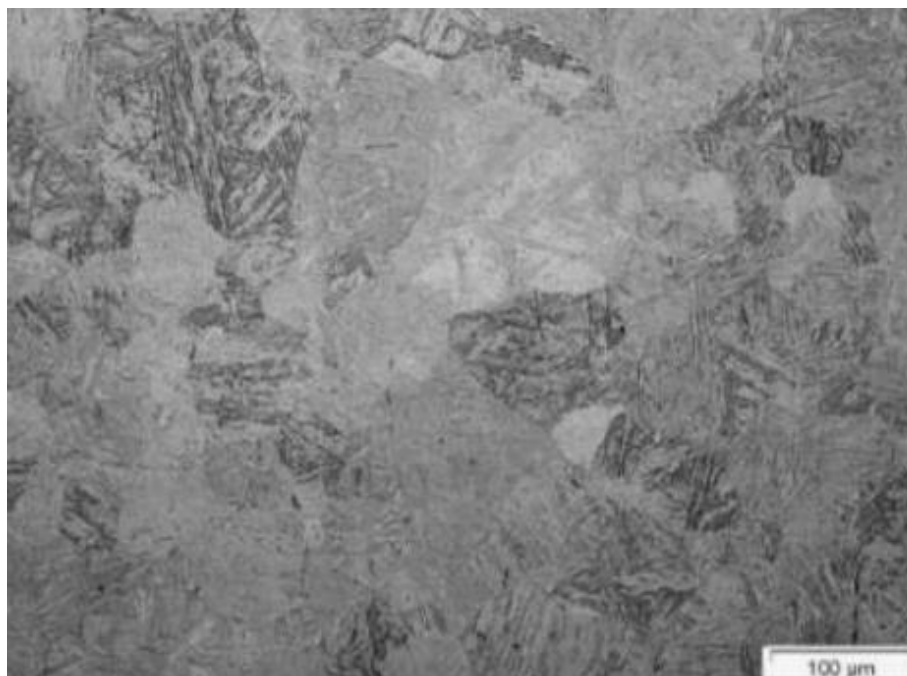
U svojoj strukturi dupleks-nehrđajući čelici sadrže i austenit i ferit i to u približno jednakim djelovanjima. U odnosu na austenitni čelik imaju veći udio kroma, ali manji udio nikla te nizak udio ugljika. Legure s nižim udjelom molibdena imaju sličnu ili nižu otpornost na lokalnu koroziju kao i čelici AISI 316L dok "Lean" dupleks čelici s višim udjelom molibdena imaju višu otpornost na lokalnu koroziju od AISI 316L čelika. Čelik 2205 (X2CrNiMoN22-5-3 ili 1.4462) s 22% kroma ima bolju otpornost na lokalnu koroziju od AISI 316 čelika, a sve dupleks legure pokazuju dobru otpornost prema kloridnoj napetosnoj koroziji. Granica razvlačenja čelika 2205 i "lean"- dupleks čelika je približno dva puta veća u odnosu na austenitne čelike što znači da čvrstoća dupleks-legura iznosi oko 450 MPa u usporedbi s AISI 316L čelicima koji imaju oko 190 MPa. Superdupleks čelici s višim udjelom kroma (oko 25%), dušika i molibdena dostupni su kao lijevani proizvodi i proizvodi oblikovani deformiranjem te imaju visoku čvrstoću kao i visoku otpornost prema koroziji kao i kod superaustenitnih legura. [5]



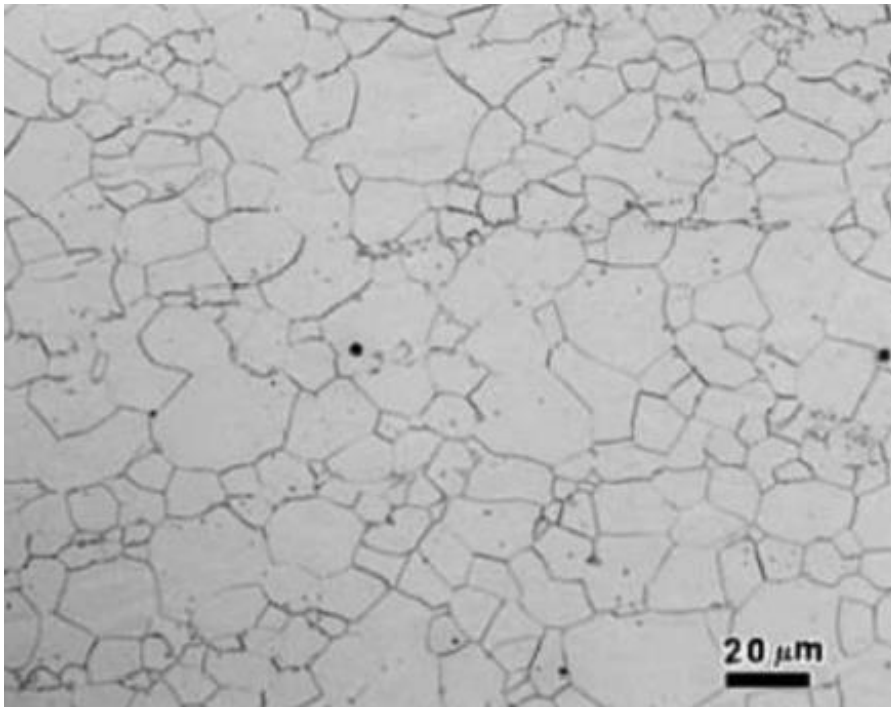
Slika 11. Odnos austenita i ferita u dupleks čeliku pri različitim temperaturama [10]

4.6.3. Martenzitni, feritni i precipitacijsko očvrsnuti čelici

U morskim uvjetima najčešće korišteni čelici su austenitni i dupleks-čelici, ali postoje i druge vrste čelika koji su dostupni za takvu upotrebu kao što su martenzitni i feritni čelici. U pravilu martenzitni i feritni čelici imaju puno veću postojanost na morsku atmosferu u odnosu na ugljične i niskougljične čelike. Za primjenu u uronjenim sustavima oni se u pravilu ne preporučuju. U tablici 6. može se vidjeti da superferitni čelici s visokim udjelima kroma i drugih legiranih elemenata poput nikla i molibdena pokazuju dobru otpornost prema koroziju u atmosferskim i uronjenim uvjetima. Budući da ih je vrlo teško proizvesti za materijale debljih stijenki oni se uglavnom koriste za tanke dijelove kako bise izbjegli problemi sa žilavošću. Najveću primjenu pronašli su u elektranama gdje se koriste kao cijevi izmjenjivača topline kod kondenzatora. Glavni legirani elementi precipitacijsko očvrnutih čelika su krom i nikel. Također sadrže i Al, Nb, Mo, Ti i Cu. Ovi čelici imaju visoku čvrstoću, ali se rijetko koriste do svog maksimuma zbog osjetljivosti na napetosnu koroziju i vodikovu krhkost. Nemaju dobru otpornost prema koroziji kao austenitni i dupleks-čelici pa se koriste kada je glavni zahtjev čvrstoća, uz umjerenu korozijsku postojanost ili ako su galvanski zaštićeni. [5]



Slika 12. Mikrostruktura feritnog čelika X2CrNi12 AISI 410L (EN 1,4003) [8]



Slika 13. Mikrostruktura feritnog čelika [8]

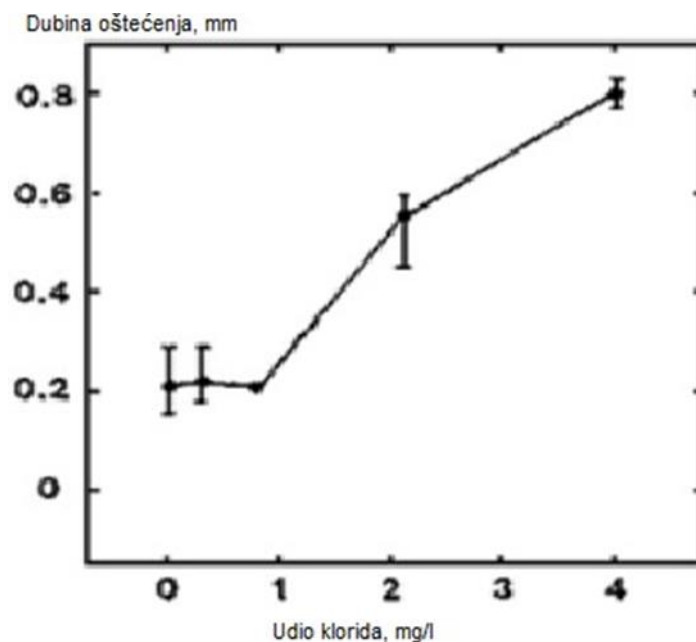
4.6.4. Ponašanje bakra i njegovih legura u morskoj vodi

U vlažnoj atmosferi, u prirodnim vodama i u tlu bakar se prekriva zelenkastim ili plavkastim slojem produkata korozije snažnoga zaštitnog djelovanja koji se naziva patina. Izraz patina primjenjuje se također posve općenito za obojene slojeve korozijskih produkata na neželjeznim metalima. Upravo zbog patiranja očuvani su predmeti od bakra i njegovih legura stari dvije i više tisuća godina premda je na njima zaštitni sloj rijetko kada deblji od 1 mm. Patina je obično slabo topljiva, eventualno hidratirana bazična sol bakra, tj. smjesa bakar-hidroksida i neke soli koja može sadržavati kristalnu vodu. Korozija je bakra u vodi to sporija što je veća prolazna tvrdoća vode, tj. koncentracija kalcij-hidrogenkarbonata i magnezij-hidrogenkarbonata koji povišenjem pH-vrijednosti ili zagrijavanjem daju kamenac. On se uklapa u patinu poboljšavajući njezina zaštitna svojstva ili se pak sam izlučuje kao zaštitna prevlaka.

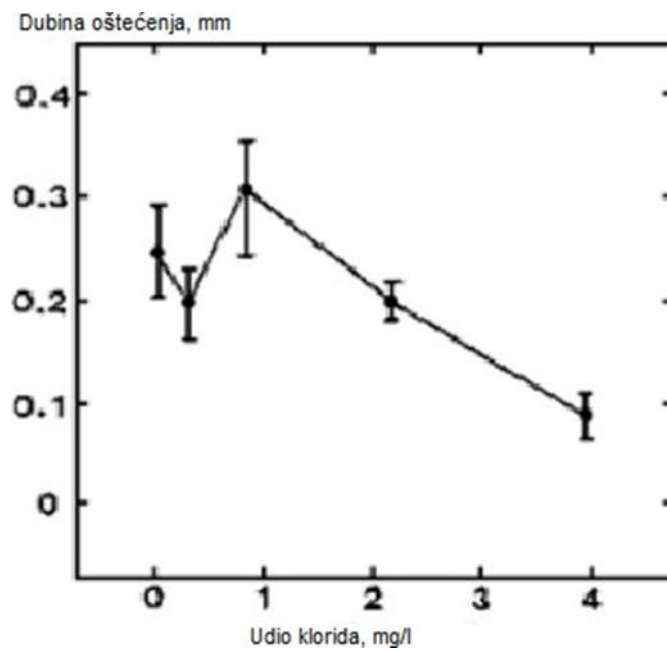
Bakreni ioni nastali korozijom bakra u vodi ili u živežnim namirnicama otrovni su za ljude mada trovanje bakrom nema težih posljedica jer se povraćanjem taj metal brzo izlučuje iz tijela. Prisutnost iona bakra u hrani štetno djeluje i na njezin okus. Međutim upravo zbog njihova toksičnog djelovanja, na bakru se ne susreće tzv. obraštanje (engl. Fouling) biljnim i životinjskim organizmima koji žive u moru. Valja naglasiti da je korozija bakra u mirnoj morskoj vodi ipak prilično spora. Povećanjem brzine strujanja morske vode ubrzava se proces korozije bakra. [13]



Slika 14. Bakar kakav se ponekad može vidjeti u prirodi [11]



Slika 15. Dubina korozijskog oštećenja ovisno u udjelu klorida za 90/10 Cu – Ni leguru pri brzini strujanja morske vode od 9 m/s [12]



Slika 16. Dubina korozivskog oštećenja ovisno u udjelu klorida za 70/30 Cu – Ni leguru pri brzini strujanja morske vode od 9 m/s [12]

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je pregled relativnih pravila za dimenzioniranje brodske konstrukcije izložene opterećenju od leda. Opterećenje od leda, za područje plovidbe PC6, uzrokuje povećanje mase konstrukcije vanjskog boka u iznosu od 15 do 20% u odnosu na istu konstrukciju koja nema zahtjev za plovidbu u području prisustva leda. Ovaj rad pruža osnove na kojima se temelji budućnost dizajna s novim i dodatnim zahtjevima. Potrebno je koristiti materijale koji su otporni na izrazito agresivne morske uvijete te niske temperature okoline. Odabirom pogodnih materijala produžuje se vijek trajanja broda. Analizirani su nehrđajući čelici poput austenitnog, martenzitnog, dupleks čelika te bakra i njegovih legura. U morskim uvjetima najčešće korišteni čelici su austenitni i dupleks čelici. Zaključeno je da se nehrđajući čelici vrlo teško proizvode za materijale debljih stijenki te se uglavnom koriste za tanke dijelove kako bi se izbjegli problemi sa žilavošću.

6. LITERATURA

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Brod_za_krstarenje
- [2] <https://ivijesti.hr/kruzer-scenic-eclipse-izgraden-u-puli-isplovio-je-na-testnu-voznju-a-uskoro-ce-na-daleka-mora/>
- [3] IACS Req. 2006/Rev.2 2016
- [4] <https://latteluxurynews.com/2019/05/24/scenic-responds-to-uljanik-bankruptcy/>
- [5] Powell, C., Francis, R. (2016): Korozijska svojstva metala u morkom okolišu: Osnovni priručnik, European Federation of Corrosion i NACE International, Hrvatsko društvo za zaštitu materijala, Zagreb.
- [6] Jarić, B., Rešetić, A. (2003): Korozija – elektrokemijske osnove i katodna zaštita, Korexpert, Zagreb
- [7] Stupnišek Lisac, E. (2007): Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Sveučilište u Zagrebu, FKIT
- [8] Voort, G. V. (2011): Microstructure of Ferrous Alloys, Vac Aero International Inc.
- [9] Goldberg, E. D. (2000): Composition of seawater, John Willey & Sons, USA
- [10] Lukačević, Z. (1998): Zavarivanje, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [11] <https://hr.eferrit.com/bakrene-cinjenice-kemijska-i-fizikalna-svojstva/>
- [12] Carol A. Powell: The Application of Copper Nickel Alloys in Marine Systems, Nickel Development Institute, 1992.
- [13] Ivan Esih, Zvonimir Dugi (1989): Tehnologija zaštite od korozije, Sveučilište u Zagrebu
- [14] <https://cruise-adviser.com/scenic-reveals-dining-options-scenic-eclipse/scenic-eclipse-lobby-bar/>
- [15] <https://www.ship-technology.com/projects/scenic-eclipse-ultra-luxury-yacht/>
- [16] <https://www.linkedin.com/pulse/scenic-eclipse-6-mega-yacht-yes-please-francesca-barone>

