

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nedjeljka Mandarić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Nedjeljka Mandarić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem doc.dr.sc. Ireni Žmak na pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada.

Zahvaljujem roditeljima koji su uvijek bili uz mene i pomagali kad je zatrebalo, široj obitelji te prijateljima.

Hvala suprugu na strpljenju i moralnoj podršci tijekom cijelog studija.

Nedjeljka Mandarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne 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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nedjeljka Mandarić**

Mat. br.: 0023050063

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena i svojstva bronce za izradu pomorskog brodskog vijka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application and Properties of Bronze in Marine Propellers**

Opis zadatka:

Brodski vijak ili brodski propulzor pretvara energiju vrtnje brodskog pogonskog vratila u hidrodinamičku silu pogona broda, što se postiže rotacijskim gibanjem krila brodskog vijka kroz morsku ili slatku vodu. U slučaju izrade brodskih vijaka koji moraju biti otporni na koroziju u morskoj vodi najčešća je primjena različitih vrsta ljevačkih bronci.

U ovom završnom radu potrebno je dati pregled povijesnog razvoja brodskog vijka, karakteristika porivnih sustava brodova manje i srednje veličine te pregled različitih vrsta materijala od kojih se izrađuju brodski vijci za navedene veličine pomorskih brodova.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je na pribavljenim dotrajalim pomorskim brodskim vijcima ispitati kemijski sastav materijala i utvrditi mikrostrukturu. Potrebno je pretražiti odgovarajuće norme za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala i opisati te norme. Ispitivanja mehaničkih svojstava potrebno je provesti po odabranim normama.

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

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Povijesni razvoj brodskog vijka	1
1.2. Brodska propulzija	2
1.3. Vrste brodskih vijaka (propulzora)	3
1.3.1. Vijci s fiksnim korakom ili usponom (engl. FixedPitchPropeller-FPP)	3
1.3.2. Vijci s promjenjivim korakom (engl. Fixed Pitch Propeller-CPP)	4
1.3.3. Vijci u sapnici (engl. Ducted Propeller).....	4
1.3.4. POD sustavi propulzije (engl. Thusters-pod drives).....	5
1.3.4.1. Azipod (engl. Azimuthing Podded Drive – gondolski propulzor) sustav propulzije	7
1.3.4.2. Dolphin sustav propulzije	8
1.3.4.3. Mermaid sustav propulzije.....	8
1.3.4.4. Schottel-Siemens sustav propulzije	9
1.3.5. Cikloidni ili Voight-Schneiderov vijak.....	10
1.3.6. Vodomlazni propulzor	12
1.3.7. Pramčani i krmni potisnici	14
1.3.8. Uporaba električne propulzije.....	15
1.4. Geometrija brodskog vijka.....	16
1.4.1. Definicija koraka i skliza brodskog vijka	18
1.5. Iskoristivost propulzije.....	19
1.5.1. Koeficijent iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji	21
1.5.2. Koeficijent prijelaza.....	21
1.5.3. Koeficijent utjecaja trupa	22
1.6. Kavitacija	22
1.6.1. Tipovi kavitacije	23
1.6.2. Oštećenja koja nastaju uslijed djelovanja kavitacije i njihova prevencija	26
1.6.2.1. Erozija	26
1.6.2.2. Savijanje izlaznih bridova vijčanih krila.....	27
1.6.2.3. Vibracije i šum.....	28
1.7. Materijali brodskih vijaka	29
1.8. Lijevanje brodskih vijaka.....	32
1.8.1. Izrada modela.....	32

1.8.2. Dorada modela broskog vijka	34
2. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA	35
2.1. Analiza kemijskog sastava	35
2.2. Analiza mikrostrukture	35
2.2.1. Priprema uzorka	36
2.2.1.1. Izrezivanje	36
2.2.1.2. Zalijevanje uzorka u polimernu masu	36
2.2.1.3. Brušenje	37
2.2.1.4. Poliranje	37
2.2.1.5. Nagrizanje	37
2.2.2. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM)	38
2.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava	40
2.3.1. Tvrdoća materijala	40
3. EKSPERIMENTALNI DIO	42
3.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja	42
3.2. Materijal za ispitivanje	42
3.3. Analiza mikrostrukture	43
3.3.1. Priprema uzorka	43
3.3.1.1. Izrezivanje	43
3.3.1.2. Zalijevanje uzorka u polimernu masu	44
3.3.1.3. Brušenje	45
3.3.1.4. Poliranje	46
3.3.1.5. Nagrizanje	47
3.3.2. Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom	47
3.3.3. Ispitivanje kemijskog sastava EDS-metodom	50
3.4. Ispitivanje tvrdoće materijala	52
4. ANALIZA REZULTATA	54
4.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava	54
4.2. Osvrt na analizu mikrostrukture	54
4.3. Osvrt na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava	54
5. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA	56
PRILOZI	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Propulzijski sustav [4].....	2
Slika 2. Brodski vijak s fiksnim krilima [5]	3
Slika 3. Brodski vijak s promjenjivim usponom krila [5]	4
Slika 4. Vijak u sapnici [6].....	5
Slika 5. Azipod sustav propulzije [7]	7
Slika 6. Dolphingondolskipropulzor [10].....	8
Slika 7. Mermaidgondolskipropulzor [10]	9
Slika 8. Schottel gondolski propulzor (SEP) [10]	9
Slika 9. Schottel-Siemens propulzor (SSP) [11]	10
Slika 10. Prikaz krme Voight-Schneiderovog propulzijskog sustava [11]	12
Slika 11. Vodomlazni propulzor [8].....	13
Slika 12. Potisnik [8].....	14
Slika 13. Dijelovi vijka (desnokretni brodski vijak s četiri krila) [3]	17
Slika 14. Definicija koraka i skliza vijka [3].....	18
Slika 15. Stabilna slojasta kavitacija [3]	24
Slika 16. Mjehuričasta kavitacija [3].....	24
Slika 17. Magličasta kavitacija iz slojaste kavitacije [3]	25
Slika 18. Vrtložna kavitacija na vrhu krila [3]	26
Slika 19. Erozijska krila vijka [3]	27
Slika 20. Savijanje izlaznih bridova vijčanih krila [3]	28
Slika 21. Vlanknima ojačani polimerni kompozitni brodski vijak [18].....	32
Slika 22. Bušenje rupa u svakom pojedinom segmentu [19]	33
Slika 23. Model broskog vijka od drveta [19].....	33
Slika 24. Dorada modela broskog vijka [19].....	34
Slika 25. Model broskog vijka spreman za kalupljenje [19].....	34
Slika 26. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) [22]	39
Slika 27. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [23]	40
Slika 28. Ispitivani brodski vijak.....	43
Slika 29. Izrezivanje uzorka tračnom pilom.....	44

Slika 30. Uzorci za mikrostrukturnu analizu.....	44
Slika 31. Polimerna preša Pneumet Press za zalijevanje uzoraka u polimernu masu	45
Slika 32. Uzorak zaliven u polimernu masu	45
Slika 33. Brušenje uzorka.....	46
Slika 34. Uređaj za poliranje	46
Slika 35. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51	47
Slika 36. Prikaz mikrostrukture materijala u nagriženom stanju (povećanje 200 x)	48
Slika 37. Prikaz mikrostrukture materijala u nagriženom stanju (povećanje 1000 x)	48
Slika 38. Dijagram stanja aluminijske bronce legirane niklom i željezom [26]	49
Slika 39. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM).....	50
Slika 40. Mjesto ispitivanja kemijskog sastava pomoću EDS-detektora	51
Slika 41. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava pomoću EDS-detektora.....	52
Slika 42. Mikrotvrdomjer PMT-3	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav dobiven pomoću EDS-detektora	51
Tablica 2. Mikrotvrdoća (HV0,2) na vrhovima uzorka.....	53
Tablica 3. Mikrotvrdoća (HV0,2) na rubovima uzorka.....	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	mm	srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otisnuća
F	N	sila
HV	-	tvrdoća po Vickersu
h_S	m	visina stupca vode do središta osovine vijka
l	m	duljina
P	m	korak vijka
p	MPa	tlak na mjestu osovine vijka
P_E	W	efektivna snaga
P_T	W	snaga poriva
p_v	Pa	tlak isparavanja
R_T	N	ukupni otpor broda
s	%	koeficijent skliza
s_A	%	prividni koeficijent skliza
v_e	m/s	brzina napredovanja
v	m/s	brzinastrujanja vode
η	-	koeficijent ukupne iskoristivosti
η_0	-	koeficijent vijka u slobodnoj vožnji
η_B	-	koeficijent iskoristivosti vijka po krmu broda
η_D	-	koeficijent ukupne iskoristivosti propulzije
η_H	-	koeficijent utjecaja trupa
ρ	kg/m ³	gustoća vode
σ	-	kavitacijski broj (koeficijentkavitacije)
θ	°	kut uspona vijka

SAŽETAK

Brodski vijak ili brodski propulzor je dio broda koji pretvara energiju vrtnje brodskog pogonskog vratila u hidrodinamičku silu pogona broda. To se postiže rotacijskim gibanjem krila brodskog vijka kroz morsku ili slatku vodu. U ovom završnom radu prikazan je pregled povijesnog razvoja brodskog vijka, karakteristika porivnih sustava brodova manje i srednje veličine te pregled različitih vrsta materijala od kojih se izrađuju brodski vijci za navedene veličine pomorskih brodova. U eksperimentalnom dijelu rada je na pribavljenim dotrajanim pomorskim brodskim vijcima ispitan kemijski sastav materijala i utvrđena je mikrostruktura. Kemijski sastav je potvrdio da je riječ o aluminijskoj bronci legiranoj nikom i željezom, čime se postiže antikorozivnost ovog materijala u morskoj vodi. Prema normi je ispitana tvrdoća materijala te su potvrđene visoke vrijednosti tvrdoće čime će se postići manje trošenje i veća trajnost brodskog vijeka. Analiza mikrostrukture je pokazala karakterističnu dvofaznu mikrostrukturu aluminijske bronce legirane željezom i nikom, s α -fazom kristalima mješancima i s κ -fazom intermetalnog spoja.

Ključne riječi: propulzija, brodski vijak, aluminijska bronca, nikal, željezo

SUMMARY

Ship's propeller is part of the ship which transforms propeller shaft rotating energy into the hydrodynamic force that drives the ship. This is achieved by rotating movement of the propeller fin through sea or fresh water. This final thesis shows a review of ship screw historical development, characteristics of propulsion systems of small and medium size ships and a review of different types of materials used in the production of propellers for seagoing ships of previously mentioned sizes. The experimental part of this thesis examines the chemical composition of the material and determines the microstructure of a used, worn out propeller. The chemical composition analysis has confirmed the aluminium bronze alloyed with nickel and iron, which achieves anticorrosive features in the sea water. The hardness of the analysed propeller was tested according to standards, and high hardness values were confirmed, which gives less wear and longer life of the ships screw. The microstructural analysis showed the characteristic two-phase microstructure of the aluminium bronze alloyed with nickel and iron, with the solid primary α -phase and with κ -phase as an intermetallic compound.

Keywords: propulsion, ship propellers, aluminium bronze, nickel, iron

1. UVOD

1.1. Povijesni razvoj brodskog vijka

Primjenom mehaničkog pogona broda započeo je i razvoj brodskog vijka. Prvi brodski propulzori bili su lopatična kola koja su pojavom brodskog vijka u potpunosti istisnuta iz upotrebe.

Pokazalo se da je brodski vijak najprikladniji tip brodskog propulzora. Američki brodograditelj John Stevens smatra se zaslužnim za razvoj brodskog vijka jer ga je on prvi uspješno upotrijebio na brodu duljine 7,5m. Mada, Robert Hook je već u XVII. st. predlagao da bi se Arhimedov vijak trebao upotrijebiti za poriv brodova. Kad je riječ o praktičnoj primjeni, zasluge pripadaju Jozefu Resselu koji je eksperimentirao s kratkom spiralom kao potisnikom na krmi broda duljine 18 m. Taj pokušaj je neslavno propao jer je eksplodirala cijev za paru nakon samo par minuta probne vožnje.

Francis Pettit Smith i Jonathan Ericsson unaprijedili su brodski vijak (neovisno jedan o drugom) te je on drugom polovicom XIX. st. poprimio današnji izgled. Zanimljiv detalj je da je prilikom Smithove plovidbe s vijkom oblika dugačke spirale došlo do havarije kada se otkinuo dio spirale, što je dovelo do ubrzanja broda. Nakon te havarije, Smith je razradio malo bolju varijantu brodskog vijka.

Bennet Woodcroft izumio je vijak sa zakretnim krilima, a Ludwig Cort izumio je vijak u sapnici.

Razvoj brodskog vijka temeljio se uglavnom na empiriji, sve dok William John Macquorn Rankine i William Froude nisu sa znanstvenog aspekta opisali djelovanje brodskih vijaka. Prvi koji je potaknuo istraživanje otpora broda pomoću modela bio je Froude, koji je u te svrhe dobio dozvolu za gradnju bazena. U svojim istraživanjima došao je do zaključka da su među geometrijski sličnim formama i valne konfiguracije slične. Uspoređujući brzine, primijetio je da je drugom korijenu duljine modela proporcionalna upravo brzina.

„Preostali otpor geometrijski sličnih brodova je omjer kuba njihovih linearnih dimenzija ako su njihove brzine u omjeru drugog korijena njihovih linearnih dimenzija“. Kad je riječ o preostalom otporu, onda to podrazumijeva da se od ukupnog otpora oduzme otpor ekvivalentne ravne ploče (engl. *plank*). Plank je definiran kao „pravokutna ploča iste površine

i duljine i koja se giba istom brzinom kao i trup“[9]. Froude je prvi podijelio ukupni otpor na otpor trenja između trupa i vode te preostali otpor.

Great Britain bio je prvi brod koji je prešao Atlantik 1854., s brodskim vijkom kao propulzorom, čime su ostali oblici propulzije do danas ostali u sjeni.

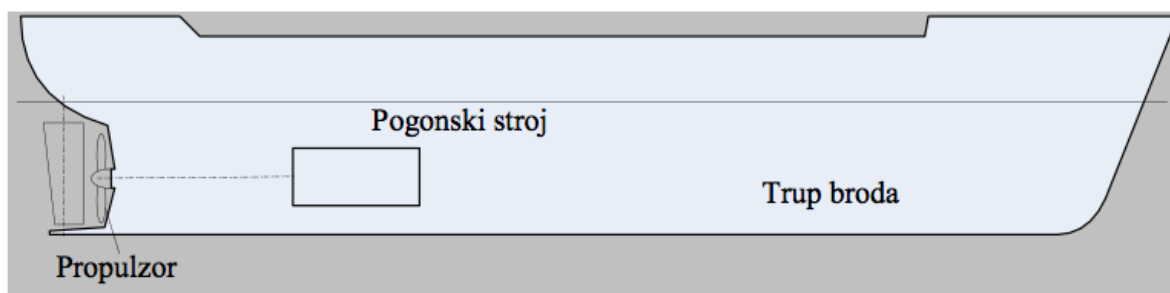
Osim računalnim metodama, danas se ispitivanja vrše modelskim ispitivanjima kakva se provode u bazenima i kavitacijskim tunelima na brodarskim institutima [1], [2], [3], [9].

1.2. Brodska propulzija

Osnovni cilj propulzije je osigurati poriv. To se odvija na način da se moment i rotacijsko gibanje pretvara u poriv i translacijsko gibanje pomoću propulzora. Naravno, u tom slučaju postoji gubitak kinetičke energije, što za posljedicu ima ubrzanje vode u struji iza vijka. Sve to dakako negativno utječe i na iskoristivost vijka [3].

Brodski vijak najrašireniji je tip brodskog propulzora, gdje se okretanjem radijalno raspoređenih krila snaga brodskog stroja pretvara u porivnu silu čime je osigurano pokretanje broda. Smješten je na podvodnom dijelu brodskog trupa, iza ili ispod krme. Brodovi najčešće imaju jedan do dva vijka, nešto rjeđe je slučaj s tri ili četiri vijka. Kod brodova koji imaju specijalnu namjenu (npr. ledolomci ili trajekti), vijak se stavlja i na pramac[1], [2].

Propulzijski sustav mora voditi računa o energiji utrošenoj na pogon broda koja mora biti što manja. Propulzijski sustav sastoji se od: brodskog trupa, propulzora i pogonskog stroja.



Slika 1. Propulzijski sustav [4]

Cilj propulzije je odabir odgovarajućeg propulzora za određenu kombinaciju trupa, pogona i prijenosa i to za određeni raspon brzina u određenim operativnim uvjetima. Jedini pravi „test“ za odabir propulzora jest probna vožnja[4].

1.3. Vrste brodskih vijaka (propulzora)

- Vijci s fiksnim korakom ili usponom (engl.Fixed pitch propeller - FPP)
- Vijci s promjenjivim korakom (engl.Controllable pitch propeller - CPP)
- Vijci u sapnici (engl. Ducted propellers)
- Pod-propulzori (engl. Thrusters-pod drives)
- Cikloidni ili Voight-Schneiderovi propeleri
- Vodomlazni propulzori

1.3.1. Vijci s fiksnim korakom ili usponom (eng. Fixed Pitch Propeller - FPP)

Ovakvi tipovi vijaka istodobno se lijevaju s glavčinom u jednom komadu. Položaj krila i uspon broskog vijaka nepromjenjivi su tijekom rada, a brojem okretaja vijka upravlja se porivom i brzinom broda. Pogodni su za one brodove gdje se ne traže posebno dobra manevarska svojstva kao što su npr. kontejnerski brodovi, tankeri, brodovi za rasuti teret itd. Kad prilikom plovidbe dođe do nevremena, vijak s fiksnim korakom ne može u potpunosti iskoristiti snagu motora. Unatoč manjkavostima, ovaj tip broskog vijka je najzastupljeniji[3], [5].



Slika 2. Brodski vijak s fiksnim krilima [5]

1.3.2. Vijci s promjenjivim korakom (eng. *Fixed Pitch Propeller - CPP*)

Kad govorimo o vijcima s promjenjivim korakom, moguće je mijenjati uspon vijka odnosno kut zakreta krila, čime je pogon ekonomičniji, a vijek trajanja pogonskog stroja dulji. Treba naglasiti da se osovina kod vijaka s promjenjivim korakom uglavnom okreće konstantnim brojem okretaja. Mehanizam za nagibanje krila (s hidrauličkim pogonom) smješten je unutar glavčine, stoga je glavčina kod CPP vijaka nešto većeg promjera od onih kod FPP vijaka. Što je veći promjer glavčine, to je manji stupanj djelovanja broskog vijka. Ugradnja ovakvih tipova vijaka pogodna je za brodove kojima je imperativ dobra upravljivost, ali i za pogone s ugrađenim osovinskim generatorom. Prekretanje je prilično spor proces kod ovakvog tipa vijaka jer se ostvaruje zakretanjem krila i to uglavnom pri konstantnom broju okretaja. Brodovi s ovakvim tipom vijaka rade u promjenjivim uvjetima, a sama opterećenja vijaka se često mijenjaju. Pogodni su za uvjete rada kao što je slobodna vožnja i tegljenje (tegljači, ribarski brodovi, ledolomci, mali tankeri za distribuciju, Ro-Robrodovi.). CPP brodski vijci su skuplji tri do četiri puta od FPP vijaka, konstrukcijski su složeniji, a i samo održavanje je skuplje.



Slika 3. Brodski vijak s promjenjivim usponom krila [5]

1.3.3. Vijci u sapnici (eng. *Ducted Propeller*)

Vijci u sapnici (poznati još i kao Kortova sapnica) posebni su oblik broskog propulzora. Koriste se kod brodova gdje su velika opterećenja i mala brzina plovidbe kako bi se poboljšala učinkovitost broskog vijka. Također, koriste se i kod brodova koji imaju ograničen gaz pa su samim time i vijci manjeg promjera negoli je to uobičajeno (npr. kod

tegljača i riječnih brodova). To su visoko opterećeni vijci, a sapnica je ta koja povećava iskoristivost vijka. Zanimljivo je da se sapnica sužava prema krmi te na taj način ubrzava vodu koja dostrujava vijku. Sapnice također mogu biti nesimetrične ili se mogu ugrađivati prije vijka, a sve to u cilju da dostrujavanje brodskom vijku bude što jednoličnije. Sapnica može služiti i kao kormilo ako se izvede na način da se može okretati oko vertikalne osi.



Slika 4. Vijak u sapnici [6]

1.3.4. *POD sustavi propulzije (eng. Thrusters - pod drives)*

POD propulzori su brodski vijci koji su smješteni u kućištu (gondoli) ispod broda, a pogonjeni su elektromotorom. Mogu se okretati oko svoje osi i na taj način mijenjati smjer poriva. Ukoliko je vijak okrenut tako da se nalazi ispred skroka, to se naziva povlačenjem (engl. *pulling*), a ako se nalazi iza, to se naziva guranjem (engl. *pushing*). Zbog svojih dobrih upravljačkih svojstava i visokih performansi u zahtjevnim uvjetima, ugrađuju se na luksuzne putničke brodove i na tankere koji plove kroz led. Skuplji su od ostalih tipova propulzora zbog svoje kompleksne izvedbe. Vijci im mogu biti smješteni u sapnicama ili pak mogu imati

kontrarotirajuće vijke. Glavčina im je znatno veća nego kod vijaka s fiksnim korakom, stoga im je iskoristivost smanjena. Moguće je postići uštedu energije i do 20 % u ovisnosti o vrsti broda i izvedbi POD propulzora te imaju duži radni vijek. Time se štedi energija potrebna za recikliranje kao i izbjegavanje zagađenja do kojih dolazi kao posljedica recikliranja i izgradnje novih brodova. Ekološki su prihvatljivi te je smanjena emisija CO₂. Potreba za podmazivanjem je minimalna, a mogu se koristiti i biorazgradiva maziva. Općenito gledano, pouzdano su rješenje. Njihovom primjenom smanjena je mogućnost nastanka kavitacije i vibracija, posebno ako je riječ o povlačenju jer je u tom slučaju dostrujavanje jednoličnije. Kod suvremenog električnog pogona primjenjuju se permanentni magneti umjesto elektromagneta, što pridonosi smanjenju dimenzija rotora. Obzirom da ne postoji uzbuda, povećava se stupanj korisnosti elektromotora, disipacijska energija se smanjuje, što pridonosi pojednostavljenju hlađenja. Nadalje, smanjenjem mase, smanjuje se i cijena uređaja. Na sustav jedne sabirnice priključeni su svi proizvođači i potrošači električne energije. Sam prijenos električne snage od sabirnice do gondole elektromotora omogućuje se uglavnom sustavom kliznih prstenova. Neke od važnijih prednosti POD propulzora su povećanje sigurnosti broda te produljenje eksploatacijskog vijeka broda. Buka i vibracije se kod električne propulzije smanjuju korištenjem plinskih turbina, manjih srednjohodnih ili brzohodnih dizelskih motora te povoljnijim smještajem dizelskog motora. Nadalje, reduktor je eliminiran, torzijske vibracije su smanjene, dugački osovinski vodovi su eliminirani, razmak između trupa i oboda vijka je povećan.

Kako bi se izbjegli ekološki incidenti i istjecanje tereta u more, stupanj sigurnosti treba biti visok. To se postiže boljim manevarskim svojstvima, smanjenjem opasnosti od požara te visokim stupnjem raspoloživosti pogona broda. U velikom broju havarija tankera, glavni uzrok nesreće bio je gubitak pogona. Kod brodova s električnom propulzijom i dva brodska vijka vjerojatnost potpunog gubitka pogona je smanjena. Sigurnijem manevriranju u blizini obale, izbjegavanju sudara i nasukavanja pridonosi propulzija s podtrupnim potisnicima. Zahvaljujući sustavu dinamičkog pozicioniranja također se može izbjeći sidrenje u područjima u kojima obitavaju zaštićene vrste. Postoji nekoliko vrsta pod propulzije, od kojih je najčešća Azipod propulzija [3], [7], [10].

1.3.4.1. Azipod (eng. Azimuthing Podded Drive – gondolski propulzor) sustav propulzije

Razvijeni su u Finskoj u suradnji Kvaerner MASA brodogradilišta i ABB grupe. Azipod pogonski sustav prvi put je ugrađen 1993. na tanker „Uiku“ , a potom i na putnički brod „Elation“ 1998. godine. Ovakvi tipovi propulzora smješteni su izvan broskog trupa, za razliku od klasičnih koji se nalaze unutar broda. Njihove manevarske sposobnosti su izvanredne, a upotreba pramčanih propulzora više nije potrebna. Propulzijski motori su sinkroni i asinkroni električni motori, a kod SSP azimutalnih pogona u svrhu poboljšanja hidro-dinamičkih svojstava broda primjenjuje se permanentno uzbuđeni sinkroni motor, znatno manjih dimenzija i težine negoli standardni sinkroni. Elektromotor je kratkom osovinom povezan s brodskim vijkom, čime se smanjuju vibracije, a kao rashladni medij služi okolno more, čime se smanjuje cijena sustava. Primjenjuje se za snagu motora do 25 MW i brzinu vrtnje do 200 okr./min. Ovakav tip propulzora između ostalog ugrađuje se i na LNG tankere u okviru Yamal projekta, koji su predviđeni za plovidbu kroz led do dubine 2 m. Glavne prednosti su mu je što je jednostavniji od ostalih propulzijskih sustava, ima bolje dinamičko-hidrauličke sposobnosti, poboljšane manevarske sposobnosti, ekološkiji su od drugih propulzora, manja je potrošnja energije, te su smanjene buka i vibracije. Ima i pokoji nedostatak, kao što su visoka cijena, skloni su kvarovima, zbog većih dimenzija glavčine imaju smanjenu iskoristivost, zatim treba jako voditi računa o konstrukciji trupa broda. Ako dođe do većeg kvara na propulzoru, kako bi se izvršio servis, potrebno je brod izvući na kopno, što značajno povećava troškove[10].



Slika 5. Azipod sustav propulzije [7]

1.3.4.2. Dolphin sustav propulzije

Dolphin sustav propulzije gondolski je propulzor nastao u suradnji tvrtke JohnCrain-Lips (u sklopu WärtsiläPropulsion) i SAM Electronics. Do oblika gondole kakav ima ovaj propulzijski sustav došlo se brojnim pokusima. Inače, taj oblik ima dobra propulzijska i manevarska svojstva. Poznato je da je električna oprema kod Dolphin propulzijskih sustava suvremena te ima jedan vučni vijak bez sapnice. Jedini poznati brod opremljen ovim tipom propulzora je brod za krstarenja „Seven Seas Voyager“ [10].



Slika 6. Dolphin gondolski propulzor [10]

1.3.4.3. Mermaid sustav propulzije

Švedska tvrtka KaMeWa zajedno s francuskom tvrtkom Alstom proizvela je Mermaidpropulzor (Slika 7.).

Mermaid propulzijski sustav ima dobra manevarska svojstva, smanjena je razina buke i vibracija, manje su štetni za atmosferu. Može postići brzinu i do 30 čvorova, a također je moguće smanjiti otpor i do 10 % te povećati stupanj iskoristivosti do 15 %. Optimizirano je korištenje prostora broda, smanjeno je vrijeme ugradnje i povećana je pouzdanost. Neke inačice Mermaida omogućuju podvodnu montažu i demontažu uređaja [10].



Slika 7. Mermaid gondolski propulzor [10]

1.3.4.4. Schottel - Siemens sustav propulzije

Njemačka tvrtka Schottel proizvela je dva tipa gondolskih propulzora:

-Schottel Electric Propulsor (SEP)

-Schottel Siemens Propulsor (SSP) - ovaj tip propulzora razvili su u suradnji s tvrtkom Siemens.

SEP (slika 8.) klasični je električni propulzor s elektromagnetskim statorom, relativno velike mase i dimenzija, manjeg stupnja djelovanja gdje je moguće proizvesti snage do 5 MW.



Slika 8. Schottel gondolski propulzor (SEP) [10]

SSP (slika 9.) razvijen je u suradnji tvrtki Schottel i Siemens. Sastoji se od upravljačke podvodne jedinice, magnetska uzbuda je trajna. U ovom slučaju zahtijeva se korištenje dvostrukih propulzora zbog povećanja učinkovitosti te kako bi se ujedno smanjilo opterećenje svakog propulzora pojedinačno. Rotor je nosilac trajnog magneta, dok je stator nosilac polja koje se napaja iz sustava za moduliranje širine impulsa u trupu. Nema potrebe za unutarnjim sustavom hlađenja jer se toplina proizvedena u motoru odvodi u okolnu vodu. Kod ovih tipova propulzora snage koje se mogu razviti su od 5 do 20 MW. Prema najnovijim informacijama, tvrtka Schottel će odsada i u manji gondolski propulzor SEP ugrađivati PME (PME-trajna magnetska uzbuda) elektromotore. Prospero na slici 9. bio je prvi brod opremljen SSP-om[10], [11].



Slika 9. Schottel - Siemens propulzor (SSP) [11]

1.3.5. Cikloidni ili Voight-Schneiderov vijak

Voight-Schneider-ovi porivni uređaji poznati i su i kao cikloidni pogoni (pogon s vertikalnom osovinom) te imaju dobru upravljivost, imaju visoku učinkovitost zbog smanjenja otpora (omjer dužine i tetiva lopatica Voight-Schneider-ova porivnog uređaja povećan je za 11 %) tesu trajni. Obzirom da se njima upravlja sa zapovjedničkog mosta, nema potrebe za

ugradnjom kormila, osovinskog voda, statvene cijevi s brtvenicom. Skupi su i kompliciranije su izvedbe, a ugrađuju se na manje plovne objekte kao što su tegljači, plovne dizalice, trajekti, ratni brodovi (uglavnom minolovci), protupožarni brodovi, dakle kod plovila kod kojih je potrebno trenutno promijeniti smjer potiska. Najzanimljiviji je zbog činjenice da je kod ovog sustava integriran poriv i kormilarenje, a pogodan je za ugradnju na brodove s malim gazom.

Prvotno, to je bio projekt vezan za hidro-električne turbine, nastao u suradnji austrijskog izumitelja Schneidera i tvrtke Voight. Utvrđeno je da ova turbina nije radila ništa bolje negoli druge turbine, ali je radila dobro kao sisaljka. S tim u vezi, promjenom orijentacije vertikalnih lopatica odlično je funkcionirao kao propulzor. Vijak s vertikalnom osi nema glavčinu, ali ima valjak i na njega su na donjoj vodoravnoj površini pričvršćene lopatice. Lopatice su postavljene okomito na donju površinu bubnja, a svaka lopatica se polužnim sustavom može zakretati oko svoje vertikalne osi. Promjena poriva ostvaruje se zakretanjem vertikalnih lopatica oko vertikalne osi svake lopatice. Time se dobiva porivna sila čiji smjer se može mijenjati za svaki kut, u krugu od 360°. Sve to pridonosi učinkovitijem, bržem i sigurnijem manevriranju, čak i pri velikim brzinama vjetra. Tako se npr. s dvije Voight-Schneiderove porivne jedinice brod može okretati u mjestu i sve to bez kormila. Sustav Voight-Schneiderova porivnog uređaja složen je te se ne ugrađuje na brodove duge plovidbe, već na brodove koji plovo u zaštićenim vodama, lukama i jezerima. Važno za napomenuti je i da trup broda na mjestu ugradnje mora biti ravan.

Norveško ministarstvo prometa naručilo je opsežne studije vezano za određivanje optimalne propulzije za izradu brodova za svoje trajektne linije. Za tu namjenu, utvrđeno je da Voight-Schneider - ov porivni uređaj ima najučinkovitiju i najekonomičniju propulziju. Ti trajekti opremljeni su dvama porivnim uređajima, po jednim sa svake strane broda. Svaki taj porivni uređaj pogonjen je dvama dizelskim motorima preko remenskog pogona ili pak elektromotorom izmjenične struje. Kod Voight - Schniderove porivne jedinice prijenos može biti jednostupanjski ili dvostupanjski. Reduktor treba biti zaštićen od naprezanja te od udaraca pri upućivanju, posebno kad je riječ o dizelskom motoru. U tu svrhu obavezno se ugrađuje elastična spojka.

Prednost norveškog trajekta je u njegovoj pokretljivosti i relativno jednostavnoj propulziji, ima dva porivna uređaja, po jedan sa svake strane broda. Svaki Voight - Schneiderov porivni uređaj pogoni se dvama dizelskim motorima i to preko remenskog pogona. Između dva dizelska motora i remenskog pogona nalazi se hidrodinamička spojka. Ona reducira male

razlike u brzini i omogućuje da se propulzor pogoni samo jednim motorom. Dakle, kad je riječ o malim opterećenjima, brodski pogon je ostvariv s jednim motorom u radu i to s jednim Voight-Schneiderovim porivnim uređajem. Time je dizelskom motoru omogućen konstantan rad pri optimalnoj brzini vrtnje i snazi. Voight - Schneiderov porivni uređaj ima promjenljiv uspon lopatica, a samim time i propulziju i to u svim smjerovima, za razliku od vijčanih propelera koji ima točno određen smjer uspona vijka. Ovaj uređaj je prema izračunima vrlo ekonomičan za trajekte jer donosi uštedu goriva i do 12% u usporedbi s trajektima koji imaju različito upravljane propulzijske sustave na sličnim trajektnim linijama.

Činjenica jest da je ovim uređajem bitno smanjena potrošnja goriva te da uređaj ima i porivne i kormilarske sposobnosti, održavanje je jednostavno, manevriranje brodom je jednostavno, a rad pogonskog stroja je jednoličan. Sve to su faktori koji bi trebali utjecati na njegov izbor, posebno kad je trajektni promet u pitanju[10], [11].



Slika 10. Prikaz krme Voight - Schneiderovog propulzijskog sustava [11]

1.3.6. Vodomlazni propulzor

Vodomlazni propulzor nalazi se unutar broda i ubrzava vodu koristeći pumpu, za razliku od klasičnih brodskih vijaka koji se nalaze izvan broda. Poriv se osigurava na način da se voda usisava na dnu broda, ubrzava u pumpi i potom izbacuje na krmi. Propulzor je zaštićen od oštećenja kao preventivna mjera tako što se ne nalazi izvan broda kako ne bi došlo do oštećenja prilikom plovidbe kroz plitka područja za koja je i namijenjen u prvom redu. Iz

istog razloga ugrađuje se i na plovne objekte kao što su vodeni skuteri. Prednost ovih propulzora je dobra upravljivost. Međutim, nedostatak su im veliki gubitci uzrokovani velikom unutarnjom

površinom pumpe i velikim brzinama. U usporedbi s otvorenim vijcima, vodomlazni propulzori imaju manji stupanj djelovanja. Vodomlazni propulzor ugrađuje se na poludeplasmanske brodove (>30 čv.) istisnine veće od 100 tona, a ukupna iskoristivost propulzije veća je negoli ona za konvencionalni otvoreni vijak. Brodovi s vodomlaznim propulzorom stvaraju visoke razilazne (divergentne) valove i to od 15 do 20 % više od onih koje stvaraju brodovi s otvorenim konvencionalnim vijkom [10].

Prednosti vodomlaznog propulzora u odnosu na brodski vijak:

- mlaz vode preuzima ulogu kormila
- otpor trupa je manji jer je i gaz manji
- ovisno o brzini broda, prilikom ubrzanja napadni kut lopatice broskog vijka se mijenja. Kod vodomlazne propulzije zakretni moment je manji jer napadni kut malo varira prilikom akceleracije, a odziv primarnog stroja je bolji
- ovaj propulzor odlikuju dobre manevarske sposobnosti koje se očituju pri svim brzinama broda
- mogu se precizno kontrolirati od nule do pune brzine te naprijed ili nazad.



Slika 11. Vodomlazni propulzor [8]

1.3.7. *Pramčani i krmeni potisnici*

Pramčani potisnici su tip propulzora koji pomažu boljem manevriranju brodova pri nižim brzinama, kao što je to npr. slučaj prilikom ulaska ili izlaska iz luke. Time se štedi novac na angažiranje tegljača, ali također utječe i na smanjenje boravka brodova u lukama. Od velike su pomoći kad je u pitanju uplovljavanje ili isplovljavanje broda, posebno prilikom nevremena ili jakog vjetra. Smješteni su unutar tunela i to na krmu ili na pramcu, a broj potisnika ovisi o duljini broda. Potisnik usisava vodu s jedne strane i izbacuje je na drugu stranu, te se na taj način brod okreće u suprotnom smjeru. Sve to može se odvijati u oba smjera. Pramčani i krmeni potisnici mogu biti električno pogonjeni, hidraulički upravljani ili dizelski pogonjeni. Najčešće su električno pogonjeni jer kod hidrauličkih pogona postoje svojevrsni propusti, a dizelski su zahtjevni za održavanje. Međutim, postoje i nedostaci vezani za potisnike, a to su potreba za velikim indukcijskim motorom koji zahtijeva puno struje i opterećenja, što uvjetuje i veliki kapacitet generatora. Nadalje, početna investicija je visoka kao i popravci kad do njih dođe.

Održavanje pramčanog potisnika:

- potrebno je redovito provjeravati izolaciju te osigurati da ona ostane suha
- potrebno je redovito podmazivati ležajeve motora
- hidrauličko ulje treba provjeravati svaki mjesec.[12]



Slika 12. Potisnik [8]

1.3.8. Uporaba električne propulzije

Uvođenje električne propulzije sve više je prisutno kad govorimo o brodskim novogradnjama. U prvom redu riječ je uglavnom o dizel-električnim i turbinsko-električnim pogonima kako na putničkim brodovima, tako i na trgovačkim i specijalnim brodovima. Uvođenje dizel-električnih pogona ima dva nedostatka, a to su manja korisnost i veća početna ulaganja po pitanju financija u usporedbi sa standardnom mehaničkom propulzijom koja imaju sve manju važnost. Manja korisnost koja se ogleda sam po pitanju mehaničke snage potrebne za pokretanje broskog vijka moguće je anulirati boljom iskoristivošću električne energije za propulziju. Nadalje, ugradnjom serijski proizvedene električne opreme visoke kvalitete izrade smanjuje i početna financijska ulaganja. Glavna prednost dizel-električnog pogona je što se na taj način postiže optimalna operativna fleksibilnost u brodskim elektromotornom pogonu. Primjenom većeg broja identičnih strojeva moguće je osigurati energiju velikom broju trošila na brodu. Kod dizel-električne propulzije moguće je postavljanje dizelskih motora tamo gdje su oni najdjelotvorniji. Dakle, gdje nisu ograničeni dužinom osovine broskog vijka jer se napajanje, upravljanje i regulacija brzine vrtnje pogonskog elektromotora ostvaruje električnim prijenosom. Moguće je na suvremenim brodovima dizelske sinkrone generatore ugrađivati u brodsku strojarnicu na jednome, a pogonske elektromotore na drugom mjestu. Diesel-električni pogoni imaju prednost u odnosu prema klasičnim dizel-mehaničkim pogonima jer je moguće kontinuirano mijenjati brzinu vrtnje broskog vijka u rasponu od 0 do 100 %. Prema nekim istraživanjima obzirom na sigurnost i zalihost, odnosno manevriranje i rad s jednim dizelskim motorom nešto bolja svojstva ima brodski vijak s promjenljivim krilima (prekretni brodski vijak) ima bolja svojstva, dok je onaj s fiksnim krilima (fiksni brodski vijak) nešto jeftiniji za održavanje na godišnjoj razini.

Prednosti električne propulzije:

- smještaj glavnih strojeva i generatora nije uvjetovan položajem osovinskog voda već se može prilagoditi tipu broda
- jedna propelerska osovina može se pokretati energijom više agregata
- električni strojevi su puno manjih dimenzija negoli glavni pogonski stroj i stoga je puno bolja iskorištenost strojarnice kad je prostor u pitanju
- električna energija koju proizvode generatori za propulziju koristi se za napajanje i drugih električnih trošila na brodu

- mogućnost odabira najpovoljnije brzine vrtnje propulzora i pogonskog stroja jer između njih nema mehaničkog spoja
- brzina vrtnje propulzora regulira se u širem području rada
- prekretanje propulzora vrši se bez promjene smjera vrtnje glavnih pogonskih strojeva
- udarci i vibracije s propulzora ne prenose se na glavni pogonski stroj
- bolje su manevarske sposobnosti broda, brzo se mijenja režim rada postrojenja i to daljinskim upravljanjem
- pri manjim brzinama broda mogu se isključiti pojedini agregati kad je potrebna manja snaga.

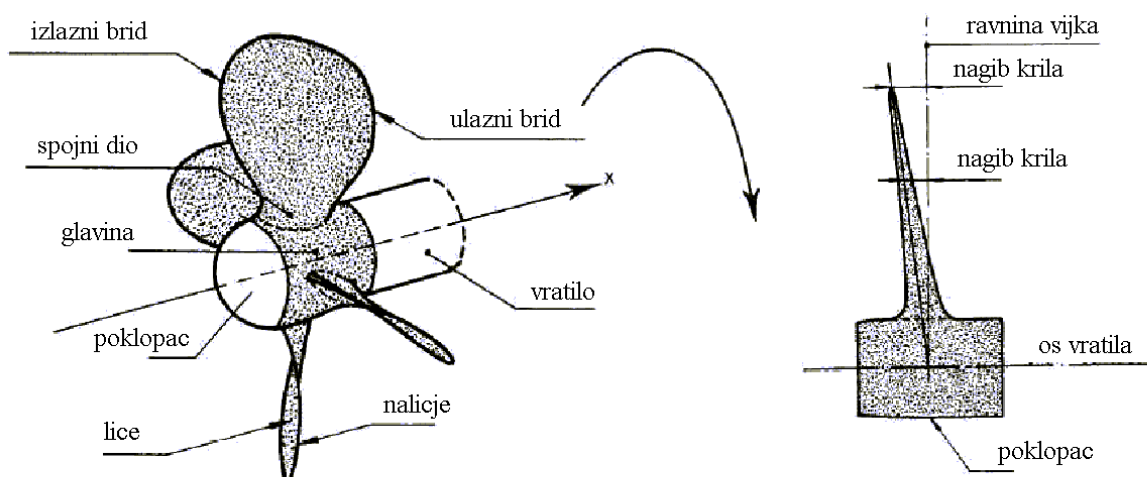
Nedostatci električne propulzije:

- u usporedbi s drugim sustavima propulzije viša je cijena
 - korisnost je niža zbog dvostruke pretvorbe energije
 - potreban veći broj visokoobrazovanih ljudi za nadzor i rukovanje postrojenjem.
- [10], [13]

1.4. Geometrija broskog vijka

Krila vijka pričvršćena su za glavinu vijka, dok je glavina pričvršćena na završetku vratila vijka. Vijak se okreće oko osi x , ona prolazi kroz središte vratila vijka. Smjer okretanja definira se prema pozitivnom smjeru osi x promatrajući vijak s krme.

Poklopac koji zatvara glavinu mora biti prilagođen uvjetima plovidbe. Tako postoje poklopci u obliku torpeda, čime se nastoji postići opstrujavanje vode iza vijka kako bi se poništilo negativne vrtloge koji su preostali iza vijka. Postoje i poklopci s dodatnim krilcima kojima se nastoji povećati moment zakreta vijka te se iskorištava dio energije rotacije preostale u struji iza vijka.

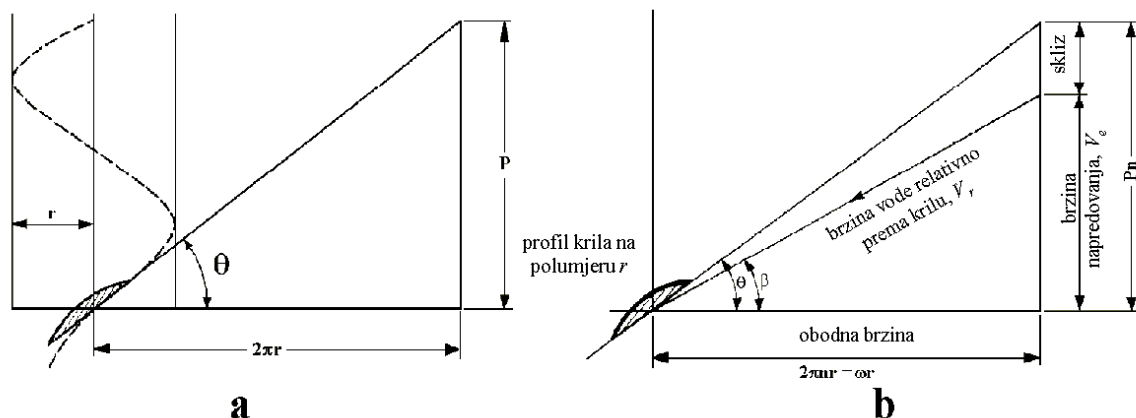


Slika 13. Dijelovi vijka (desnokretni brodski vijak s četiri krila) [3]

Dio kojim krilo siječe vodu naziva se ulazni brid (engl. *Leading edge* ili *nose*), a brid na stražnjoj strani naziva se izlaznim bridom (engl. *trailing edge* or *tail*). Ulazni i izlazni brid sastaju se na vrhu krila. Polumjer vrha krila jest polumjer vijka, r (engl. *radius*), dok je promjer dvostruko veća vrijednost.

Površina krila na strani osovine vijka naziva se naličjem (engl. *back*), a površina vijka vidljiva s krme naziva se licem (engl. *face*). Prilikom kretanja broda voda mu dostrujava na naličje. Pri tome je srednji tlak na naličju niži, dok je srednji tlak na licu krila viši. Kao zaključak se nameće da poriv nastaje zbog razlike u tlakovima na licu i naličju. Lice se naziva još i tlačnom stranom (engl. *pressure side*) te je ta strana uvijek ravnija od naličja, a naličje se naziva usisnom stranom (engl. *suction side*).

1.4.1. Definicija koraka i skliza broskog vijka



Slika 14. Definicija koraka i skliza vijka [3]

Uspón ili korak vijka (engl. *propeller pitch*), P , jest aksijalni pomak točke na vijku pri jednom okretaju $2\pi r$. Korak vijka u matici lakše je razumjeti. Ako je matica nepomična, za trajanja okretaja u smjeru kazaljke na satu glava vijka približiti će se matici, a cijeli vijak pomaknuti će se aksijalno. Porivni vijak nalazi se u vodi te nema maticu, ali se može uzeti da je voda matica u kojoj se vijak skliže. Kad bi se vijak vrtio u plutu kao otvarač boca za vino, njegov korak bi stvarno bio jednak aksijalnom pomaku u plutu. Obzirom da se vijak nalazi u vodi, njegov stvarni pomak načelno nikad nije jednak njegovom koraku, što je vidljivo na slici 14. b). Omjer uspona (engl. *pitchratio*) definira se kao omjer koraka vijka i njegovog promjera P/D .

Kut uspona (engl. *pitchangle*), $\theta = \arctan\left(\frac{P}{2\pi r}\right)$ kut je između linije koraka i okomice na osovinu vijka.

Dakle, skliz je razlika između teorijske brzine $P \cdot n$ i stvarne brzine napredovanja V_e . Koeficijent skliza (engl. *real slip ratio*) izražava se jednadžbom:

$$s = \frac{P \cdot n - V_e}{P \cdot n} = 1 - \frac{V_e}{P \cdot n} \quad (1)$$

Značajan polumjer porivnog vijka obično iznosi $\frac{r}{R} = 0,7$. U području na udaljenosti od oko $0,7 \cdot R$ od osi vijka vlada tlak jednak srednjem tlaku diska vijka. Činjenica jest da je polovica ukupne površine diska vijka unutar područja $0,7 \cdot R$. Stoga, korak vijka obično se daje za tu vrijednost polumjera, dakle $r = 0,7 \cdot R$.

Stvarni koeficijentskliza izražava se sljedećom jednadžbom:

$$s = \frac{P \cdot n - V_e}{P \cdot n} = 1 - \frac{V_e}{P \cdot n} \quad (2)$$

Za određivanje stvarnog koeficijentskliza treba poznavati koeficijentsustrujavanja. Obzirom da je u pomorskoj praksi teško odrediti koeficijent sustrujavanja, određuje se prividni koeficijent skliza (engl. *apparent slip ratio*) prema jednadžbi:

$$s_A = \frac{P \cdot n - V_S}{P \cdot n} = 1 - \frac{V_S}{P \cdot n} \quad (3)$$

Prividni koeficijentskliza jednostavno se određuje i on daje značajne informacije o brodu. Međutim, samo stvarni skliz vijka opisuje stvarno stanje njegovog otpora i propulzije[3],

1.5. Iskoristivost propulzije

Iskoristivost je faktor koji najviše utječe na izbor tipa propulzije. Sve to rezultira većom ili manjom potrošnjom goriva kao jednim od najvećih troškova broda prilikom plovidbe. Propulzor i glavni porivni stroj odabiru se prema kriterijima iskoristivosti i cijene ulaganja u postrojenje. Tip propulzije ovisi i o namjeni broda, odnosno upravljivosti. Međutim, treba voditi računa i o njegovoj iskoristivosti. Inače, za propulzor kod većine brodova izabran je vijak s fiksnim krilima.

Kad govorimo o protusmjerno rotirajućim vijcima, oni za manje snage poriva imaju najveću iskoristivost. Zbog kompleksnosti osovinskog voda i položaja osovina, njihova cijena je veća od vijaka s fiksnim krilima.

Ukupna iskoristivost određuje se kao omjer korisne energije odnosno snage dobivene radom sustava te snage dovedene tom istom sustavu. Koeficijent ukupne iskoristivosti propulzije izražava se sljedećom jednadžbom:

$$\eta_D = \frac{R_T \cdot V_S}{Q \cdot 2 \cdot \Pi \cdot n} \quad (4)$$

Koeficijent ukupne iskoristivosti propulzije može se razvrstati na koeficijente iskoristivosti vijka bez trupa i samog trupa bez porivnog vijka. Time se olakšava proračun vijka te se olakšava razumijevanje problematike. Do ostalih koeficijenata iskoristivosti dolazi se sljedećim izrazom:

$$\eta_D = \eta_O \cdot \eta_H \cdot \eta_R \quad (5)$$

gdje je:

- η_D – koeficijent ukupne iskoristivosti propulzije (engl. *propulsiveefficiency*) – kvazi-propulzivni koeficijent
- η_O – koeficijent iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji (engl. *openwaterefficiency*)
- η_H – koeficijent utjecaja trupa (engl. *hullefficiency*)
- η_R – koeficijentprijelaza (engl. *relativerotativeefficiency*)

Koeficijent ukupne iskoristivosti uzima u obzir i mehanički stupanj djelovanja osovinskog voda pa vrijedi:

$$\eta = \eta_O \cdot \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_S = \eta_D \cdot \eta_S \quad (6)$$

gdje je:

- η_S – stupanj djelovanja osovinskog voda (engl. *shaftefficiency*) [3]

1.5.1. Koeficijent iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji

Koeficijent iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji može se najlakše objasniti kao odnos poriva vijka T pri brzini njegovog napredovanja V_e u odnosu na moment Q_0 pri brzini njegove vrtnje ω .

Pri tome vrijedi izraz:

$$\eta_0 = \frac{T \cdot V_e}{Q_0 \cdot \omega} \quad (7)$$

Kako bi se pojednostavnio postupak, pomoću dijagrama u slobodnoj vožnji može se na jednostavan način odrediti koeficijent iskoristivosti vijka. Radi praktičnosti potrebno je prethodnu jednadžbu preoblikovati[3]:

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2 \cdot \pi} \quad (8)$$

1.5.2. Koeficijent prijelaza

Vijak je postavljen uglavnom po krmi broda. Kako bi se postigla jednaka brzina napredovanja V_e (srednje brzine dostrujavanja vode vijku), potreban je nešto veći moment Q . Stoga je koeficijent iskoristivosti vijka po krmi broda manji od istog u slobodnoj vožnji:

$$\eta_B = \frac{t \cdot V_e}{Q \cdot 2 \cdot \pi \cdot n} \quad (9)$$

Iskoristivost relativne rotacije vijka dobije se iz odnosa koeficijenta iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji i koeficijenta prijelaza:

$$\eta_R = \frac{\eta_B}{\eta_0} = \frac{Q_0}{Q} \quad (10)$$

Relativna rotacija jest omjer momenata potrebnih za pokretanje vijka u slobodnoj vožnji i po krmi broda. [3]

1.5.3. Koeficijent utjecaja trupa

Koeficijent iskoristivosti trupa omjer je snage potrebne za savladavanje ukupnog otpora broda R_T koji se kreće brzinom V_S te potrebne snage za poriv vijka koji napreduje brzinom V_e . Iskoristivost trupa je naime omjer efektivne snage P_E (snage otpora) i snage poriva P_T . Uvršteno u sljedeću jednadžbu[3]:

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T \cdot V_S}{T \cdot V_e} \quad (11)$$

1.6. Kavitacija

Kavitacija je proces razgrađivanja sloja tekućine u blizini plohe krutog tijela. U područjima nehomogenog polja brzina tlak se snizi na vrijednost prilikom koje dolazi do isparavanja tekućine. Razgrađena tekućina ispunjena je parama tekućine (vode) te plinovima otopljenim u tekućini. Mjehurić se giba kroz nejednoliko polje brzina odnosno tlakova uzduž plohe vijka da bi naposljetku došao u područje višeg tlaka te nestao (implodirao). Kad govorimo o imploziji, nju prati veliko ubrzanje čestica vode koje udaraju u plohu tijela.

Najveća opasnost od kavitacije prijeti visoko opterećenim vijcima, odnosno onima koji daju veliki poriv. Ako su na krmi broda ugrađena dva ili više vijaka, mogućnost kavitacije načelno je manja negoli kad je prisutan samo jedan vijak. Iznad određenog broja okretaja nastupa razgradnja tekućine i gubitak poriva te tako dolazi do kavitacije. Za detektiranje kavitacije kao takve treba uzeti u obzir nemogućnost postizanja zadane brzine broda kao i buku, šum, vibracije te eroziju vijčanih krila, skrokova, kormila.

Nekoć su se problemi kavitacije odnosili samo na brodove velike brzine, te na jednovijčane brodove s velikom snagom propulzije. Kad govorimo o kavitaciji, potrebno je uzeti u obzir udaljenost površine vijka od trupa, zatim preopterećenje vijka u uvjetima plovidbe po uzburkanom moru te povećano obraštanje trupa.

Da bismo odredili kavitacijski broj, potrebno je odrediti stanje tekućine kod kojeg kavitacija nastaje. Kad je lokalni tlak na vijku jednak tlaku isparavanja, dolazi do kavitacije. Lokalni tlak izražava se bezdimenzionalnim koeficijentom:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (12)$$

gdje je:

σ – kavitacijski broj ili bezdimenzionalni koeficijent kavitacije

p – tlak na mjestu osovine vijka $p = p_0 + \rho g h_s$

p_v – tlak isparavanja (ovisi o temperaturi vode)

ρ – gustoća vode

h_s – visina stupca vode do središta osovine vijka

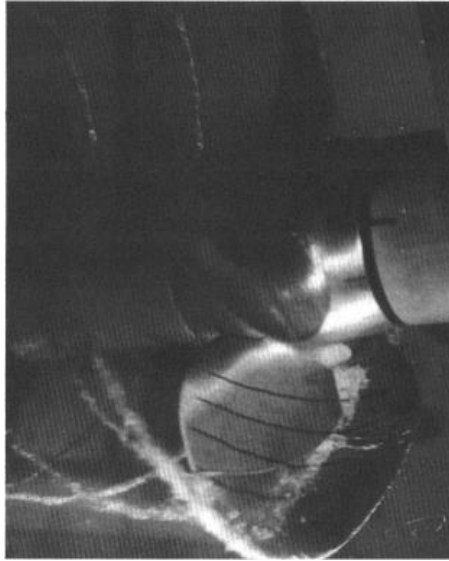
V – brzina strujanja vode

Kavitacijski broj određuje vrijednost tlaka u kavitacijskom tunelu, bezdimenzionalan je kako bi se lakše moglo uspoređivati i primjenjivati rezultate modela na stvarni brod. [3]

1.6.1. Tipovi kavitacije

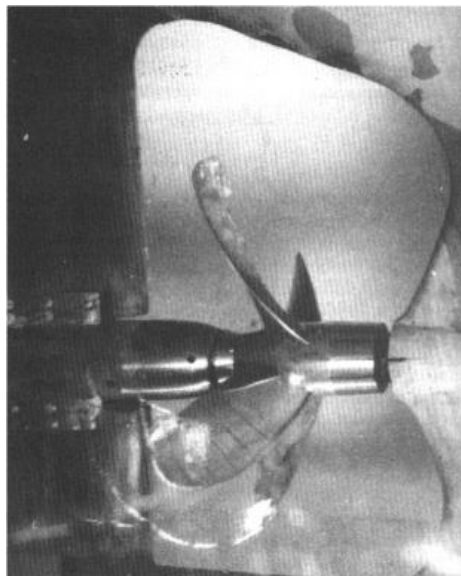
Osnovni oblici kavitacije:

- slojastakavitacija (engl. *sheetcavitation*) nastaje na usisnoj strani odnosno naličju krila gdje su pozitivni upadni kutovi dostrujavanja kao i na tlačnoj strani, odnosno na licu, a dijelovi krila su s pod negativnim upadnim kutovima dostrujavanja. Kavitacija može napredovati do te mjere da sloj mjehurića prekrije cijelu usisnu stranu od krila pa sve do glavine. Ovaj tip kavitacije uglavnom je stabilan i ne izaziva eroziju krila.



Slika 15. Stabilna slojasta kavitacija [3]

- mjehurićasta kavitacija (engl. *bubblecavitation*) javlja se na mjestu najveće debljine odsječka, najčešće na sredini krila uz umjerene upadne kutove. Implodiranje mjehurića može izazvati eroziju krila.



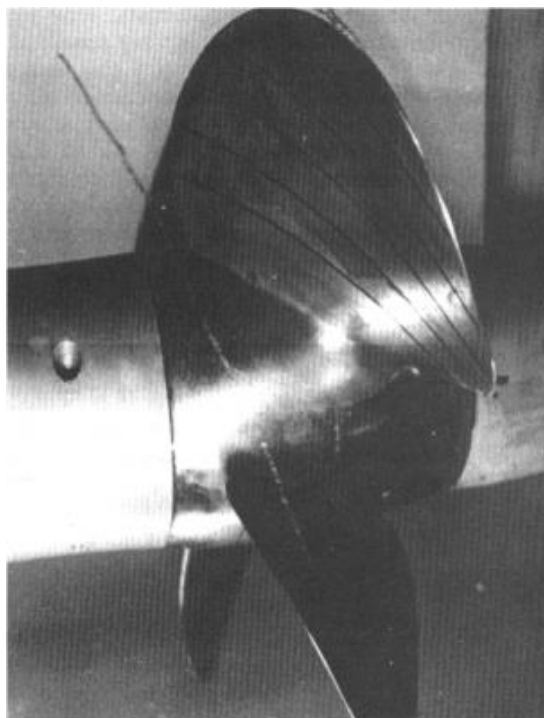
Slika 16. Mjehurićasta kavitacija [3]

- magličasta kavitacija (engl. *cloud cavitation*) zna se javiti iza mjesta gdje se pojavi slojasta ili mjehurićastakavitacija, stvori se vrtložno strujanje gdje više malih vrtloga stvara jezgre koje su ispunjene mjehurićima pare. Ovo je najopasniji oblik kavitacije.



Slika 17. Magličasta kavitacija iz slojastekavitacije [3]

- vrtložna kavitacija na glavini ili na vrhu krila (engl. *hubvortex*, tip *vortex*)
Javlja se na glavini ili pak na vrhu krila, uglavnom negdje iza vrhova vijčanih krila. Strujanje oko vrhova krila koje s tlačne strane na usisnu stranu stvara nestabilan vrtlog pomičući se s vrha krila odnosno glavine u struji kao što je to slučaj vrtloga u struji na vrhu krila zrakoplova. Kavitacija se javlja unutar jezgre vrtloga jer je najniži tlak u sredini vrtloga. Ovaj oblik kavitacije u početnoj fazi nije u dodiru s krilom, ali jačanjem vrtloga ili snižavanjem tlaka fluida kavitacija na vrhu krila dolazi u dodir s površinom krila. [3]



Slika 18. Vrtložna kavitacija na vrhu krila [3]

1.6.2. Oštećenja koja nastaju uslijed djelovanja kavitacije i njihova prevencija

1.6.2.1. Erozija

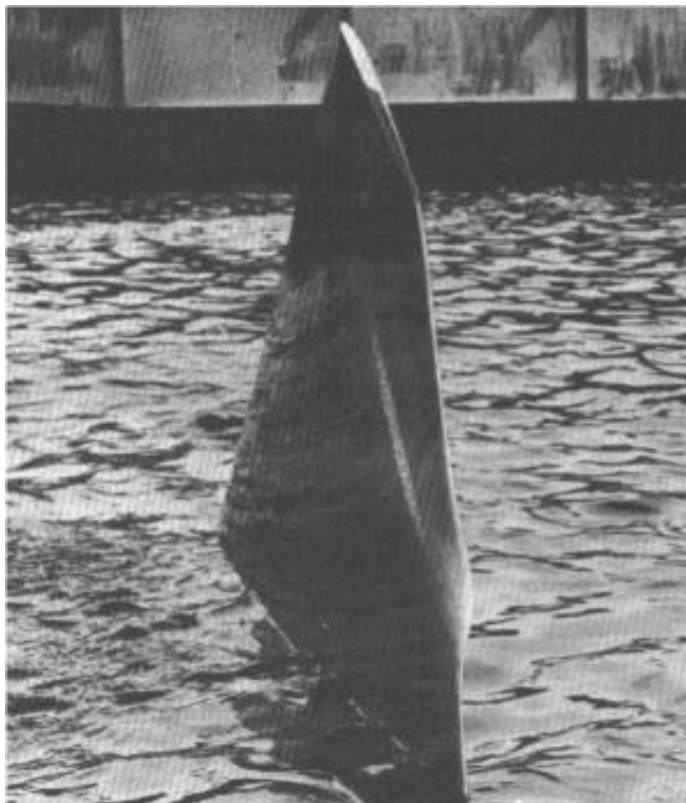
Problem kavitacije gdje je zapažena erozija vijčanih krila u početku se pripisivao djelovanju korozije. Kad se malo bolje promotri mehanizam kavitacije, posljedica je erozija i neka druga oštećenja. Na vrlo brzim brodovima kao što su hidrokrlni putnički brodovi, osim krila vijka erodiraju i hidrokrla te skrokovi. Kavitacijska erozija pojavljuje se na mjestima gdje se pojavljuje magličasta i mjehurićasta kavitacija. Naime, mjehurići implodiraju niz struju erodirajući i ostale dijelove. Erozija i korozija su fizikalno različite pojave, ali potpomažu jedna drugu. Erodirana površina vijčanih krila postaje hrapava što pogoduje elektrokemijskoj koroziji. Tako povećana hrapavost površine uslijed korozije pogoduje nastanku kavitacije na većini krila. Ako kavitaciju nije moguće izbjeći, odabiru se odgovarajući materijali za izradu vijka te se pribjegava primjeni superkavitirajućih vijaka. Kod njih je potpuno razvijena kavitacija koju je donekle moguće kontrolirati jer se implozija mjehurića odvija u struji dalje od površine krila vijka. Cilj je produžiti vijek trajanja vijka koji mogu trajati samo nekoliko mjeseci ukoliko se ne pribjegne primjeni superkavitirajućih vijaka.[3]



Slika 19. Erozijska krila vijka [3]

1.6.2.2. Savijanje izlaznih bridova vijčanih krila

Savijanje izlaznih bridova vijčanih krila prisutno je kod jednovijčanih brodova s velikom snagom propulzije. Uzrok ove pojave nagla je implozija velikog broja mjehurića na izlaznim bridovima vijčanih krila, a bridovi se savijaju prema tlačnoj strani. Da bi se to izbjeglo, potrebno je osigurati postupan prijelaz između pojedinih linija zakrivljenosti krilnih odsječaka i upadnih kutova pojedinih odsječaka.



Slika 20. Savijanje izlaznih bridova vijčanih krila [3]

1.6.2.3. Vibracije i šum

Vijak je glavni izvor pojave zvuka. Uzrok toga je nestacionarno polje tlaka u realnoj tekućini pri čemu je potrebno uzeti u obzir njezinu stlačivost. Šumnost vijka raste napredovanjem kavitacije.[3]

Vibracije izazivaju dodatna dinamička opterećenja konstrukcije te nepovoljno utječu na zdravlje posade. Vibracije nastaju djelovanjem oscilatornih sila ili momenata, a posljedica su naprezanja i pomaci na određenim točkama konstrukcije. Izvori vibracija mogu biti: porivni strojevi, pomoćni strojevi, vijak i efekti gibanja broda na valovima.

Mehanička uzbuda nastaje uslijed neuravnoteženosti mase vijka.

Uzroci hidrodinamičke uzbude:

- loša izvedba krila – različita krila, usponi, nagibi
- zbog rada po krmu broda – nejednoliko polje brzina, nagnutost osovina, blizina slobodne površine.

Hidrodinamička uzbuđena sastoji se od:

- osovinskih uzbuđnih sila – uzrok je nejednolika polje brzina na mjestu rada vijaka
- površinskih uzbuđnih sila – one djeluju na oplatu krmenog dijela. Uzbuđne sile će biti znatno veće ako je krilo obavijeno slojem kavitacije.[3]

1.7. Materijali brodskih vijaka

Kod odabira materijala za izradu brodskih vijaka posebnu pažnju treba obratiti na njihova svojstva:

- statička i dinamička čvrstoća
- specifično produljenje
- otpornost kavitaciji
- otpornost prema koroziji u morskoj vodi
- sposobnost lijevanja
- obradivost
- mogućnost jednostavnog popravka
- cijena.

Materijali za izradu vijaka:

- ugljični i legirani čelici
- posebne mjedi
- posebne bronce
- ugljičnim ili staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti[14]..

Krila vijaka izrađenih od nelegiranog čelika su tanja negoli je to slučaj kod krila izrađenih od ostalih materijala. Obzirom da im je obrada dosta teška, ugrađuju se neobrađeni.

Legirani čelik primjenjuje se za izradu odvojivih krila vijaka ledolomaca, dok se visokolegirani Cr-Ni čelici primjenjuju za izradu vijaka upravljivog uspona (engl. CPP, *controlable pitch propeller*) za brze brodove te su vrlo točno obrađeni i uglačani[14].

Kad govorimo o vijcima upravljivog uspona čija su krila jako opterećena i ugrožena kavitacijom, oni se rade od kovanih legiranih čelika, a djelomično uronjeni vijci lijevaju se od specijalnih čelika posebnim postupcima. Većina brodskih vijaka pedesetih godina prošlog stoljeća bilo je izrađeno iz posebne mjedi čiji je glavni sastojak te slitine osim bakra bio cink. Tu slitinu često se nazivalo broncom, što je pogrešno obzirom na udio cinka u njoj. Glavni problem takvih slitina je decinkacija mjedi, odnosno gubitak cinka u površinskom sloju uslijed korozivnog djelovanja morske vode. Da bi se to spriječilo, postavljaju se cink protektori na krmenom dijelu broda u blizini vijka. Cink - protektori (99,995% Zn) su blokovi čistog cinka zavareni na oplatu broda, troše se elektrolizom, a slitina vijka ostaje netaknuta. Sam proces uvjetovan je tečenjem galvanskih struja te treba osigurati električnu vodljivost između vijka i protektora. Njih se ne smije bojiti, a ponekad se ugrađuju i grafitne četkice kako bi se ostvarila električna vodljivost između osovine vijka i trupa. Rubovi protektora su zaobljeni, ugrađuju se u područja malih brzina strujanja kako bi otpor bio što manji. Nekad se i sama kapa vijka izrađuje od čistog cinka te služi kao protektor. Time je uz hidrodinamičku prednost osigurana i izvrsna električna vodljivost između protektora i vijka, što nije uvijek samo po sebi osigurano kad je protektor zavaren za oplatu broda. Time se eliminira ugradnja kliznih kontakata. Sam broj protektora potrebnih za pouzdanu zaštitu vijka ovisi o ploštini vijka[14].

Posebne aluminijske bronce (slitina Cu i Al) legirane su manganom ili niklom, izrazito su kvalitetne, te su kao takve pogodne za izradu brodskih vijaka. Imaju visoku otpornost prema koroziji, ne sadrže cink te se smatraju jednim od najkvalitetnijih materijala. Također imaju veliku čvrstoću te su otporne na kavitacijsku eroziju. Obzirom na dobra mehanička svojstva, aluminijska bronca se više primjenjuje negoli specijalne mjedi[14].

Niklena aluminijska bronca sadrži u sebi i nikal kako bi se dodatno povećala otpornost na koroziju, posebno kad je riječ o primjeni u morskoj vodi. Ima visoku vlačnu i savojnu čvrstoću, a troškovi održavanja su niski. Smatra se da je ovaj materijal izuzetno pogodan za izradu brodskih vijaka, čahura brodskih vijaka, ventila te pumpi[15].

Potrebna svojstva kovina za vijke su dinamičkaizdržljivost u korozivnom mediju i otpornost na kavitacijsku eroziju.

Sonoston je posebna vrsta Mn-Al bronce te je zaštićen patentom. To je materijal koji ima vrlo dobra svojstva kod prigušivanja vibracija. Prigušuje vibracije čak dva puta jače nego sivi lijev te i do dvadesetak puta više od ostalih materijala za vijke koji ne smiju vibrirati (zujati). Uglavnom se primjenjuje na podmornicama i ratnim brodovima. Istraživanje novih materijala nastavlja se i dalje. Ponekad se za male vijke kod izvanbrodskih motora primjenjuju vijci od polimernih kompozita te sami polimeri. Pokušaji prevlačenja vijaka od jeftinih materijala zaštitnim slojem polimera u svrhu sprečavanja kavitacijske erozije do danas su ostali neuspješni[14].

U novije vrijeme brodski vijci manjih dimenzija proizvode se od vlaknima ojačanih polimernih kompozita. Osim na razvijanju novih materijala za ovakav tip brodskih vijaka, puno pažnje posvetilo se i izmjenama geometrije takvih vijaka, što bi zajedno trebalo doprinijeti cjelokupnom poboljšanju ovakvog tipa vijka. Tradicionalna geometrija broskog vijka bila bi suviše kruta kad bi se primjenjivala na anizotropnim materijalima. Osim što su jeftiniji, pokusi pokazuju da su ovakvi vijci otporniji na erozijsku kavitaciju i to do 30 % u odnosu na niklenu aluminijsku broncu. To je još više istaknuto primjenom aramidnih vlakana na površini ugljičnim vlaknima ojačanih polimernih kompozita. Još jedna od prednosti vlaknima ojačanih kompozita jest i to što su znatno manje mase nego oni izrađeni od niklene aluminijske bronce, a nije zanemarivo i to da su vibracije kod ovih tipova vijaka znatno manje[16], [17].



Slika 21. Vlanknima ojačani polimerni kompozitni brodski vijak [18]

1.8. Lijevanje brodskih vijaka

Proces proizvodnje brodskih vijaka u osnovi je ostao isti kao što je bio i prije pedeset godina. Jedino što se mijenjalo bio je oblik broskog vijka. Brodski vijci proizvode se tehnologijom lijevanja u pijesku i to je zajednički dio procesa u proizvodnji brojnih komponenti. U izradi su glavni koraci oblikovanje kalupne šupljine, ulijevanje taljevine u kalupnu šupljinu i dorada. Prednost ovakvog načina proizvodnje jest to što proizvod može biti oblikovan u različitim veličinama i oblicima uz vrlo male troškove proizvodnje[19].

1.8.1. Izrada modela

Izrada modela prvi je i najvažniji dio izrade broskog vijka. Time se pokazuje poprečni presjek lopatica u odabranim točkama. To uključuje kut, nagib, dopuštenu debljinu strojne obrade, dopušteno odstupanje po pitanju duljine i skupljanja odljevka u procesu lijevanja metala. Nakon što je model idejno riješen, potrebno je napraviti proračun materijala za

konstrukciju broskog vijka. Obzirom da se prototip izrađuje od drva i da je u samom procesu oblikovanja prisutno jako puno rezbarenja, važno je da drvo bude bez čvorova[19].



Slika 22. Bušenje rupa u svakom pojedinom segmentu [19]

Drvo se reže pilama i oblikuje se svaki pojedini segment. Obzirom da se izrada modela provodi u slojevima, unutar svakog pojedinog sloja buše se rupe kako ne bi došlo do pomicanja prilikom njihovog spajanja, slika 22. Koristeći model, određuje se uspon broskog vijka. Slojevi se nakon toga međusobno lijepe. Pri tome se za spajanje koriste vijci jer je u ovom slučaju vrlo teško rukovati stezaljkama. Na taj način postupno se dobije željeni izgled broskog vijka, slika 23.



Slika 23. Model broskog vijka od drveta [19]

Nakon izrade modela pristupa se njegovoj obradi te brušenju kako bi se dobile glatke površine.

1.8.2. Dorada modela brodskog vijka

Sve ogrebotine, male rupe i manja oštećenja ispune se drvenim punilom. Nakon što se osuši, model je spreman za kalupljenje u ljevaonici [19].



Slika 24. Dorada modela brodskog vijka [19]



Slika 25. Model brodskog vijka spreman za kalupljenje [19]

2. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA

Karakterizacija materijala se provodi kako bismo dobili podatke o uzorku kojeg ispitujemo i na osnovu tih podataka donijeli zaključak o kojem materijalu je u konačnici riječ. Da bismo uopće otpočeli proces karakterizacije, potrebno je kvalitetno pripremiti ispitne uzorke, odnosno epruvete. Potom se pristupa analizi kemijskog sastava, strukture te ispitivanju mehaničkih svojstava.

Kemijski sastav je jako bitan jer o njemu ovisi struktura materijala, kao i o tehnološkim postupcima kojima je materijal proizveden. Sve to zajedno utječe na mehanička svojstva materijala, a mehanička svojstva pak utječu na primjenu materijala.

Metalografija je istraživačko područje koje se bavi optičkim istraživanjem mikrostrukture. Cilj joj je dati kvantitativan i kvalitativan opis. [20], [21]

2.1. Analiza kemijskog sastava

Prvi korak pri određivanju vrste materijala jest analiza kemijskog sastava. Strukturu materijala osim kemijskog sastava određuje i način prerade. Pojedini materijali mogu biti istog kemijskog sastava, ali imati različita svojstva ukoliko se koriste različiti postupci prerade. Time je naravno i struktura tih materijala različita. Pri određivanju vrste materijala može pomoći težina, tvrdoća, boja i izgled površine. Međutim, kako bi se točno moglo odrediti o kojem materijalu je riječ, potrebna je analiza kemijskog sastava. Ona može biti kvantitativna i kvalitativna. Kvalitativnom metodom utvrđuje se koji kemijski elementi su prisutni u materijalu, a kvantitativnom metodom utvrđuje se količina pojedinih kemijskih elemenata prisutnih u uzorku koji se ispituje.

2.2. Analiza mikrostrukture

Makrostruktura je vrsta analize gdje uzorak promatramo golim okom ili vrlo malim uvećanjem, maksimalno do 20 x. Pri tome je moguće vidjeti nepravilnosti kao što su pukotine ili greške.

Makrostruktura je vrsta analize pri čemu se koristi svjetlosni ili elektronski mikroskop i obuhvaća sve ono što nije vidljivo golim okom. Podrazumijeva veća uvećanja od 25 x. Pri tome je moguće vidjeti interkristalnu koroziju, precipitate, kristalna zrna, poroznost itd.

2.2.1. Priprema uzorka

Uzorci koji se promatraju na elektronskom mikroskopu trebaju biti pažljivo pripremljeni. Koraci prilikom pripreme uzorka:

- izrezivanje
- zalijevanje uzorka u polimernu masu
- brušenje
- poliranje
- nagrivanje.

Pažljivo pripremljen uzorak ne smije imati ogrebotine ili mrlje. Treba paziti da površina uzorka bude ravna, što je posebno bitno kad se uzorak promatra mikroskopom pri velikim povećanjima.

2.2.1.1. Izrezivanje

Prvi korak u pripremi uzorka je njegovo izrezivanje iz osnovnog materijala. Prilikom rezanja uzorka treba voditi računa da površina reza bude što pravilnija i bez oštećenja uzrokovanih pregrijavanjem. Pridržavanjem prethodno navedenih pravila, olakšava se daljnji tijek pripreme, odnosno skraćuje se vrijeme brušenja i poliranja.

2.2.1.2. Zalijevanje uzorka u polimernu masu

Zalijevanje uzorka u polimernu masu vrši se kako bi se uzorkom lakše rukovalo i kako bi se lakše analizirali rubovi uzorka. Polimerna masa u koju se zalijeva uzorak je dvokomponentna (ponekad može biti i trokomponentna), gdje se miješa voda i prah u omjeru 2:1, nakon čega se ulijeva u gumeni kalup zajedno s uzorkom. Masa se skrućuje otprilike pola sata. U cijelom tom procesu jako je bitno osigurati da adhezija između uzorka i mase bude što bolja. Također je bitno da masa ima istu otpornost na abraziju kao i uzorak kako bi se prilikom poliranja postigla glatka površina, bez prijelaza između mase i uzorka.

2.2.1.3. Brušenje

Brušenjem se uklanjaju oksidi, plastično deformirani sloj te prljavština kako bi se osiguralo daljnje nesmetano pripremanje uzorka za ispitivanja. Ovaj postupak vrši se abrazivnim sredstvima odgovarajuće veličine zrna i to u pet koraka. Kao sredstvo brušenja koristi se brusni papir različitih stupnjeva finoće te je on vezan za podlogu. Kreće se prvo od najgrubljeg brusnog papira finoće 120, a potom prema sve finijima - 220, 320, 500 te se naposljetku koristi papir finoće 1000, koji je ujedno i najfiniji. Promjenom brusnog papira, uzorak se zarotira za 90° i njime se brusi sve do eliminacije tragova prethodnog brušenja. Prilikom brušenja, površina uzorka se hladi vodom koja usput odvodi strugotinu koja bi u protivnom oštetila površinu uzorka.

2.2.1.4. Poliranje

Poliranje se provodi nakon brušenja i slično je samom brušenju, samo se koriste puno finiji abrazivi i bolja sredstva kako bi se dobila što kvalitetnije obrađena površina. Ovim postupkom uklanja se vrlo mali sloj materijala, ali se postiže visoki sjaj površine.

2.2.1.5. Nagrizanje

Nagrivanje se provodi radi bolje vidljivosti pojedinih faza i određenih karakteristika materijala koje inače u nenagrivenom stanju ne dolaze do izražaja. Ovisno o kemijskom sastavu uzorka, iz literature se odabire sredstvo kojim se uzorak nagriva. U ovom slučaju to je *Cu₄β complexu* koji uronimo uzorak na dvije-tri sekunde, potom se uzorak uroni u vodu, čime se proces nagrivanja prekida. Daljnji postupak se nastavlja ispiranjem uzorka u alkoholu, a potom i sušenjem na toplom zraku. Bitni parametri u ovom postupku su sastav sredstva za nagrivanje, trajanje nagrivanja te temperatura. [24]

Postoji nekoliko postupaka nagrivanja, ovisno o materijalu koji se nagriva:

- kemijsko nagrivanje
- elektrolitičko nagrivanje
- obojeno nagrivanje
- toplinsko nagrivanje.

U nagrivenom stanju moguće je vidjeti kristalna zrna pojedinih faza te ostale karakteristike koje nisu vidljive u poliranom stanju.

2.2.2. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM)

Fokusiranim snopom elektrona skenira se površina ispitivanog uzorka skenirajućim svjetlosnim mikroskopom. Snop elektrona izbija elektrone atoma uzorka. Pobuđeni elektroni iz uzorka proporcionalni su energiji elektrona iz snopa. Specijalnim detektorima mjeri se energija elektrona proizašlih iz uzorka. Tako se pomoću mikroprocesora stvara pseudotrodimenzijska slika.

Priprema uzorka:

- uzorak mora biti malih dimenzija
- uzorci moraju biti električki vodljivi
- uzorci moraju biti suhi.

Prednosti SEM-a nad ostalim mikroskopima:

- rezolucija
- dubina polja - sposobnost da objekti različite „visine“ na uzorkovanoj površini ostanu u fokusu
- mikroanaliza – sposobnost analize sastava uzorka.

SEM uređaj konstruira virtualnu sliku iz signala koji su emitirani u uzorku, nikad ne formiraju stvarnu sliku uzorka.

Ubrzanje elektrona određuje količinu energije koju nose primarni elektroni u snopu te određuju interakciju. Elektroni s višom energijom mogu prodrijeti dublje u uzorak. Time se mogu proizvesti signali s višim stupnjem energije koji mogu izmaknuti detekciji. Viša energija pridonosi smanjenju rezolucije slike povećanjem opsega interakcije.

Vrste signala:

- sekundarni elektroni (SE) jednostavni su elektroni atoma, imaju vrlo malu energiju (manju od 50 eV). Zbog svoje male energije mogu iskočiti samo iz vrlo plitkog dijela površine uzorka i imaju najbolju rezoluciju slike. Opseg interakcije nalazi se bliže površini uzorka te na taj način mogu biti detektirani elektroni iz točaka na vrhovima i

na dnu doline reljefa. Vrhovi su sjajniji, a doline su tamne. Zbog toga je dobivena slika najbliža onoj koja bi se dobila vizualno.

- „backscattered“ elektroni (BSE) primarni su elektroni iz snopa, oni se odbijaju nazad od površine uzorka uslijed međudjelovanja s jezgrom atoma iz uzroka. Imaju visoku energiju, od 50 eV pa do napona koji imaju ubrzani elektroni iz snopa. Slike dobivene backscattered elektronima nisu jednostavne za interpretirati, ali mogu dati važne informacije o sastavu uzorka.
- dubina polja karakterizira daljinu u obje strane od ravnine točke fokusa izvan kojeg slika postaje lošija. Povećanjem dubine polja prikaz trodimenzionalnih objekata je bolji.

SEM uređaji najbolji su po pitanju rezolucije, a kvaliteta slike uglavnom dolazi iz njegove velike dubine polja. Za veća povećanja kut divergencije svjetla koje ulazi u leću je veći, a dubina polja je plića.

SEM uređaj razdvaja povećanje od dubine polja. U usporedbi s optičkim mikroskopima, kod SEM mikroskopa kutovi su mnogo manji, a dubina polja mnogo veća. [22]



Slika 26. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) [22]

2.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava

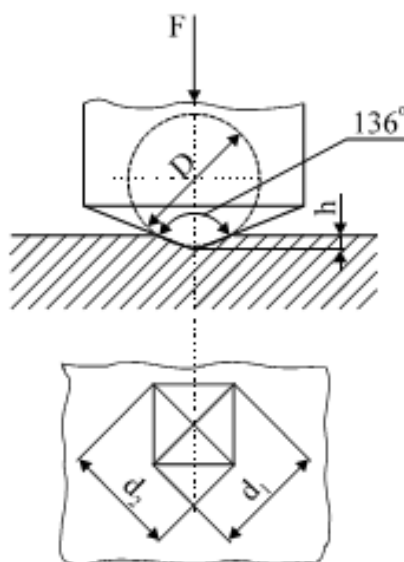
Pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala. Mehanička svojstva posljedica su strukturnog stanja materijala koje se dobiva obradom materijala određenog sastava nekim od tehnoloških postupaka.

2.3.1. Tvrdoća materijala

Tvrdoća je otpornost nekog materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdjeg tijela. Za ispitivanje tvrdoće nije potrebno izraditi posebnu epruvetu, već samo pripremiti plohu uzorka strojnog dijela. Tvrdomjeri, odnosno uređaji za mjerenje tvrdoće uglavnom su jednostavniji i jeftiniji od drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava. Tvrdoća se mjeri na način da se mjeri veličina ili dubina otiska što ga penetrator opterećen nekom silom načini u ispitivanom materijalu. Te metode primjenjuju se za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća neka (trajna) plastična deformacija.

Najčešće primjenjivane metode za mjerenje tvrdoće su: Brinellova, Vickersova i metoda po Rockwellu.

Kod Vickersove metode kao penetrator koristi se četverostrana dijamantna piramida s kutom od 136° između stranica.



Slika 27. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [23]

Uobičajeni iznosi sile kod Vickersove metode iznose od 49 do 980 N. Trajanje opterećenja penetratora iznosi od 10 do 15 s, a za mekane materijale to se može produžiti na nekih tridesetak sekundi, što je potrebno navesti u oznaci. Kod ove metode potrebna je brižljiva priprema mjerne površine, što uključuje i poliranje uzorka. Zbog sitnog otiska, za mjerenje dijagonale potreban je mjerni mikroskop.

Tvrdoća po Vickersu računa se prema izrazu:

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2} \quad (13)$$

gdje je:

F - sila [N]

D - srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otisnuća [mm]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

U radu je napravljena analiza materijala nepoznatog kemijskog sastava za kojeg također nisu dostupni ni podatci vezani za njegovu oznaku. Sam uzorak uzet je iz dotrajalog broskog vijka. Pretpostavka je bila da se radi o nekoj vrsti bronce. Cilj provođenja ispitivanja je bilo utvrditi da li je pretpostavka točna i ako jest, o kojoj vrsti bronce je riječ na osnovu dobivenih ispitivanja.

Karakterizacija materijala sastojala se od:

- analize kemijskog sastava uzorka
- kvalitativne analize mikrostrukture
- kvantitativne analize mikrostrukture
- mjerenja tvrdoće.

Nakon ispitivanja, dobiveni rezultati su analizirani te se došlo do odgovarajućih zaključaka.

3.2. Materijal za ispitivanje

Sva ispitivanja provedena su na uzorcima izrežanim iz broskog vijka promjera 1 m. Kemijski sastav nije poznat. Jedini izvjestan podatak po pitanju postupka proizvodnje jest da je taj broski vijak dobiven lijevanjem u pijesku. Na slici 28. prikazan je broski vijak iz kojeg je uzorak uzet.



Slika 28. Ispitivani brodski vijak

3.3. Analiza mikrostrukture

Analiza je provedena svjetlosnim mikroskopom OLYMPUS GX51 te skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) Tescan TS5136LS.

Priprema uzorka te analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Nakon izrezivanja, uzorci su zaliveni u polimernu masu, brušeni, polirani te naposljetku nagriženi. Analiza mikrostrukture provedena je u nagriženom stanju.

3.3.1. Priprema uzorka

3.3.1.1. Izrezivanje

Izrezivanje uzorka za ispitivanje obavljeno je tračnom pilom, provođeno je konstantno hlađenje da bi se izbjegao utjecaj topline na mikrostrukturu (slika 29).



Slika 29. Izrezivanje uzorka tračnom pilom

Iz materijala za ispitivanje izrezano je pet uzoraka kako bi se analizirala mikrostruktura. Na slici 30. vidljiv je položaj uzoraka za analizu mikrostrukture.



Slika 30. Uzorci za mikrostrukturnu analizu

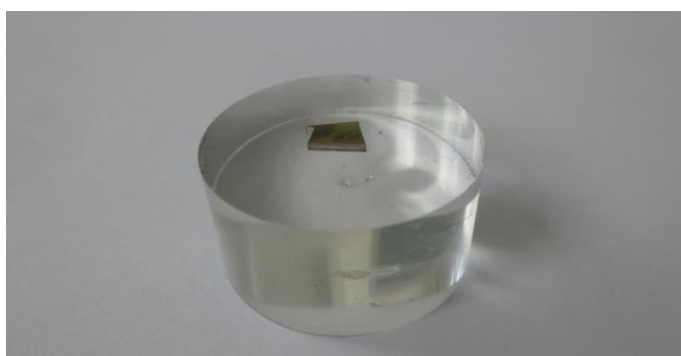
3.3.1.2. Zalijevanje uzoraka u polimernu masu

Zalijevanje uzorka u polimernu masu provodi se radi lakšeg rukovanja. Postupak toplog zalijevanja proveden je na pneumatskoj preši Pneumet Press (slika 31.). Uzorci se stavljaju u

prešu, kalup se puni polimernim prahom te se nakon toga zatvara. Djelovanjem visoke temperature i visokog tlaka, polimerni prah se topi te uzorak nakon toga ostaje fiksiran unutar polimera. Na slici 32. prikazan je zaliveni uzorak.



Slika 31. Polimerna preša PneumetPress za zalijevanje uzoraka u polimernu masu



Slika 32. Uzorak zaliven u polimernu masu

3.3.1.3. Brušenje

Brušenje je provedeno na uređaju Phoenix Alpha (slika 33.). Brusni papir se stavi na rotacijsku plohu uređaja, a brušenje se provodi pri brzini vrtnje od 300 okr./min. Sam postupak odvija se uz hlađenje vodom kako uslijed zagrijavanja ne bi došlo do utjecaja na mikrostrukturu materijala. Brusni papir koji se pri tome koristi kreće se od finoće P320, P500, P1000, P2000 i P4000 i to od onih grubljih prema finijima.



Slika 33. Brušenje uzorka

3.3.1.4. Poliranje

Na slici 34. prikazan je uređaj StruersDAP-V na kojem je provedeno poliranje. Kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje (lubrikant) koristi se smjesa vode i alkohola.

Poliranje se vrši u dva koraka, pri brzini od 150 okr./min gdje je:

- u prvom koraku promjer dijamanitnih abrazivnih čestica 3 μm
- u drugom koraku promjer dijamanitnih abrazivnih čestica 1 μm



Slika 34. Uređaj za poliranje

3.3.1.5. Nagrizanje

Uzorak se nagriza sredstvom pod nazivom β complex, a koji se priprema prema sljedećem sastavu:

25 ml amonijevog hidroksida, NH_4OH

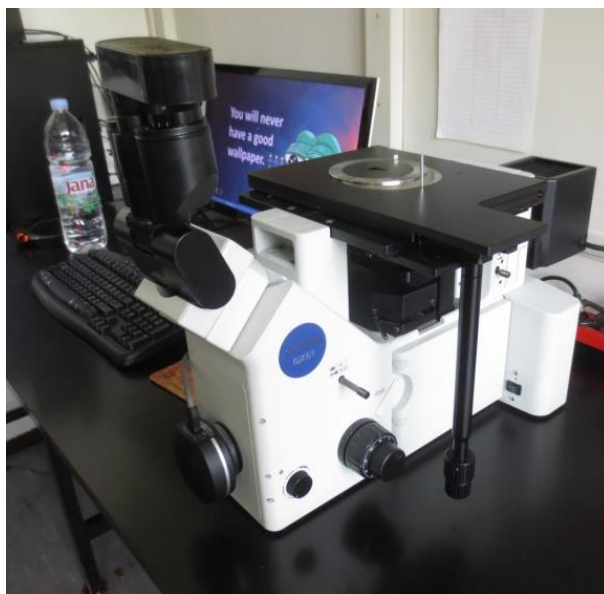
25 ml destilirane vode

25-50 ml vodikovog peroksida, H_2O_2 (3 %)

Sam uzorak u sredstvu se nagriza dvije do tri sekunde. Nakon toga uzorci se isperu u vodi kako bi se prekinula kemijska reakcija. Ukoliko je potrebno, uzorci se mogu isprati i u alkoholu.

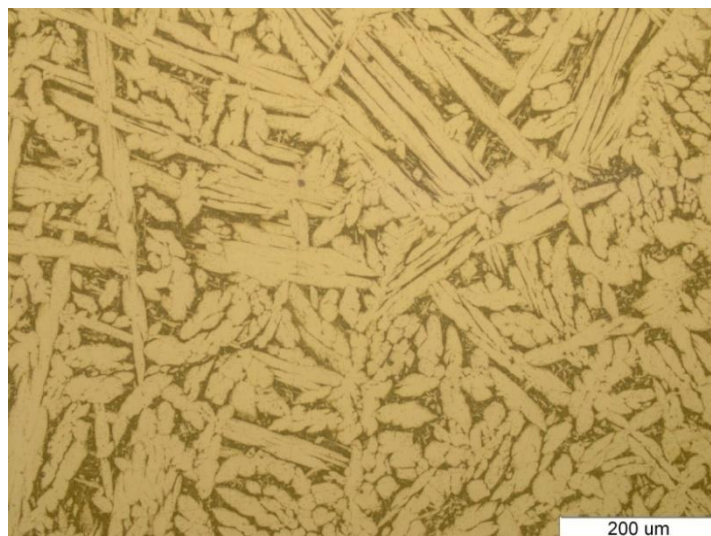
3.3.2. Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom

Na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 (slika 35.) provedena je analiza u nagriženom stanju.

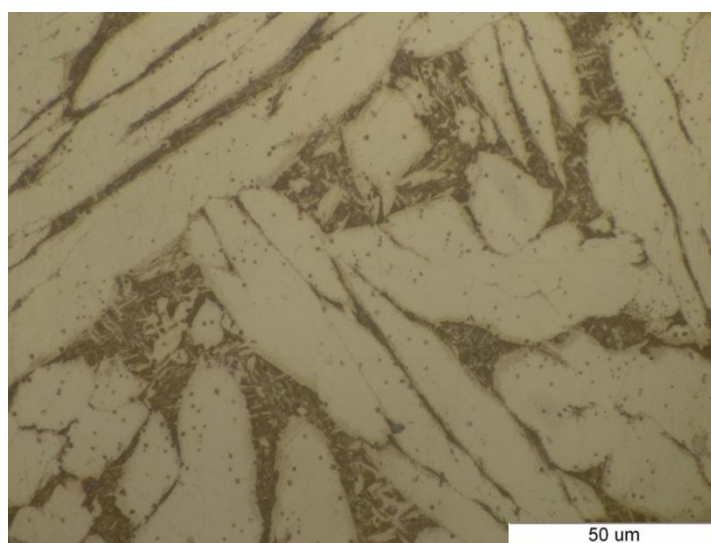


Slika 35. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51

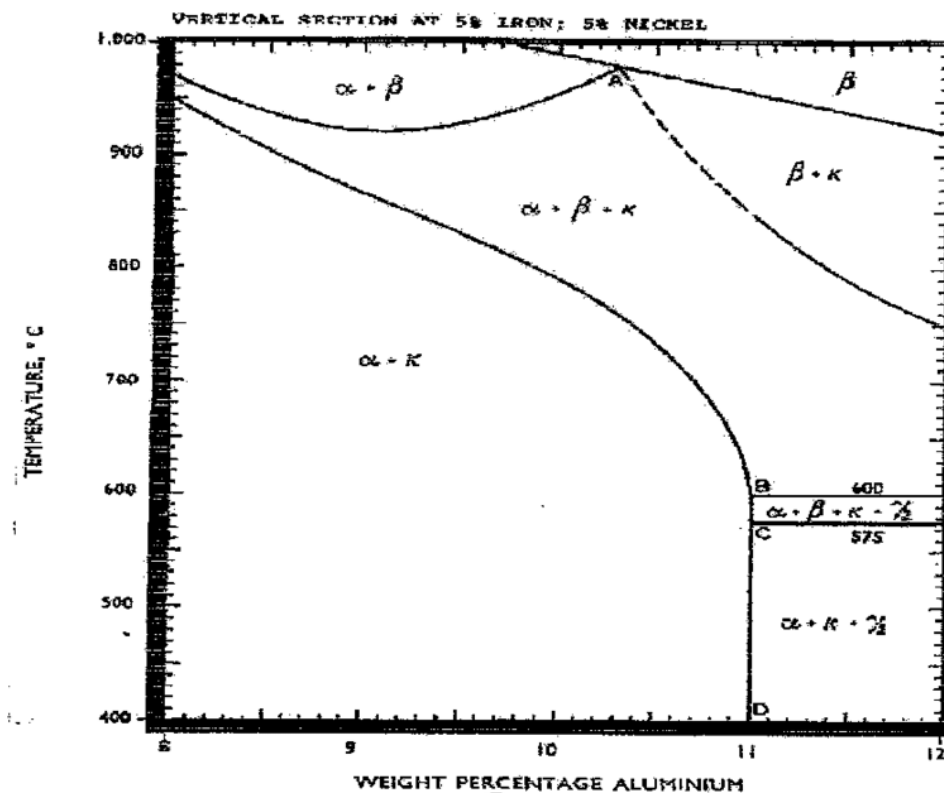
Nakon što su uzorci ispolirani, nagriženi su u otopini Cu - β complex. Nakon nagrižanja vidljiva je kristalna struktura materijala.



Slika 36. Prikaz mikrostrukture materijala u nagriženom stanju (povećanje 200 x)



Slika 37. Prikaz mikrostrukture materijala u nagriženom stanju (povećanje 1000 x)



Slika 38. Dijagram stanja aluminijske bronce legirane niklom i željezom [26]

Kada su nikal i željezo nominalno oba prisutni u udjelu od 5 %, te aluminij u udjelu 9-10 %, tada se umjesto γ_2 -faze javlja κ -faza koja je korisnija. κ -faza se primjenjuje tamo gdje potrebna otpornost na trošenje, kao što je to slučaj kod primjene npr. kliznih ležajeva. Aluminijska bronca s dodatkom legirnog elementa nikla slična je kaljenom čeliku po strukturnoj morfologiji.

- faza κ_I ima oblik rozete
- faza κ_{II} je sferoidizirani precipitat na granici zrna
- faza κ_{III} je lamelarna faza
- faza κ_{IV} je fini precipitat unutar kristalnog zrna.

U pogledu otpornosti na koroziju κ_I , κ_{II} , κ_{IV} imaju mali utjecaj, ali κ_{III} faza može imati utjecaj na otpornost koroziji, posebno u morskoj vodi i to ako stvara kontinuiranu mrežu. [27]

Mikrostrukturnom analizom potvrđeno je da je riječ o karakterističnoj dvofaznoj mikrostrukтури aluminijske bronce legirane željezom i niklom, s α – fazom kristalima mješancima i s κ – fazom intermetalnog spoja [24], [26].

3.3.3. Ispitivanje kemijskog sastava EDS-metodom

Analiza mikrostrukture na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM) provodi se u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Uzorak se postavlja u komoru mikroskopa te se fokusiranim snopom elektrona skenira površina ispitivanog uzorka. Njime se proučava struktura, a uz pomoć EDS-detektora (engl. EDS, *energy dispersive x-ray spectroscopy*) određuje se i kemijski sastav materijala. Pomoću mikroprocesora dobiva se pseudotrodimenzijska slika [25].



Slika 39. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM)

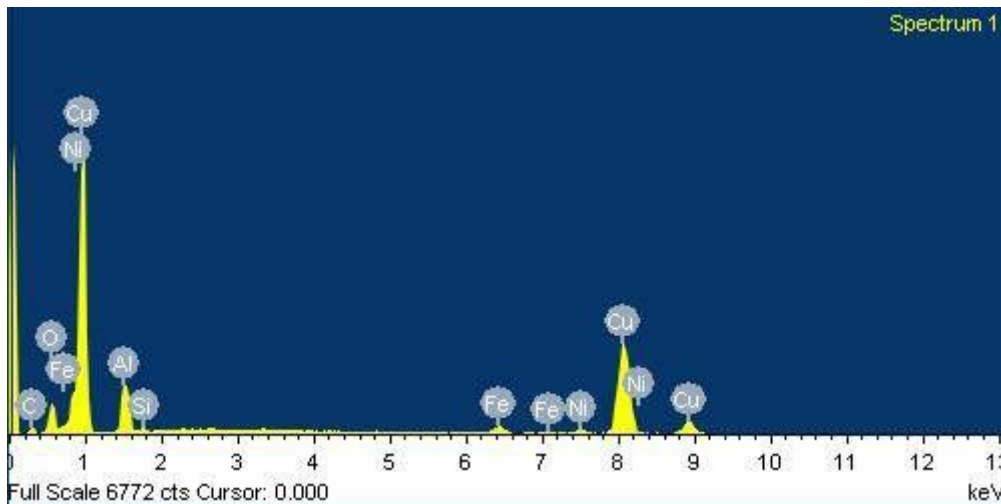
Slika 40. prikazuje određeno mjesto na kojem je metodom EDS ispitan kemijski sastav materijala, a tablica 1. i slika 41. prikazuju utvrđeni kemijski sastav.



Slika 40. Mjesto ispitivanja kemijskog sastava pomoću EDS-detektora

Tablica 1. Kemijski sastav dobiven pomoću EDS-detektora

Kemijski element	Maseni udio, %	Atomski udio, %
C	7,35	22,51
O	9,39	21,55
Al	9,24	12,58
Si	0,41	0,54
Fe	2,12	1,39
Ni	2,31	1,45
Cu	69,18	39,99



Slika 41. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava pomoću EDS-detektora

3.4. Ispitivanje tvrdoće materijala

Ispitivanje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tvrdoća pripremljenih uzoraka provedena je na mikrotvrdomjeru PMT-3 (slika 42), metodom po Vickersu (HV0,2). Mikrotvrdoća je mjerena u lijevom i desnom vrhu, te na rubovima.



Slika 42. Mikrotvrdomjer PMT-3

Vrijednosti mikrotvrdoće na vrhovima uzorka prikazani su u tablici 1.

Tablica 2. Mikrotvrdoća (HV0,2) na vrhovima uzorka

Broj mjerenja	Lijevi vrh	Desni vrh
1.	323	473
2.	321	475
3.	319	477
Srednja vrijednost	321	475

Vrijednosti mikrotvrdoće na rubovima uzorka prikazani su u tablici 2.

Tablica 3. Mikrotvrdoća (HV0,2) na rubovima uzorka

Broj mjerenja	Lijevi rub	Desni rub
1.	316	478
2.	314	486
3.	290	500
Srednja vrijednost	306,6	488

4. ANALIZA REZULTATA

4.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Rezultati kemijske analize pokazuju da je riječ o aluminijskoj bronci legiranoj niklom i željezom.

Od legiranih elemenata u aluminijskoj bronci ima 2,31% Ni, 2,12% Fe te 0,1% Si.

4.2. Osvrt na analizu mikrostrukture

Uzorci su ispolirani te nagriženi u otopini β complex kako bi se lakše mogla vidjeti kristalna struktura materijala.

Poboljšanju svojstava aluminijske bronce značajno pridonose legirni elementi nikal, željezo i aluminij. Na osnovi dijagrama stanja zaključuje se da ovaj materijal sadrži osim α – faze kristala mješanaca i κ – fazu intermetalnog spoja koja utječe na povećanje otpornosti materijala na trošenje. Obzirom da postoji i κ_{III} – faza, materijal je također znatno otporniji i na koroziju u morskoj vodi. Nikal pridonosi poboljšanju mehaničkih svojstava ovog materijala. Osim povećanju otpornosti na koroziju, značajno utječe i na povećanje površinske tvrdoće.

4.3. Osvrt na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava

Zbog zahtjevne geometrije brodskog vijka, izrada epruveta za ispitivanje kao što su ona za statičko vlačno ispitivanje i ispitivanje žilavosti nije bila moguća.

Jedino ispitivanje koje je bilo moguće napraviti za ovaj slučaj kada su mehanička svojstva u pitanju jest ispitivanje tvrdoće.

Izmjerena mikrotvrdoća HV0,2 na rubovima i na vrhu uzorka ima relativno visoke vrijednosti. To pokazuje da se radi o vrlo tvrdom materijalu, što je i razumljivo obzirom na namjenu materijala koji treba biti otporan na trošenje.

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja te dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- kemijskom analizom utvrđeno je da materijal sadrži otprilike 70 % Cu, 9 % Al, 9 % O, 7 % C, 2,5 % Ni, 2 % Fe, te oko 0,5 % Si
- bakar se kao materijal za izradu vijaka često koristi jer je relativno dobro otporan na obraštanje, kao i na utjecaj morske atmosfere
- prisutnost aluminija u postotku od 9-10%, te nikla i željeza kao legiranih elemenata u postotku od 5% pridonosi stvaranju κ - faze intermetalnog spoja, uz postojeću α – fazu kristala mješanaca
- κ_{III} faza može imati utjecaj na otpornost koroziji, posebno u morskoj vodi i to ako stvara kontinuiranu mrežu
- udio nikla kao legirnog elementa dodatno utječe na povećanje površinske tvrdoće materijala, kao i na povećanje otpornosti na koroziju. Stoga, ova aluminijska bronca po strukturi je slična gašenom čeliku, tj. čeliku podvrgnutom martenzitnim transformacijama
- ispitivanjem tvrdoće, utvrđeno je da je njena vrijednost dosta visoka i da je samim time moguće postići manje trošenje i veću trajnost brodskog vijka.

LITERATURA

- [1] Vijak, brodski, Hrvatska enciklopedija,
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=64591> (8.1.2018.)
- [2] Ukoračak s vremenom, glasilo br. 53/54, 06.12.2016. (str. 72-88)
- [3] Radan, D.: Uvod u hidrodinamiku broda, Sveučilište u Dubrovniku, 2004.
- [4] Blagojević, B.: Hidrodinamika broda, Otpor i propulzija, hidra_01_2017_uvod_snage_povijest_metode[1].pdf, https://elearning.fesb.unist.hr/pluginfile.php/70003/mod_resource/content/2/hidra_01_2017_uvod_snage_povijest_metode.pdf, (15. 2. 2018.)
- [5] Medica, V.: Brodski pogonski strojevi, 2. Predavanje, Snaga za pogon broda, 2011.,
http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra3/Nastava/Predavanja_BPS_2011/Predavanje_02%202011.ppt (18. 1.2018.)
- [6] Ajaxnetphoto, Concarneau, France. Kortnozzle – propulsion,
<http://www.alamy.com/stock-photo-ajaxnetphoto-concarneau-france-kort-nozzle-propulsion-end-of-an-offshore-103713141.html> (25. 1.2018.)
- [7] ABB_Azipod_Brochure_lores.pdf, library.e.abb.com/public/698a6b4d64bf474e868cd9785597d8fc/ABB_Azipod_Brochure_lores.pdf?xsign=bgNsfMXFPOxi3789ttbQlac/hEQeEs+vx31DZbOkaigH/+PVd9ViYrTX5/A/A7BW (6. 2.2018.)
- [8] AZIPOD (Azimuthing Podded Drive), [www.wartsila.com/encyclopedia/term/azipod-\(azimuthing-podded-drive\)](http://www.wartsila.com/encyclopedia/term/azipod-(azimuthing-podded-drive)) (8. 2.2018.)
- [9] Blagojević, B.: Hidrodinamika broda (Otpor i propulzija)...
- [10] Sumić, T.: Karakteristike modernih propulzora,
bib.irb.hr/datoteka/826456.Karakteristike_modernih_propulzora.doc (10. 2. 2018.)
- [11] Siemens-Schottel Propulsor (SSP), [www.wartsila.com/encyclopedia/term/siemens-schottel-propulsor-\(ssp\)](http://www.wartsila.com/encyclopedia/term/siemens-schottel-propulsor-(ssp)).. (12. 2.2018.)
- [12] Bow Thrusters Construction and Working, <https://www.marineinsight.com/tech/bow-thrusters-construction-and-working/> (13.2.2018.)
- [13] Krčum, M.: Električna propulzija, Pomorski fakultet – Split

- [14] Otpor-i-propulzija-broda-15.Sredstva-za-poboljšanje-rada-propulzora[1].pdf, <http://www.joskodvornik.com/wp-content/uploads/2010/03/Otpor-i-propulzija-broda-15.Sredstva-za-pobolj%C5%A1anje-rada-propulzora.pdf> (14. 2.2018.)
- [15] Ni-Al-Bronze[1].pdf, <http://lykkegaard-as.com/Files/Billeder/PDF/Ni-Al-Bronze.pdf> (14. 2. 2018.)
- [16] TheManufactureof Marine PropellersinMouldedAnisotropicPolymerComposites, <https://pearl.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/2766> (15. 2.2018.)
- [17] Study on CompositeMaterial Marine Propellers, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/46/3/46_330/_article (15. 2.2018.)
- [18] Propellers To Undergo A ParadigmShift, <http://mfame.guru/propellers-undergo-paradigm-shift/> (15. 2.2018.)
- [19] Degu, Y. M., Sridhar, K.: Marine PropellerManufacturing – A New Approach, American JournalofEngineeringResearch (AJER), 3 (5), str. 207-211. [http://www.ajer.org/papers/v3\(5\)/Y035207211.pdf](http://www.ajer.org/papers/v3(5)/Y035207211.pdf) (15. 2.2018.)
- [20] Kladarić, I.: Metalografija željeznih legura, Struktura i svojstva materijala, <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Metalografija%20Fe-C%20legura.pdf> (16. 2.2018.)
- [21] <https://bs.scribd.com/doc/288622808/Karakterizacija-materijala> (16. 2.2018.)
- [22] Mršić, G., Žugaj, S.: Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX), Polic. sigur., 16 (3-4) (2007), str. 179-200, <https://hrcak.srce.hr/file/117789> (16.2.2018.)
- [23] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala; FSB, Zagreb, 2005.
- [24] Schauerl, Z.:Karakterizacija materijala - interne podloge za predavanja; FSB, Zagreb
- [25] Jakovljević, S.:Interne podloge za predavanja; FSB, Zagreb
- [26] Ajeel, S., Ibrahim, A. N., Salam,A., Fadhil, A. A., Study on ImprovementofCastingConditions for Some AluminumBronzeAlloys, Eng. &Technology, 25 (6) 2007
Guide to NickelAluminiumBronze for Engineers.pdf,
CopperDevelopmentAssociationPublication No 222, 2016.
www.copper.org/applications/marine/nickel_al_bronze/pub-222-nickel-al-bronze-guide-engineers.pdf (18. 2.2018.)

PRILOZI

I. CD-R disc