

# Analiza otpora broda kao funkcije obraštanja broda i izbora antivegetativne boje

---

Čajsa, Tanja

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:718474>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split - Repository - Faculty of Maritime Studies Split for permanent storage and preservation of digital resources of the institution](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**TANJA ČAJSA**

**ANALIZA OTPORA BRODA KAO FUNKCIJE  
OBRAŠTANJA BRODA I IZBORA  
ANTIVEGETATIVNE BOJE**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2016.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**POMORSKI FAKULTET**

**STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA**

**TANJA ČAJSA**

**ANALIZA OTPORA BRODA KAO FUNKCIJE  
OBRAŠTANJA BRODA I IZBORA  
ANTIVEGETATIVNE BOJE**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**

**Prof.dr.sc. IZVOR GRUBIŠIĆ**

**STUDENT:**

**Tanja Čajsa (MB 0171252176)**

**SPLIT, 2016.**

## SAŽETAK

Tijekom eksploatacije broda uviđeno je kako obraštanje znatno utječe na povećanje otpora broda. Kako je otpor trenja, koji je posljedica hrapavosti broda, jedan od najutjecajnijih otpora vezanih za brod bilo ga je potrebno smanjiti. Pojavom korozije i obraštanja podvodnog dijela trupa broda znatno su se smanjila pozitivna svojstva broda kao cjeline, smanjila se njegova brzina a povećali su se troškovi eksploatacije. Istraživanjima se došlo do zaključka da se upotrebom raznih antivegetativnih i antikoroziivnih premaza na hrapavost broda moglo znatno utjeci te ju smanjiti. Redovitim održavanjem te upotrebom navedenih premaza, brod je postao jedan od najisplativijih sredstava korištenih za prijevoz dobara.

**Ključne riječi:** *obraštanje, otpor broda, otpor trenja, hrapavost, korozija, antivegetativni i antikoroziivni premazi*

## ABSTRACT

During the exploitation of the vessel it has been seen that fouling deeply assists increasing ship's resistance. As the resistance caused by friction, which is the effect of ship's roughness, has the biggest influence on ship's resistance it had to be minimized. With the appearance of ship's corrosion and fauling of the underwater hull, ship's possitive abilities have been greatly reduced in general, which effected the ship's speed and magnified exploitation costs. Researches have shown that using antifouling and anticorrosion paint could seavarily effect ship's roughness and reduce it's effect to the ship. With regular maintenance and usage of the abbove mantioned paints, the ship has become one of the most profitable means for transportation of the goods.

# SADRŽAJ

## SAŽETAK

## SADRŽAJ

UVOD .....	1
1. POJAM HIDRODINAMIKE .....	2
1.1. SVOJSTVA TEKUĆINE ILI FLUIDA .....	2
1.2. SILE U TEKUĆINAMA .....	3
1.3. OTPOR BRODA .....	4
1.4. PROPULZIJA BRODA .....	6
2. ANALIZA OTPORA BRODA .....	7
2.1. OTPOR TRENJA .....	9
2.2. OTPOR FORME ILI VIROVA .....	10
2.3. OTPOR VALOVA .....	12
2.3.1. Smanjivanje otpora valova .....	13
2.4. OTPOR PRIVJESAKA .....	14
2.5. OTPOR ZRAKA .....	14
3. ANALIZA OTPORA BRODA KAO FUNKCIJE OBRAŠTANJA BRODA .....	16
3.1. HRAPAVOST BRODA I ANALIZA OTPORA TRENJA .....	17
3.1.1. Analiza otpora trenja .....	19
3.1.2. Proračun otpora trenja .....	20
3.1.3. Smanjivanje otpora trenja .....	22
3.2. OTPOR TRENJA UZROKOVAN HRAPAVOŠĆU BRODA .....	22
3.2.1. Hrapavost broda uzrokovana strukturalnom izvedbom broda, korozijom i izborom premaza .....	22
3.2.2. Hrapavost broda uslijed obraštanja .....	25
4. SMANJENJE OTPORA TRENJA UZROKOVANOG OBRAŠTANJEM BRODA IZBOROM ANTIVEGETATIVNE BOJE .....	26
4.1. ZAŠTITA PODVODNOG DIJELA TRUPA BRODA OD OBRAŠTANJA .....	27
4.2.1. Postepeni razvoj antivegetativnih boja kroz povijest .....	28
4.2.2. Podjela antivegetativnih boja .....	29
5. ODRŽAVANJE BRODA .....	42
5.1. ZAŠTITA PREMAZIMA .....	42
ZAKLJUČAK .....	44

LITERATURA.....	45
IZVORI .....	45
POPIS ILUSTRACIJA.....	46
POPIS TABLICA.....	47
POPIS GRAFOVA.....	48



## UVOD

Brod kao cjelina je sustav kojim je omogućeno prevesti određeni teret od polazišne točke do odredišta. Kako bi se postigla najveća efikasnost pri samom prijevozu dobara treba uzeti u obzir razne čimbenike koji utječu na njegovu maksimalnu iskoristivost. Kako brod ima hidrodinamička svojstva u njegovoj eksploataciji uvelike imaju veliki utjecaj pojave i zakoni hidrodinamike.

Brod svojim kretanjem kroz medij mora savladati određeni otpor koji se stvara kao protusila porivu koji je jedan od glavnih čimbenika njegove pokretljivosti. Pri pokušajima smanjenja otpora koji se javlja eksploatacijom broda došlo je do zaključka, nakon velikog broja istraživanja, da se na otpor broda može utjecati i da ga je moguće smanjiti i samim time poboljšati eksploatacijska svojstva broda.

Velik utjecaj na otpor broda, uz mnoge druge, ima hrapavost broda koju je potrebno smanjiti. Upotrebom antivegetativnih i antikoroziivnih premaza za zaštitu broskog trupa znatno se smanjuje otpor brodova, povećava se njihova brzina te njihova eksploatacijska svojstva postaju znatno povoljnija. Brodovlasnici upotrebom ovih premaza mogu znatno bolje iskoristiti brodove kojima raspolažu te povećavaju njihovu ekonomsku isplativost.

U ovom radu kroz pet poglavlja bit će pobliže objašnjen otpor broda te ovisnost otpora i upotrebe određene vrste antivegetativnih premaza pri njegovom smanjivanju. Prvo poglavlje koncipirano je kao uvod u pojam hidrodinamike, svojstva tekućina u kojima se brod kreće te kao objašnjenje otpora broda kao same pojave. Drugo poglavlje detaljnije objašnjava tipove otpora broda te se u trećem poglavlju detaljnije analizira otpor broda kao funkcije obraštanja broda. Četvrto poglavlje bazira se na objašnjenju raznih vrsta antivegetativnih premaza, njihov razvoj kroz povijest te njihove karakteristike. U petom poglavlju prikazana je važnost održavanja broda i metode kojima brodovlasnik određuje kako će najbolje iskoristiti brod kao eksploatacijsko sredstvo.

Znanstveno-istraživačke metode koje su korištene pri izradi ovog rada su: analiza, sinteza, metoda dokazivanja, metoda specijalizacije, generalizacije, klasifikacije te deskripcije.



# 1. POJAM HIDRODINAMIKE

Hidrodinamika je grana mehanike fluida koja se bavi proučavanjem zakona gibanja tekućina te proučavanjem zakona ravnoteže i gibanja nestlačivih tekućina i njihovim međusobnim djelovanjem u dodiru s krutim tijelom.

Prvi značajniji zakoni hidrodinamike potječu iz 17. stoljeća kada su E. Torricelli i I. Newton postavili zakon o istjecanju tekućine. U 18. stoljeću postavljene su osnove klasične teorijske hidrodinamike zakonima o gibanju idealne tekućine za što su zaslužni D. Bernoulli, L. Euler i J.L. Lagrange. O. Reynolds prvi je istražio turbulentno i laminarno strujanje viskozne tekućine te postavio jednadžbe turbulentnoga strujanja. Zakone kojima je omogućen znanstveni prilaz rješavanju oblika brodskog trupa otkrili su W. J. M. Rankine i W. Froude u 19. stoljeću, baveći se hidrodinamičkim problemima kretanja broda. Osnove zakona vrtložnoga strujanja tekućina oko uronjenoga tijela otkrio je H. Helmholtz na osnovi čega je N. J. Žukovski razvio teoriju koja je omogućila egzaktan proračun profila brodskih i zrakoplovnih propelera, zrakoplovnih krila i podvodnih tijela. L. Prandtl postavio je teoriju graničnoga sloja u 20. stoljeću, koja je omogućila jasniju predodžbu otpora trenja tijela uronjenog u tekućinu u gibanju. Zahvaljujući mnogobrojnim analitičkim i eksperimentalnim istraživanjima u prvoj polovici 20. stoljeća danas je postignut golem napredak u primjeni zakona hidrodinamike pri rješavanju problema otpora, propulzije i ponašanja brodova.

## 1.1. SVOJSTVA TEKUĆINE ILI FLUIDA

Proučavanje teorije broda kao nauke o njegovim osnovnim svojstvima, posebno dinamike broda, nemoguće je bez proučavanja same hidromehanike koja fluid definira kao materijalni medij koji posjeduje određena prirodna svojstva kao što su: neprekinutost, gustoća, stlačivost, viskoznost, kavitacija itd.

Neprekinutost je svojstvo tekućine kojim ona u potpunosti popunjava određeni volumen bez diskontinuiteta.

Gustoća tekućine u određenoj točki definira se kao odnos mase i volumena tekućine tako da je gustoća vode ( $\rho$ ) izražena kao određena masa vode ( $m$ ) podijeljena s volumenom

(V). Za slatku vodu gustoća ( $\rho$ ) iznosi  $1000 \text{ kg/m}^3$  dok za morsku vodu ima vrijednost  $1025 \text{ kg/m}^3$ .

Svojstvo tekućine da se uslijed kohezijskih sila odupire smicanju pojedinačnih slojeva kada na nju djeluje tangencijalna sila (sila koja izaziva njeno gibanje) naziva se viskoznost. Kao posljedica ovog svojstva je postojanje sile trenja između slojeva u tekućini koja se giba, odnosno površine krutog tijela i tekućine koja je s njom u dodiru. Ova sila trenja je prema Newtonu određena jednadžbom (1):

$$R = \mu \frac{dv}{dn} S \quad [\text{N}] \quad (1)$$

gdje je:

$\mu$   $dv/dn$  – tangencijalno naprezanje;

$\mu$  – dinamički koeficijent viskoznosti (ovisan o vrsti tekućine i temperaturi);

$dv/dn$  – gradijent brzine;

$S$  – dodirna površina između slojeva tekućine.

Iako je viskoznost vode relativno mala u odnosu na neke druge tekućine ona se ne može zanemariti zbog toga što je sila koja nastaje trenjem podvodnog dijela oplata broda i vode jedna od osnovnih komponenti ukupne sile otpora broda.

Stlačivost je svojstvo tekućine da pod djelovanjem vanjskih sila mijenja svoj volumen te su tekućine prema ovom svojstvu podijeljene na plinove i tekućine. Tekućine pod pritiskom zanemarivo malo mijenjaju volumen.

## 1.2. SILE U TEKUĆINAMA

Hidrodinamika se bavi proučavanjem zakona gibanja nestlačive tekućine i njenim djelovanje u dodiru sa krutim tijelom (podvodnim dijelom trupa broda). Kako bi bilo moguće shvatiti te zakone gibanja i djelovanja tekućine potrebno je upoznati i sile koje djeluju na tekućinu. Postoje unutarnje i vanjske sile koje djeluju na tekućinu. Dvije su osnovne vrste sila koje djeluju na tekućinu a to su masene ili volumenske sile i površinske sile. Masene ili

volumenske sile su one do kojih dolazi zbog prisustva mase u polju sila, dok su površinske sile one do kojih dolazi zbog dodira među česticama.

U općenitom smislu masene sile su sile inercije i moguće ih je prepoznati i kada masa miruje a nalazi se u nekom postojećem polju sila (gravitacijskih ili elektromagnetskih).

Površinske sile su sile koje se javljaju kao rezultat djelovanja susjednih čestica tekućine i neke dodirne površine. Uzajamno djelovanje čestica u nekom proizvoljnom volumenu se poništava, postoji ravnoteža. Njihovo se djelovanje prikazuje samo na granicama volumena koji se promatra kao tlak na površini uronjenog tijela, dok na slobodnoj površini postoji samo površinska napetost.

### **1.3. OTPOR BRODA**

Sve do 19. stoljeća nije bilo praktičnih pokušaja određivanja snage potrebne za održavanje brzine broda što je uzrokovano time što je do sredine tog stoljeća glavna sila za pogon bio vjetar. Na jačinu vjetra i njegov smijer nije se moglo utjecati.

Neprocjenjiv značaj za razvoj brodogradnje imala je eksploatacija broda „Great Eastern“ u čijoj je gradnji sudjelovao inženjer William Froud. „Great Eastern“ istisnine 25000 t pokazao je neophodnost određivanja pogonske snage s obzirom na zadanu istisninu i brzinu. Za svoju istisninu „Great Eastern“ je imao postavljenu veoma malu snagu od oko 2600 KS od čega se pola snage koristilo za okretanje lopatastih bočnih kola koja su bila male efektivnosti dok je druga polovica pokretala maloefektivni teški vijak. Došlo je do velikih gubitaka energije, tražena se brzina nije mogla nikako postići a troškovi korištenja broda postali su ogromni.

Potaknut tim iskustvom William Froud odlučio je otkriti ovisnost snage o brzini broda te je ispitivanjima modela broda došao do otkrića poznatog pod nazivom „Froudov zakon sličnosti“ 1868. godine.

Uz pomoć Britanskog Admiraliteta Froud stvara prvi istraživački bazen dužine 100 m, opremljen kolicima za tegljenje modela koja su se nalazila na tračnicama iznad bazena. Kolica su bila pogonjena parnim vitlom te je uz pomoć njih Froud mogao odrediti sile potrebne za tegljenje modela u bazenu određenom brzinom. Ova metoda koristi se i danas za

određivanje otpora broda i hidrodinamičkih pojava oko broda. Projektanti danas mogu uz pomoć ove metode unaprijed odrediti koja će forma trupa najbolje odgovarati željenim karakteristikama broda.

### 1.3.1. Frouдова metoda određivanja otpora broda

Jedan od glavnih čimbenika za određivanje snage je stvaranje valova pri kretanju broda ili njegovog modela što zahtjeva utrošak energije koja se smatra mjerom otpora valova. Karakteristike valova ovise o brzini, pri maloj brzini stvaraju se valovi koji su gusti i karakteriziraju ih male amplitude, dok im se povećanjem brzine broj smanjuje a veličina amplitude raste. Dinamometrom je moguće izmjeriti ukupni otpor, ali je iz ukupnog otpora nemoguće izdvojiti sam otpor valova. Uz otpor valova postoji i otpor trenja koji također utječe na ukupan otpor broda pri kretanju kroz medij. Otpor trenja uz otpor valova nije nikako zanemariv te će pomnije biti obrađen kroz ovaj rad.

Otpor trenja Froud počinje ispitivati tegljenjem tankih dasaka različitih dužina okomito ispod površine vode. Stvaraju se zanemarivo mali valovi te je time praktično zanemariv utjecaj otpora valova. Froud koristi daske prekrivene raznim materijalima (pijeskom, platnom, parafinom itd.) kako bi izdvojio faktore koji utječu na otpor trenja. Koristi daske različite hrapavosti kako bi dokazao da hrapavost površine ima veliki utjecaj na otpor trenja. Pri svom eksperimentu dolazi do zaključka da na otpor trenja utječu razni faktori kao što su:

- brzina,
- veličina površine,
- hrapavost površine,
- viskoznost i
- gustoća vode.

Nakon ovih zaključaka Froud dolazi do formule kojom se može opisati otpor trenja, a ona glasi (2):

$$R_F = f \Omega v^n \quad (2)$$

gdje je:

$\Omega$  – oplakana površina,

v – brzina,

f i n – konstante koje ovise o hrapavosti površine i duljini ploče.

Tegljenjem ploče doređuje se koeficijent trenja f, dok eksponent n iznosi 1,825 što je dobiveno kroz daljnja ispitivanja i istraživanja ove teorije.

Pretpostavka do koje je istraživanjima došao Froud govori da je preostali otpor (otpor valova, virova i zraka) kod brodova slične forme i odgovarajuće istisnine proporcionalan njihovoj veličini, odnosno istisnini, a izračunati se može kao razlika ukupnog otpora modela i otpora trenja modela te se proporcionalnim uvećanjem dobiva iznos preostalog otpora za željeni brod.

Kako bi dokazao ovu teoriju 1872. godine Froudeu je na raspolaganje stavljen brod „Greyhound“ na kojemu je mogao izvršiti praktična ispitivanja. Potvrdio je svoju pretpostavku uz razumljiva odstupanja koja su nastala zbog hrapavosti površine trupa broda i njegovog obraštanja. Ranije spomenuta odstupanja bila su prihvatljiva s obzirom da u vrijeme Froudovih istraživanja nije bilo dovoljno preciznog načina kojim bi se odredili i ti čimbenici.

#### **1.4. PROPULZIJA BRODA**

Pogonskom snagom koju stvara brodski pogonski stroj potrebno je savladati silu otpora gibanja broda putem oslobađanja energije. Propulzor je uređaj za pokretanje broda tj. uređaj na koji se prenosi snaga pogonskog stroja. Sila koja se stvara djelovanjem propulzora zove se poriv. Poriv se brodu predaje od propulzora preko osovine i odzivnog ležaja. Otpor broda svladava se djelovanjem sile poriva, iz čega proizlazi da su poriv i otpor dvije vektorske veličine jednakog iznosa, suprotnog smjera. Sila poriva nije nikada jednaka izračunatoj sili otpora te zbog toga porivna sila mora biti veća od otpora broda dobivenog tegljenjem modela.

Danas se najčešće, kao izvori pogonske snage za pokretanje vijka, koriste dizel motori, parne i plinske turbine. U pogonu brzih brodova sve se češće koristi kombinacija dizel motora i plinskih turbina. Tom kombinacijom znatno se smanjuju negativne osobine navedenih izvora pogonske snage. Dizel motor je ekonomičniji pri manjim brzinama ali zahtjeva veliki prostor pri ugradnji na brodove, dok parne turbine mogu vrlo brzo razviti veliku snagu, a time i velike brzine, ali su manje ekonomične od dizel motora.

## 2. ANALIZA OTPORA BRODA

Otpor broda dijeli se na slijedeće komponente:

- Otpor valova (*Wave-making resistance*),
- Otpor trenja (*Frictional resistance*),
- Otpor virova (*Eddy-making resistance*),
- Otpor zraka (*Air resistance*) i
- Otpor privjesaka (*Appendage resistance*).

Otpor trenja i otpor forme posljedica su viskoznosti tekućine što je vidljivo u pojavi graničnog sloja uz površinu tijela i pojavi virova iza tijela koje je u tekućini. Upravo zbog navedenih pojava ove dvije komponente otpora mogu se nazvati i viskoznom komponentom otpora.

U svom kretanju kroz medij tijelo stvara valove u blizini slobodne površine te su oni posljedica promjene tlakova duž tijela što dovodi do promjene slobodne površine. Na taj način tijelo stvara određen otpor koji djeluje kao tlačna sila na tijelo u mediju. Kao posljedica razlike tlakova stvara se otpor valova.

Sa stajališta Frouдове metode određivanja otpora, otpor golog trupa broda može se podijeliti na otpor trenja i preostali otpor, te je izražen ovom formulom (3):

$$R = R_F + R_R = R_F + (R_V + R_W) \quad (3)$$

gdje je:

$R_F$  – otpor trenja,

$R_R$  – preostali otpor koji se dobije sumom otpora valova i otpora forme.

Otpor virova  $R_W$  je otpor koji se javlja u ovisnosti od punoće forme i duljine krmenog završetka broda.

Ovom formulom opisan je otpor golog trupa modela, bez izdanaka koji se nalaze na trupu broda kao što su kormilo, skrokovi, statve kormila, osovine, nogavice, ljujne kobilice i drugi. Navedeni izdanci stvaraju dodatni otpor izdanaka  $R_P$ .

U obzir je nadasve važno uzeti i otpor zraka  $R_Z$  jer se brod gibanjem kroz vodu giba i kroz zrak. Pri stvaranju otpora zraka prisutne su pojave koje su prisutne i pri stvaranju otpora kroz vodu (trenje, valovi, virovi) ali u znatno manjoj mjeri.

Dakle, za zaključiti je da je ukupni otpor broda  $R_T$  zbroj svih navedenih otpora, te se može izraziti kao (4):

$$R_T = R_F + R_V + R_W + R_P + R_Z \quad (4)$$

gdje je:

$R_T$  – ukupni otpor broda,

$R_F$  – otpor trenja,

$R_V$  – otpor valova,

$R_W$  – otpor forme

$R_P$  – otpor izdanaka,

$R_Z$  – otpor zraka.

## 2.1. OTPOR TRENJA

Otpor trenja je, pri eksploataciji broda, najvažnija komponenta ukupnog otpora broda jer iznosi od 50% do 90% ukupnog otpora broda. Javlja se kao posljedica viskoznosti broda, te se opisuje kao posljedica tangencijalnih naprezanja između brodske oplata i čestica tekućine uz pojavu graničnog sloja. Zbog viskoziteta postoji masa medija koju brod „vuče“ dok napreduje kroz medij. Energija potrebna za to „vučenje“ je rad koji vrši brod protiv otporu trenja.

Još prije Froudovih istraživanja bilo je poznato da otpor trenja ovisi o hrapavosti vanjske oplata broda, veličini podvodne površine, gustoći medija u kojem se brod giba, brzini te dužini broda. Njegova istraživanja nisu dala dovoljno saznanja o karakteru strujanja i njegovom utjecaju na otpor trenja.

Godine 1888. Reynolds eksperimentirao je sa strujanjem vode u cijevima te je došao do zaključka da u dodiru sa stijenkom cijevi pada brzina gibanja tekućine. Tako je dio tekućine koji je u dodiru sa krutom stijenkom i lijepi se za nju, ovisno o udaljenosti od površine, nazvan „granični sloj“. Daljnjim istraživanjima ustanovljeno je da se karakter strujanja ne mijenja kada postoji konstantan odnos između duljine površine po kojoj tekućina struji, brzine strujanja, viskoziteta i gustoće tekućine te je to definirano kao Reynoldsov broj. On se dobiva računski iz odnosa duljine površine po kojoj struji tekućina ( $L$ ), brzine strujanja ( $V$ ), viskoziteta ( $\mu$ ) i gustoće tekućine ( $\varphi$ ). Matematički se izražava kao (5) i (6):

$$R_n = V \frac{L}{\nu} \quad (5)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\varphi} \quad (6)$$

Gdje je:

$R_n$  – Reynoldsov broj,

$V$  – brzina strujanja,

$L$  – površina po kojoj struji tekućina,



$\mu$  – viskozitet,

$\varphi$  – gustoća tekućine.

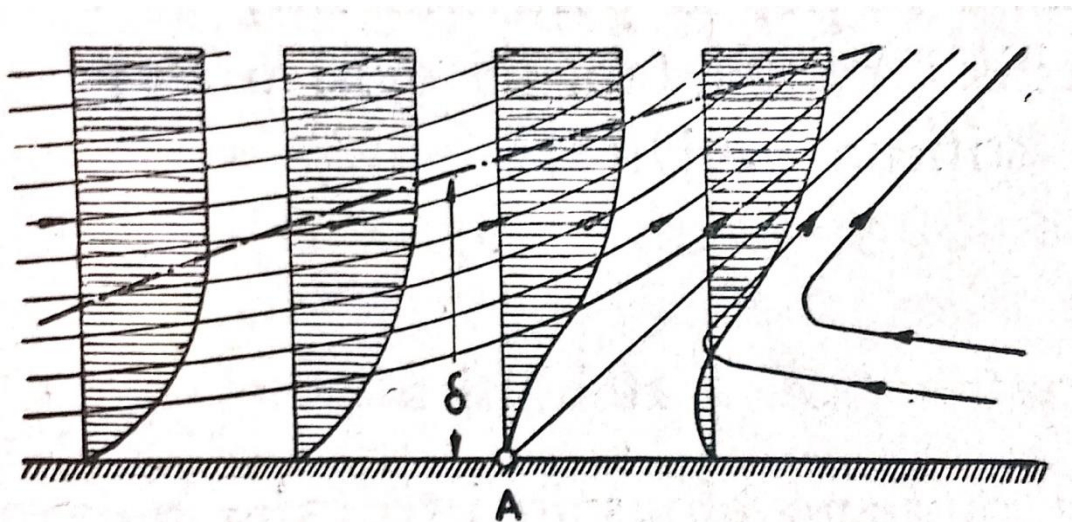
Puštanjem boje u staklenoj cijevi i promatranjem strujanja tekućine tj. povećanjem  $R_n$ , Reynolds je došao do spoznaje da do neke određene veličine dolazi do promjene karaktera strujanja. Danas je to poznato kao kritični Reynoldskov broj  $R_{nkr}$  dok je ta pojava poznata kao prijelaz sa laminarnog na turbulentno strujanje. Ova spoznaja bila je od velike važnosti za određivanje otpora trenja jer je važno znati pri njegovom određivanju radi li se o laminarnom ili turbulentnom strujanju.

## 2.2. OTPOR FORME ILI VIROVA

Otpor forme ili virova nastaje zbog tri glavna razloga. Jedan od razloga je to što se uslijed zakrivljenosti broskog trupa mijenja brzina strujanja duž trup broda čime dolazi i do promjene tlaka. Od sredine se brzina povećava te se prema krmu smanjuje. Što je forma trupa punija i tuplja navedeno je povećanje veće. Ako se forma trupa broda okarakterizira odnosom duljine broda i njegove širine za zaključiti je da se brodovi mogu podijeliti na: brodove vitkih formi i brodove punih formi. Kod brodova vitkih formi odnos  $L/B$  je veći od 8, dok je kod brodova punih formi manji od 8.

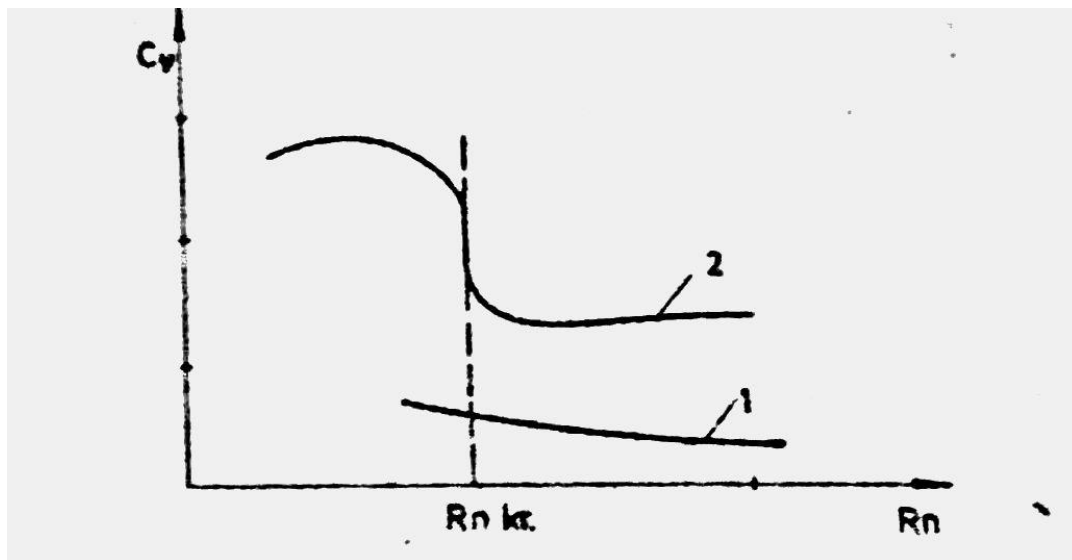
Drugi razlog nastajanja otpora forme ili virova je taj što granični sloj prema krmu ima najveću debljinu. Time se prividno produžuje forma krme kada se gleda odnos sa potencijalnim strujanjem izvana. Prividnim povećanjem debljine na krmu stvara se povišeni tlak koji je protuteža povišenom tlaku na pramčanom dijelu broda pri strujanju. Samim time dolazi i do povećanja otpora te se taj otpor naziva otpor viskoznog tlaka.

Loše konstruirana forma trupa broda ima za posljedicu pojavu pri kojoj granični sloj ne sklizne glatko niz krmu, nego u određenoj točki dolazi do otkidanja u formi vrtloga koji ostaju za brodom kao što je prikazano na slici broj 1.



Slika 1. Strujanje u graničnom sloju u podožju točke otkidanja

Do ove pojave dolazi kada je zakrivljenost trupa prema krmi pre nagla pa voda nije ne može pratiti te nagle promjene nego se odvaja i udaljuje od trupa. Pri ovom odvajanju nastaje praznina koja se ispunjava vrtložnom vodom koja nastaje zbog strujanja. Energiju koja je potrebna za stvaranje virova virovi odnose sa sobom te dolazi do velikih gubitaka. Otpor koji zbog toga nastaje zove se otpor virova ili otpor otkidanja. Otpor virova zaslužan je za konstantnu promjenu tlaka na krmi broda te njegovu raspodjelu duž trupa. Utjecajem na promjenu tlaka utječe i na jačinu viskoznog otpora i otpor trenja na krmenom dijelu broda. Na ovu promjenu najviše utjecaja ima duljina krmenog zaoštrenja ( $L_K$ ). Na slici broj 2. prikazane su krivulje koeficijenta otpora dobrog i lošeg opstrujavanja forme u funkciji  $R_n$ .



Slika 2. Kvalitativna razlika između dobro i loše opstrujavane forme broda gdje je:

1- krivulja koeficijenta otpora dobro opstrujavane forme,

2- krivulja koeficijenta loše opstrujavane forme

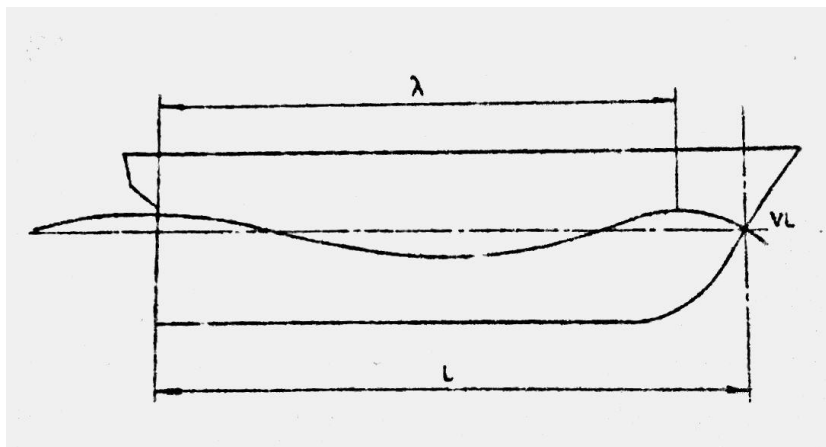
Smanjenje otpora virova može se postići konstruiranjem dobre hidrodinamičke forme trupa i izdanaka koji će se na tom trupu nalaziti te smanjenjem hrapavosti površine trupa koja također povećava otpor virova.

### 2.3. OTPOR VALOVA

Otpor valova nastaje na površini vode koja se odupire promjeni svog stanja tj. kada brod svojim vlastitim gibanjem stvara valove. Podizanje i spuštanje slobodne površine uzrokovano je valovima koji nastaju kao rezultatrazlike tlakova koja se javlja duž oplakane duljine broskog trupa. Ovom pojavom dolazi do gubitka velikog dijela energije koja je potrebna za svladavanje gravitacijskih sila koje djeluju na čestice tekućine. Dakle, otpor valova se definira kao sila koja održava stvoreni sistem valova koji se širi duž broda i putuje sa brodom, a njegova je energija jednaka energiji koja je dobivena radom brodskih pogonskih strojeva.

Brzina današnjih brodova veoma je ograničena zbog postojanja otpora valova. Promatranjem odnosa duljine broskog trupa i duljine vala moguće je odrediti granicu

maksimalne brzine deplasmanskog broda. Ta granica, u praksi, nastaje kada je duljina vala približno jednaka duljini broda na vodenoj liniji, kao što je prikazano na slici broj 3.



Slika 3. Prikaz maksimalne brzine deplasmanskog broda

### 2.3.1. Smanjivanje otpora valova

Otpor valova uvelike je moguće smanjiti, ali ne i sasvim izbjeći, izmjenom duljine ili brzine broda te time osiguranjem povoljne interferencije poprečnih valova. Moguće ga je smanjiti povećanjem brzine broda, dakle, povećanjem snage pogonskih strojeva. Glisiranje ili plovidba na podvodnim krilima ili zračnom jastuku znatno može smanjiti otpor valova. Naime, najveće smanjenje otpora valova moguće je postići dobrim izborom forme i dimenzija trupa, osobito forme pramca i krme.

Neki od načina smanjenja utjecaja otpora valova kod bržih brodova punije forme su i ugradnja pramčanog bulba kojemu je glavna svrha izmjena pritisaka na pramčanom ili krmenom dijelu broda. Postavljanje peraja, kod nekih brodova, na pramčanom dijelu moguće je postići smanjenje utjecaja valova te time i smanjenje otpora valova. Kao način smanjenja otpora valova moguće je iskoristiti i mogućnost gradnje višetrupnih brodova kao što su katamarani. Međutim, gore navedenim načinima moguće je smanjiti otpor valova ali ga nije moguće u potpunosti otkloniti.

## **2.4. OTPOR PRIVJESAKA**

Privjesci ili izdanci su detalji na trupu koji izlaze izvan obrisa trupa broda. U privjeske spadaju dijelovi kao što su:

- Ijuljne kobilice,
- propulzori,
- osovine propelera,
- skrokovi,
- nogavice,
- zaštite propelera i dr.

U odnosu na otpor golog trupa broda, izdanci uzrokuju povećani otpor viskoznog karaktera koji može iznositi od 2% do 30% ovisno o brzini, veličini broda, broju vijaka te broju ostalih izdanaka.

Kako bi se otpor privjesaka što je više moguće smanjio potrebno je projektirati hidrodinamičku formu izdanaka i pravilno ih postaviti uzimajući u obzir smijer strujanja duž trup broda.

## **2.5. OTPOR ZRAKA**

Otpor zraka i vjetra najveći utjecaj ima na dadvodni dio trupa broda, nadgrađe. Sastoji se od dvije komponente, otpor forme i otpor trenja. Otpor trenja kod ove vrste otpora dolazi do većeg značaja pogotovo kod suvremenijih većih i bržih brodova sa velikim nadgrađima na kojima se nalazi puno opreme i uređaja.

Dokazano je da je otpor zraka najveći kod kuteva između vektora relativne brzine vjetra i simetrale broda od 25° do 40°.

Smanjenje otpora zraka moguće je konstrukcijom u kojoj su nadgrađa niža i strujnog oblika. Stepeničastim povezivanjem više nadgrađa u jednu cjelinu, na većim brodovima,

moguće je postići smanjenje otpora zraka. Također, veoma bitan čimbenik u smanjenju otpora zraka je prilagođen kurs broda smijeru vjetra kako bi on bio što povoljniji.

### **3. ANALIZA OTPORA BRODA KAO FUNKCIJE OBRAŠTANJA BRODA**

Obraštanje podvodnog dijela trupa broda je pojava koja se može podijeliti u dvije kategorije:

- makroobraštanje (stvaraju ga životinje i biljke) i
- mikroobraštanje (stvara se ljepljiva smjesa bakterija i drugih organizama).

Biljke i životinje lakše prijanjaju na trup broda od mikroorganizama, a ukoliko podvodni dio nije zaštićen od obraštanja brod može nakupiti i do  $150\text{kg/m}^2$  mase u manje od šest mjeseci boravka u moru. Glavna zaštita protiv obraštanja je nanošenje antivegetativne zaštite na podvodni dio trupa broda. Naime, brodovi kojima nije obrašćen podvodni dio trupa plove brže i troše manje goriva. Kako bi se postigla što bolja eksploatacija broda, on mora stvarati što manji otpor, što se može osigurati redovitom antivegetativnom i antikorozivnom zaštitom.

Obraštanje smanjuje brzinu broda za 10-15% i povećava njegov otpor uz jednaku snagu porivnog stroja. Brodovlasnik ostvaruje uštedu u novcu korištenjem sredstava protiv obraštanja zbog slijedećih razloga:

- brod će provesti manje vremena u dokovanju ako brodovlasnik koristi antivegetativnu zaštitu,
- otpor broda i potrošnja goriva znatno su manji kod neobraštenih brodova,
- dulji vremenski rok brod može provesti u eksploataciji bez dokovanja te
- nekorištenjem antivegetativne zaštite dolazi do oštećenja boje a samim time i do povećanja korozije.

### 3.1. HRAPAVOST BRODA I ANALIZA OTPORA TRENJA

Određeno vrijeme nakon dokiranja broda posebno se primjećuje utjecaj hrapavosti kada podvodni dio broda postaje obrašten školjkama. Otpor trenja u ovisnosti o hrapavosti broda istraživali su mnogi naučnici nakon Frouda kako bi dokazali utjecaj hrapavosti na tu vrstu otpora.

Pokusima na pontonima Kempf je dokazao da otpor trenja mogu izazvati i uvelike povećati i male hrapavosti raspoređene duž površine velike duljine te je prema njegovim zaključcima vrlo važan raspored hrapavosti po duljini broda.

Nikuradse je provodio pokuse mjereći otpor u cijevima sa raznim stupnjem relativne hrapavosti te je na osnovu tih pokusa i mjerenja Plandt razradio diagram u kojem je iznio teoriju ovisnosti koeficijenta trenja  $\lambda_d$  i broja  $R_e$  za razne odnose između radijusa cijevi i visine hrapavosti. Te je za zaključiti da utjecaj hrapavosti na trenje djeluje nakon određene vrijednosti  $R_e$ , koja ovisi o stupnju hrapavosti. Daljnjim porastom  $R_e$  postupno se povećava utjecaj hrapavosti na koeficijent trenja. Kada koeficijent trenja dostigne određenu vrijednost više ne raste u ovisnosti od  $R_e$  već ostaje konstantan. Objašnjenje ove pojave je to da dok je visina hrapavosti niža od laminarnog podsloja ne mijenja se način strujanja i u tom trenu otpor trenja više ne ovisi o hrapavosti. Debljina laminarnog podsloja pada porastom  $R_e$ . Kada debljina laminarnog podsloja postane manja od pojedinih visina hrapavosti mijenja se način stvaranja virova. Promjenom načina stvaranja virova raste otpor trenja u usporedbi sa otporom trenja glatke ploče. Onog trena kada  $R_e$  postigne veliku vrijednost pri kojoj hrapavost potpuno prodire izvan laminarnog podsloja, nastaje razvijeni turbulent. Dakle, daljnjim porastom  $R_e$  više se ne povećava koeficijent otpora trenja.

Kempf je došao do zaključaka da normalno bojani brod ima hrapavost koja iznosi  $k_s=0,16 - 0,35$  mm. Samom bojanju zrnčana hrapavost iznosi  $k_s=0,20$  mm, dok šavovi stikovi i zakovice daju hrapavost iznosa  $k_s=0,08$  mm. Te je došao do prosjeka hrapavosti za cijeli brod koja iznosi  $k_s=0,25$  mm.

Taylor smatra da pri obraštanju oplata otpor trenja raste za 0.5% svaki dan nakon dokiranja. Barillon je došao do saznanja da je taj iznos 0,2% po danu nakon dokiranja. Pošto postoje još mnogi čimbenici koji utječu na obraštanje podvodnog dijela trupa, kao što je slanost mora, podneblje u kojem se brod nalazi te o njegovoj funkciji (nalazi li se vezan u luci ili je u plovidbi) za zaključiti je da otpor trenja izazvan hrapavošću nije nimalo lako



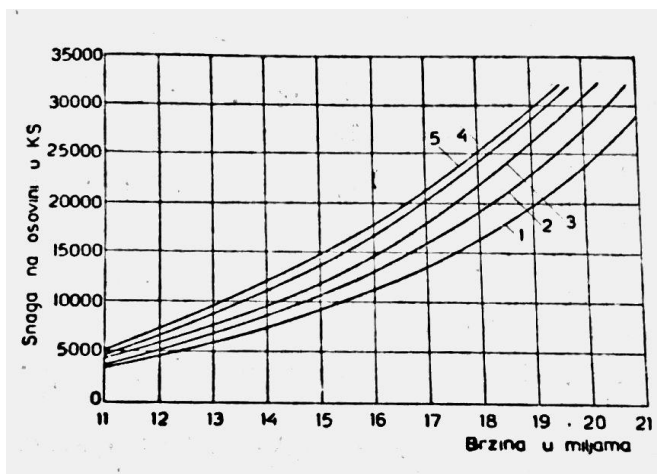
odrediti. Kako bi bilo lakše proučiti ovaj problem kroz idući odlomak bit će navedeni neki primjeri brodova iz literature i prikazan njihov porast otpora nakon određenog broja dana od kada su brodovi dokirani.

Otpor broda „Cairo“ povećao se za 20% 2 mjeseca nakon dokiranja pri čemu je brod izgubio na brzini za 1 čv. Talijanskom parobrodu „Scilla“ povećao se otpor za 6.5% nakon 19 dana te 18% nakon 56 dana. Na brodu istisnine 15 000 t se nakon 100 dana plovidbe otpor povećao za 35%.

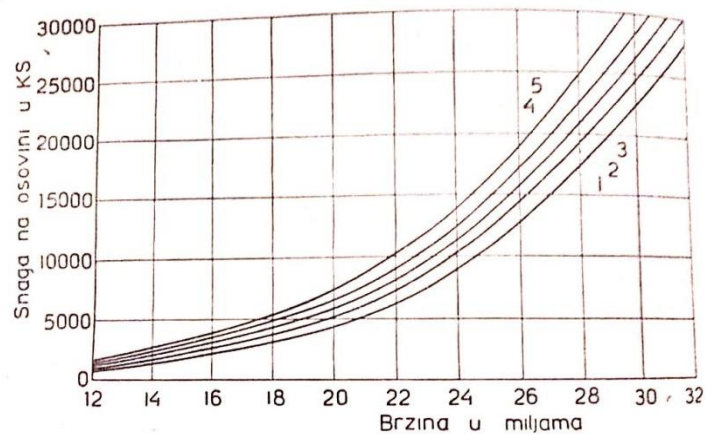
Analizom podataka razarača u Atlantskom oceanu i bojnog broda na Pacifiku, koje je proučavao Taylor, došao je do zaključka da koeficijent trenja kod većih brzina iznosi:

- $\Delta\zeta_f = 3,6 * 10^{-3}$  za razarač 8 mjeseci nakon dokiranja i
- $\Delta\zeta_f = 2,4 * 10^{-3}$  za bojni brod 10 mjeseci nakon dokiranja.

Na grafu broj 1. prikazane su snage na osovini u KS bojnog broda od 32 000 t i brzine u čvorovima, dok graf broj 2. prikazuje snage na osovini u KS razarača duljine 95 m i brzinu koju postiže u čvorovima.



Graf 1. Prikaz snaga na osovini u KS bojnog broda od 32 000 t i brzine koje postiže u čv



Graf 2. Prikaz snaga na osovini u KS razarača duljine 95 m i brzina u čv

U Americi su postavljeni pokusi (*Miss Entee*) 1915. godine gdje je 12 ploča obješeno u more i svaki mjesec se jedna ploča vadila iz mora kako bi se izvršio pokus tegljenja te kako bi se izmjerili otpori. Na bojni brod, istisnine 32 000 t i maksimalne brzine 27 čv, primjenjeni su ovi izračuni otpora. Ovom primjenom došlo se do sljedećih podataka prikazanih u tablici broj 1.

Tablica 1. Promjene otpora ploče sa strujanjem u moru

Vrijeme nakon dokiranja [mjesec]	0	2	3	6	9	12
Brzina [čv]	27	26	24,5	23,6	23	22,5
Gubitak brzine [čv]	0	1	2,5	3,4	4	4,5
Gubitak brzine [%]	0	4	9	13	15	17

### 3.1.1. Analiza otpora trenja

Veliki broj eksperimenata koje je proveo Reynolds uvelike su pomogle u shvaćanju problema otpora trenja. Naime, on je promatrao strujanje vode u cijevima u koje je ubacivao boju na izvoru strujanja. Tim eksperimentima primjetio je da boja ide paralelno s površinom cijevi te se kasnije miješa s vodom. Zaključio je da udaljenost koju boja prijeđe prije miješanja s vodom ovisi o brzini strujanja vode. Tako je brzinu pri kojoj se boja miješa sa vodom nazvao kritična brzina  $V_c$ . Nadalje, zaključio je da se kada je brzina bila takva da se boja ne miješa sa vodom već se giba paralelno uz cijev, radi o laminarnom

graničnom sloju, a ako je početna brzina bila velika, koja bi se našla u turbulentnom graničnom sloju. Dakle, povećanjem brzine strujanja, laminarno strujanje prelazi u turbulentno. U turbulentnom strujanju čestice se gibaju bez određenog smijera gibanja (nasumično), dok se kod laminarnog gibanja kreću uz cijev. Strujanje oko broda u osnovi je turbulentno uglavnom zbog hrapave površine trupa. Otpor trenja je funkcija hrapavosti površine i brzine fluida koji struji preko površine.

Kada se Reynoldsova opažanja primjene na model broda glatke površine koji se tegli malom brzinom u bazenu dolazi do zaključka da se radi o laminarnom gibanju. Ukoliko se poveća brzina točka prelaza laminarnog strujanja u turbulentni pomiče se prema pramcu. Ako se brzina i dalje povećava točka prelaza pomiče se i dalje dok se cijeli model ne počne gibati turbulentno. Debljina graničnog sloja povećava se od pramca prema krmi. Unutar graničnog sloja brzina od glavnog rebra prema krmi pada i u određenoj točki krmenog završetka može doći do otkidanja graničnog sloja te dolazi do pojave virova. Veličina broda, brzina i hrapavost podvodnog dijela trupa broda glavni su čimbenici koji utječu na položaj točke prijelaza iz laminarnog u turbulentno gibanje.

### 3.1.2. Proračun otpora trenja

Proračun otpora trenja vrši se preko koeficijenta otpora trenja  $C_F$  glatke ploče do kojeg se došlo istraživanjima i velikim brojem eksperimenata u ovom polju. Otpor trenja glatke površine izražava se kao (7):

$$R_F = D_F \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad [N] \quad (7)$$

gdje je:

$C_F$  – koeficijent trenja ovisan o  $R_n$ ,

$\rho$  – gustoća [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$S$  – oplakana površina [ $\text{m}^2$ ],

$L$  – duljina na vodenoj liniji [m] i

$\nu$  – kinematski koeficijent viskoznosti (za morsku vodu  $\nu = 1,18831 \cdot 10^{-6}$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]).

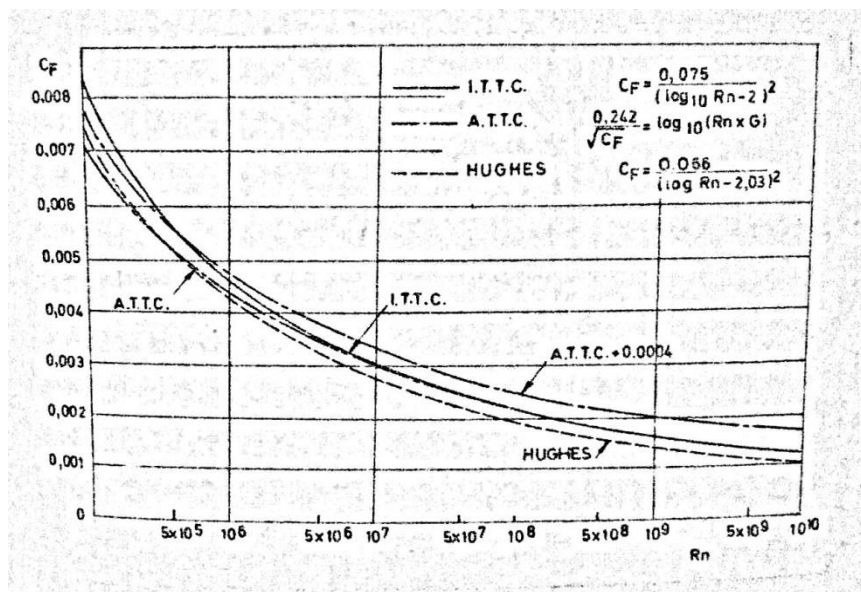
Prema ITTC – 57 (*International Towing Tank Conference*, Madrid 1957. ) koristi se slijedeća formula za izračun koeficijenta otpora trenja  $C_F$  (8):

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (8)$$

dok po ATTC-u (*American Towing Tank Conference*) glasi (9):

$$C_F = \frac{0,066}{(\log R_n - 2,03)^2} \quad (9)$$

Na grafu 3. predočena je krivulja  $C_F$  u odnosu na  $R_n$ .



Graf 3. Krivulja  $C_F$  u odnosu na  $R_n$

Krivulja ITTC – 57 nema teoretskog objašnjenja već je dogovoreno na VIII međunarodnoj konferenciji ispitanih bazena da će se, radi usklađivanja podataka dobivenih na modelu sa stvarnim brodom, na vrijednosti dobivene ovom formulom nadodati „dodatak za korelaciju model-brod“ (*model-ship correlaton line*)  $C_A$ . U ovom dodatku sadržani su brojni faktori kao što su: hrapavost brodske oplata, veličina ispiživanog modela, način postizanja turbulentnosti, utjecaj stijena i dna bazena te primjena metode ekstrapolacije.

### **3.1.3. Smanjivanje otpora trenja**

U procesu projektiranja broda može se utjecati na smanjenje otpora trenja odabirom povoljne forme broda te smanjenjem hrapavosti podvodnog dijela trupa broda i izdanaka. Na otpor trenja može se znatno utjecati utjecajem na hrapavost. Kada hrapavost površine podvodnog dijela brodske oplata postane prevelika zbog slojeva stare boje i lokalnih ogrebotina zbog struganja oplata o hridi i razne plutajuće prepreke, cijeli podvodni dio oplata se čisti, odstranjuje se kompletna hrđa i boja, te se nanosi nova boja. Ovim načinom održavanja broda znatno se smanjuje hrapavost podvodnog dijela trupa broda te se smanjuje otpor trenja.

## **3.2. OTPOR TRENJA UZROKOVAN HRAPAVOŠĆU BRODA**

### **3.2.1. Hrapavost broda uzrokovana strukturalnom izvedbom broda, korozijom i izborom premaza**

Postoje dva glavna uzroka nastanka hrapavosti broda, a to su:

- dotrajalost oplakane površine zbog vremena kao trajni proces i
- biološki obraštaj koji se promatra kao privremeni proces.

Strukturalna hrapavost nastaje zbog načina spajanja limova brodske oplata, bilo da su oni zakovani ili zavareni, zbog načina konstrukcije valovitosti između rebara te različitih otvora koji se na oplati nalaze. Također se ona javlja kao posljedica deformacija na limovima oplata broda. Od velike je važnosti smanjenje strukturalne hrapavosti u pokušaju smanjenja cijelog otpora broda.

Hrapavost premaza definira se kao hrapavost koja nastaje izborom lošeg i nekvalitetnog premaza. Premazi grubog sastava će općenito uzrokovati veći otpor trenja. Ako su uz to premazi grubog sastava naneseni i razmazani na nepravilan i nekvalitetan način trenje će se još dodatno povećati. Međutim, i kod odabira premaza finog sastava, ukoliko je način njegove primjene loš, također može doći do povećanja hrapavosti broda a time i otpora trenja.

Kemijski proces koji stalno nagrizi metalne materijale, korozija, uzrokuje oštećenja na brodskoj oplati. Skidanjem ili pucanjem slojeva premaza nanešenih na oplati broda lako dolazi do korozije koja uzrokuje dodatnu hrapavost brodske oplate. Redovitim održavanjem broda, njegovim dokovanjem, bojanjem i anodnom zaštitom moguće je utjecati na ovaj uzrok hrapavosti.

Korozioni procesi klasificirani su kroz četiri procesa, te se dijele prema slijedećim kriterijima:

- prema mehanizmu procesa,
- prema toku korozije i
- prema karakteru korozionih oštećenja materijala.

Prema mehanizmu korozionog procesa, korozija se može razvrstati u kemijsku i elektrokemijsku koroziju. Kemijska korozija je spontano razaranje konstrukcijskog materijala zbog kemijskog djelovanja u odnosu na okolinu. Glavni razlog njenog nastajanja je nastajanje oksidacije i redukcije u isto vrijeme, na istom mjestu, a javlja se u „vrućim“ plinovima i tekućim elektrolitima. Kao glavni primjeri kemijske korozije ističu se: razaranje stijenki i klipova motora s unutarnjim izgaranjem, oštećenje na stijenkama tankova i cjevovoda i dr.

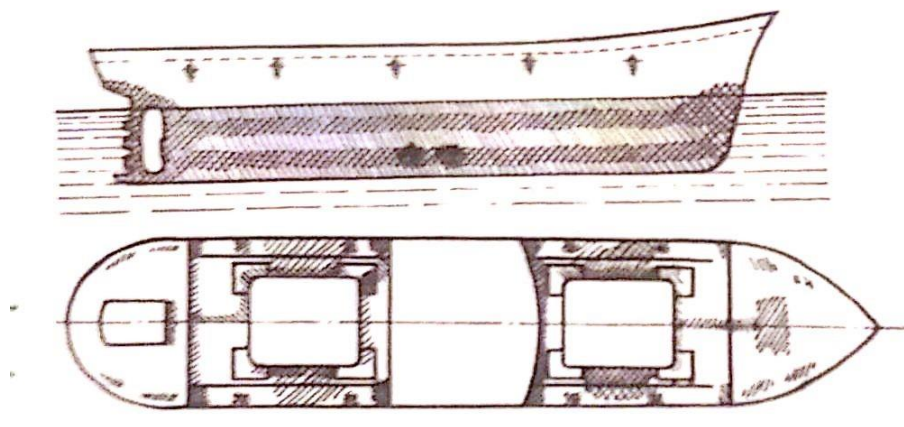
Elektrokemijska korozija nastaje zbog termodinamičke nestabilnosti metala koji je u korozionim uvjetima, odvija se po zakonima elektrokemijske kinetike uz tok električne struje. Dva najznačajnija tipa elektrokemijske korozije u morskoj sredini su: korozija u neutralnim elektrolitima (morska voda) i korozija u vlažnim atmosferama (morska atmosfera).

### ***3.2.1.1. Korozija u brodarstvu***

U morskoj sredini se od svih konstrukcija koje se eksploatiraju najviše ističu brodovi. Prema korozionim uvjetima podvodni dio trupa broda dijeli se na pramčani dio, krmeni dio, bokove i dno broda. Pramčani dio broda najviše je izložen hidrodinamičkim djelovanjima morske vode što je najviše izraženo kod brzih brodova. Pri velikim brzinama olakšan je pristup kisika površini broda čime se ubrzava korozija. Kada brod plovi zahvaća veću količinu mjehurića kisika koji dospjevaju i do nižih dijelova oplate dok su uronjeni bočni dijelovi trupa broda manje izloženi hidrodinamičkom djelovanju, ali su više izloženi

mehaničkim oštećenjima do kojih može doći prilikom pristajanja ili vezivanja broda u luci. Ukoliko dođe do oštećenja na premazima protiv korozije lako dolazi do razvoja ovog procesa. Krmeni je dio broda izložen hidrodinamičkim djelovanjima, ali su ona kud i kamo manja nego na pramcu zbog smještaja brodskih propelera i kormila.

Jačina korozije prvobitno najviše ovisi o: stanju površine limova, načinu i izvedbi spojeva, vrsti i broju podvodnih izdanaka, brzini broda, području na kojem se brod nalazi, režimu plovidbe te uvjetima održavanja. Na slici broj 4. prikazan je intenzitet korozionih oštećenja podvodne brodske oplata i vanjske palube u odnosu na ovisnosti brodske konstrukcije i uvjete eksploatacije.



Slika 4. Prikaz intenziteta oštećenja podvodne brodske oplata i vanjske palube s obzirom na osobitosti konstrukcije u uvjeta eksploatacije

### ***3.2.1.2. Zaštita od korozije***

Kako bi se brod pravilno zaštitio od korozije potrebno je pravilno izabrati materijal, izolirati površine materijala od neposrednog djelovanja agresivne okoline, spriječiti anodne polarizacije (otapanje metala u elektrolitu), oblikovati konstrukcijske detalje i spojeve tako da korozija ima na njih što manje utjecaja, te sniziti agresivnost okoline, u kojoj se brod nalazi, raznim dodatcima ili postupcima. Koroziju je moguće značajno smanjiti legiranjem, izoliranjem, sprječavanjem anodne polarizacije i elektrokemijskom (katodnom) zaštitom.

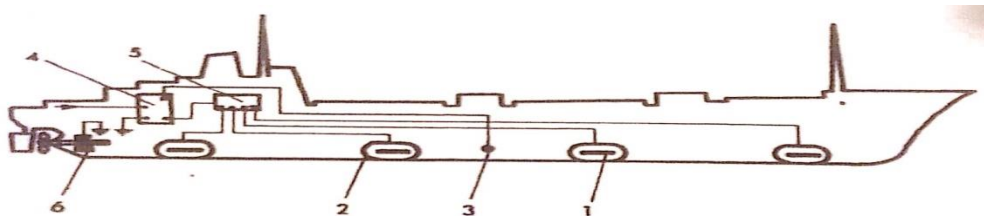
Legiranje je proces u kojem se u sastav metala dodaje neki drugi materijal, metalni ili nemetalni kako bi se smanjila korozivna svojstva tog materijala.

Izoliranje od agresivne sredine, jedan je od načina smanjenja korozije tako što se raznim organskim prevlakama (premazi boje, polimerne prevlake, konzervansi) ili

neorganskim prevlakama (metalne ili nemetalne prevlake) odvaja metal od agresivne površine te se smanjuje pojava korozije na samom metalu.

Sprječavanje anodne polarizacije provodi se električnim razdvajanjem metala u kontaktu, snižavanjem razlike elektrodnih potencijala, drenažom struja pomoću dobro spojenih i uzemljenih generatora za zavarivačke radove.

Elektrokemijska (katodna) zaštita koja je zasnovana na elektrokemijskoj prirodi korodiranja. Dio konstrukcije koji se želi zaštititi spoji se sa elektrodama koje u okolini generiraju stalan tok struje u morskoj vodi koje teku prema području koje se želi zaštititi od korozije. Kada struja poprimi odgovarajuću gustoću, a kada se postigne odgovarajuća katodna polarizacija, čitava metalna konstrukcija postaje katodna i prestaje korodirati. Slika broj 5. prikazuje shemu katodne zaštite s vanjskim izvorom struje i uređaj za automatsku regulaciju.



Slika 5. Shema katodne zaštite s vanjskim izvorom struje i uređaj za automatsku regulaciju

1- anoda; 2- štiti; 3- referentna elektroda; 4- izvor struje; 5- razvodnik;

6- četkice za spoj propelera i osovine uz masu broda

### 3.2.2. Hrapavost broda uslijed obraštanja

Kako je već prije navedeno obraštanjem broda, odnosno nakupljanjem morske flore i faune na oplati broda, povećava se hrapavost brodske oplata a time ujedno i otpor trenja. Ovaj proces je dugotrajan i ovisi o vremenu koje brod provede u plovidbi te najviše o vremenu pasivne uporabe u luci jer je tada prirast obraštanja veći. Čimbenici koji su svakako od velikog utjecaja za jačinu obraštanja su područje plovidbe i godišnje doba, koji kao takvi moraju uvijek biti uzeti u obzir u periodu eksploatacije broda. Sukladno tome danas postoje različite vrste suvremenih premaza kojima je moguće znatno smanjiti obraštanje podvodnog dijela trupa broda.



#### 4. SMANJENJE OTPORA TRENJA UZROKOVANOG OBRAŠTANJEM BRODA IZBOROM ANTIVEGETATIVNE BOJE

Obraštanje (*eng. Fouling*) označava kolonije biljnih i životinjskih organizama koji se nakupljaju na podvodnom dijelu metalnih površina. Najpoznatiji oblici obraštanja su balanidi (priljepci), mekušci i morske trave. Do obraštanja dolazi kada je metalni, umjetno stvoren, objekt uronjen u more. Obraštanje počinje kada je umjetno stvoren objekt uronjen u more. Površina uronjenog objekta akumulira organske otopljene tvari i molekule kao što su polisaharidi, proteini i fragmenti proteina što je moguće definirati kao prvi stadij obraštanja. S obzirom da bakterije i dijatomeje<sup>1</sup> imaju povoljne uvjete za nastanjivanje uronjenog dijela trupa broda one na njemu tvore biofilm načinjen od mikroba te dolazi do izlučivanja ljepljivih muko-polisaharida<sup>2</sup> i kemikalija koji uzrokuju biokoroziju. Zbog same prisutnosti adhezijskih izlučevina i hrapavosti kolonija mikroba povećava se vjerojatnost „hvatanja“ dodatnih organizama i čestica. Tu se na podvodni dio trupa priljepljuju spore algi, morske gljivice i protozoe<sup>3</sup>. Zadnja faza obraštanja sastoji se od naseljavanja i rasta većih morskih beskralježnjaka (priljepci, mekušci, mahovnjaci) i od rasta makroalgi (morske trave). Na obraštanje utječu: strujanje mora, mehanička oštećenja, slanost mora, količina svjetla, temperatura, zagađenje, količina nutrijenata te zemljopisni položaj broda. Najviše izloženi obraštanju su brodovi koji plove nižim brzinama ili su vezani u lukama, brodovi male aktivnosti te brodovi koji uglavnom plove u tropskim i suptropskim područjima. Organizme i alge koji sačinjavaju obraštanje lako je moguće podijeliti prema horizontalnoj raspodjeli na slijedeći način:

- obraštanje na području površine vodene linije i ispod nje do 2 metra u dubinu gdje dominiraju alge i priljepci;
- niže od prvog pojasa nastanjuju se školjke, mahovnjaci i crvi cjevaši;

---

<sup>1</sup> Alge kremenjašice (lat. *Diatomeae*) pripadaju skupini protista. Njihova stanična stijenka građena je od kremena ili silicijeva dioksida.

<sup>2</sup> Ugljikohidrati veće molekularne mase i složenije građe.

<sup>3</sup> Praživotinje, većinom mikroskopskih dimenzija, građene od samo jedne stanice koja vrši sve funkcije.

- ravnim dnom broda dominiraju hidroidi, priljepci, školjke, plaštenjaci i mahovnjaci.

Zbog obraštanja prvenstveno dolazi do povećanja mase uronjenog dijela trupa broda i smičnih naprezanja. Stvara se barijera između morske vode i površine broda te dolazi do pojave kisele pH vrijednosti te se pojačava intenzitet korozije. Zbog navedenih razloga od iznimne je važnosti da brodovlasnik, u životnom vijeku broda, smanji vjerojatnost obraštanja što je to više moguće.

Bitno je spomenuti i utjecaj obraštanja na brodske vijke. Jednako koliko obraštanje broskog trupa utječe na povećanje otpora broda, tako i obraštanje nastalo na brodskim vijcima pridonosi tome. Nastalo obraštanje prilikom vrtnje brodskih vijaka stvara i dodatan otpor kojim se smanjuje brzina vrtnje samih propelera što možda i nije toliko vidljivo koliko je utjecajno na brodsku brzinu. Nastali otpor potrebno je smanjiti što se postiže čišćenjem brodskih vijaka prilikom dokovanja broda i korištenjem zaštitnih premaza.

#### **4.1. ZAŠTITA PODVODNOG DIJELA TRUPA BRODA OD OBRAŠTANJA**

Dotrajalost i obraštanje oplakane površine broda glavni su uzroci povećanja hrapavosti broda što ima velik utjecaj na povećanje otpora trenja broda. Udio otpora trenja u ukupnom trenju broda, kod sporih brodova, može iznositi i do 90%. Sluz koja se nalazi na oplakanoj površini broda povećava otpor za 1-2%, morske trave ga povećavaju za 10% dok ga školjke na dnu mogu povećati za čak 40%. Obraštanje ne uzrokuje samo veći otpor trenja već i smanjuje upravljivost broda te povećava potrošnju goriva koja prouzrokuje povećanje emisije štetnih plinova. Kako bi brodovlasnik ostvario što veću ekonomsku iskoristivost broda od iznimne mu je važnosti smanjiti trenje broda a samim time i obraštanje na podvodnom dijelu trupa. Kako bi to postigao potrebno je redovito održavati brod, a pojavom obraštanja brod mora češće u dok, priprema površine i nanošenje boja traje dulji vremenski period te je potrebno više sredstava za održavanje broda. Negativne posljedice obraštanja su i širenje morskih organizama iz prirodnog staništa u područjima u kojima mogu prouzročiti prijetnju ekološkoj ravnoteži. Danas se protiv obraštanja najučinkovitije bori upotrebom antivegetativnih boja koje su se pokazale kao kvalitetan proizvod za smanjenje obraštanja ili čak njegovo potpuno sprječavanje.

## 4.2. ANTIVEGETATIVNE BOJE

### 4.2.1. Postepeni razvoj antivegetativnih boja kroz povijest

Prvi spomen tretiranja dna broda potječe još iz 5. st.pr.Kr., smatra se da su još Feničani i Kartażani koristili katran, arsen i sumpor pomiješan s uljem kako bi zaštitili svoje brodove od obraštanja. Grci su koristili katran i vosak te su gradili olovne oplata brodova ne bi li ih zaštitili od neizbježne pojave obraštanja. U 15. st. venecijanska flota koristila je mješavinu loja i smole, dok su portugalski pougljenili vanjsku površinu broda ne bi li tako smanjili „lijepljenje“ flore i faune za oplakanu površinu broda. Kasnijim otkrićem dobrih antivegetativnih svojstava bakra dotadašnje metode borbe protiv obraštanja prestale su se koristiti.

Prije 18. stoljeća nije zabilježen ni jedan slučaj oblaganja oplata broda bakrom i broncom. Godine 1758. izveden je pokus bakrom na brodu „Alarm“ te je od 1777. godine Britanska mornarica bakrene obloge uvela kao standardno rješenje za borbu protiv obraštanja. Obloge načinjene od bakra nisu uvijek pokazivale najbolje rezultate te je 1824. godine Sir Humphry Davy dokazao da korozija nastaje zbog reakcije bakra i morske vode. Kako bi se smanjila pojava korozije Humphry je na bakar dodao protektore načinjene od cinka, kositra i željeza. Protektorima se smanjilo otapanje bakra pa je na tim dijelovima gdje su se oni nalazili dolazilo do obraštanja. Uporaba bakra napuštena je uvođenjem čelika u brodogradnju zbog njegovih korozivnih svojstava.

Kako bi se zaštitio čelični trup broda započela je potraga za novim protuobraštajnim sredstvima te su testirani muntz metal, pocinčani čelik, nikal, slitine olova i antimona, slitine cinka i kositra. Istraživanja nisu stala na testiranjima metalnih obloga, tako su testirana i razna platna, gume, tvrde gume, pluto, papir, staklo, emajl i glazure. Godine 1625. zabilježena je prva prevlaka postavljena izričito kao protuobraštajno sredstvo poznata kao patent Williama Bealea. Prevlaku je sastavio od željeza u prahu, cementa i bakrenog spoja.

Nakon 1835. godine ozbiljno se razmotrio problem galvanske korozije čeličnog trupa i sve veća potreba za sredstvom protiv obraštanja koje neće proizvoditi galvanske efekte na trupu broda. Dolazi do razvijanja premaza koji su ispuštali otrove u morski medij kako bi spriječili obraštanje. Najčešći otrovi koji su korišteni bili su kositar, bakar i živa njihovi

spojevi, otapala su bila sačinjena od terpentina, nafte i benzena dok su matrice bile načinjene od lanenog ulja, prirodne plastike, katrana i raznih smola.

Premazi koji su komercijalizirani 60-ih godina 20. stoljeća na osnovi organokositrenih spojeva (TBT), nazvani „čarobno oružje“, pružali su potpunu zaštitu od obraštanja 5 godina nakon nanošenja ali je 80-ih godina 20. stoljeća otkriveno da ti spojevi ubijaju, organizme koji obraštaju trup broda i druge organizme u moru. Izbačeni su iz proizvodnje te su danas i zabranjeni.

#### **4.2.2. Podjela antivegetativnih boja**

Danas brodovlasnici imaju velik izbor antivegetativnih boja kojima mogu zaštititi svoje brodove te će ih izabrati prema:

- odnosu vremena koji brod provede u službi i u luci,
- periodu između dva dokiranja,
- brzini broda,
- području plovidbe,
- kompatibilnosti antivegetativnog premaza s antikorozivnim premazom,
- adheziji antivegetativnog premaza na antikorozivni premaz,
- stupnju glatkoće substrata,
- pravilu aplikacije premaza te
- namjeni broda.

S obzirom da su antivegetativni premazi spojevi koji se sastoje od pigmenata, otapala, aditiva i bioaktivnog materijala, moguće ih je klasificirati i prema vrsti veziva. Vezivo premaza je najkritičniji sastojak svakog premaza, te je važno da posjeduje određeni stupanj topivosti u moru, mora imati dobra adhezivna svojstva, potrebno je da se brzo suši i da formira čvrste, glatke i elastične površine. Otrovnost je jedan od odnovnih čimbenika koji karakteriziraju antivegetativne premaze, te ih je prema otrovnosti moguće podijeliti na:

- premaze koji u dodiru s morem oslobađaju otrov,

- premaze u kojima vezivo pri topljenju utječe na otrovnost,
- premaze u kojima je vezivo toksično te
- premaze koji su kombiniranog djelovanja.

Prema pojavi na tržištu, kroz povijest, premazi se dijele na:

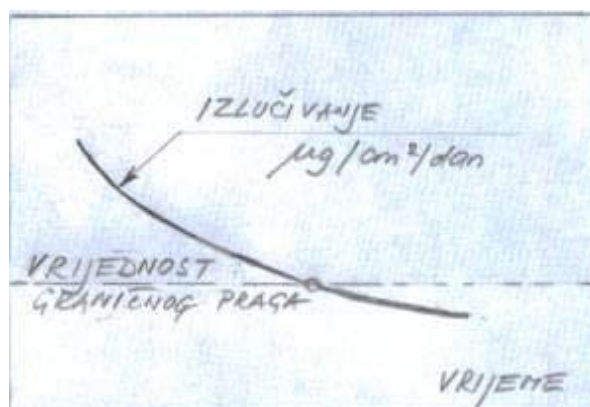
- konvencionalne premaze,
- samopolirajuće premaze s organokositrenim spojevima (TBT-SPC),
- nove konvencionalne premaze (CLP i CDP),
- samopolirajuće premaze bez organokositrenih spojeva (SPC-TBT-free),
- hibridne premaze (SPC bez kositrenih spojeva i CDP konvencionalni premazi) te
- najnovije neobraštajuće premaze bez biocida (*Biocide Free, Non-stick Coatings, Fouling Release Coatings*).

#### **4.2.2.1. Konvencionalni antivegetativni premazi**

Konvencionalni tipovi antivegetativnih premaza dijele se na premaze male debljine i premaze velike debljine. Premazi male debljine sadrže netopljivo vezivo sačinjeno od vinilne smole te veliku količinu bakrenog oksida kako bi se kontaktom dobio učinak toksičnosti. Premazi velike debljine takozvani (*high build*) sačinjeni su od netopljivih veziva (vinili) povezanih sa topljivim vezivima (kolofonij) uz manji udio biocida. Ovi tipovi premaza nisu bili trajni i karakterizira ih brzo ljuštenje. Da bi premazi bili što učinkovitiji i trajniji trebalo je postići trajnost, žilavost i dobru adheziju za podlogu.

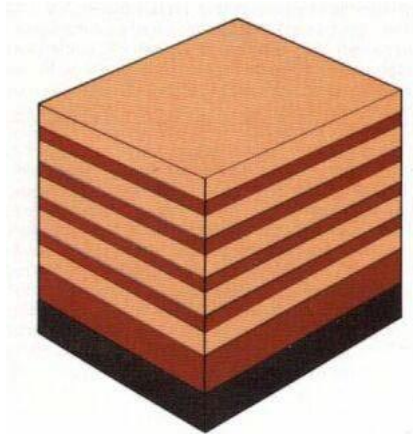
Antivegetativni premazi u sastavu su imali biocide, koji su uglavnom spadali u skupinu teških metala. Najotrovniji biocid je arsenov trioksid koji se koristio krajem 18. stoljeća. Biocid je fino raspršen u antivegetativnom premazu iz kojeg se, dodirrom s morem, izlučuje. Gotovo u svakom antivegetativnom premazu prisutan je bakreni oksid. Glavni uvjet koji biocid u premazu mora ispuniti je njegova topivost u morskoj vodi koja mora iznositi, za bakreni oksid, više od  $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{po danu}$ . Brzina izlučivanja biocida u konvencionalnom

premazu će, uranjanjem broda u more, eksponencijalno padati do kritične točke, kako je prikazano na grafu broj 4. Kada izlučivanje biocida bude manje nego na kritičnoj točki doći će do obraštanja jer neće biti dovoljne količine izlučenog biocida koji bi ga spriječio.

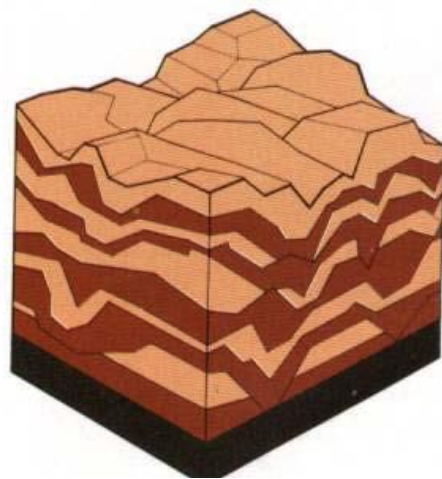


Graf 4. Krivulja izlučivanja biocida iz AV premaza

Nedostatak konvencionalnih premaza je u tome što je brzina izlučivanja biocida u odnosu na prihvaćanje flore i faune na oplakanu površinu obrnuto proporcionalna. Što bi značilo, kako brzina broda raste brzina izlučivanja biocida bila bi sve veća te je za zaključiti da organizmi najlakše prijanjaju na oplakanu površinu pri mirovanju broda jer je tada izlučivanje biocida najmanje, dok pri velikim brzinama velik dio protuobraštajnih supstanci biva odnešen. Uvođenjem prirodne smole kao veziva u premazima dolazi do znatnih promjena u tipovima premaza. Ovakvi premazi imali su svojstvo istovremenog otapanja toksina i veziva što je za posljedicu imalo smanjivanje filma antivegetativnog premaza. Karakteristično je za brodove na koje je nanešen konvencionalni antivegetativni premaz da moraju brzo nakon nanošenja premaza biti uronjeni u more jer ako kolofonij uspije reagirati s kisikom njegovo će se izlučivanje znatno povećati te će se brzo istrošiti u moru. Razna onečišćenja kao što je nafta i ulje također mogu lako otopiti vezivo u konvencionalnim premazima. Na slici 6. prikazana je idealna površina svježe nanešenog konvencionalnog premaza, dok je na slici 7. vidljiv izgled površine konvencionalnog premaza nakon trošenja matrice.



Slika 6. Idealna površina svježe apliciranog konvencionalnog AV premaza



Slika 7. Izgled površine konvencionalnog AV premaza nakon trošenja matrice

Nakon niza dokiranja pri mehaničkim oštećenjima dolazi do odslojavanja i ljuštenja starih premaza, ta pojava naziva se *sandwich* premaz, prikazan na slici broj 8.



Slika 8. Pojava *sandwich* premaza

Pojavom specijaliziranih brzih brodova dolazi do potrebe za novim zahtjevima kod antivegetativnih i antikorozivnih premaza kao što su:

- laka primjena u svim klimatskim zonama,
- visoki standardi za kontrolu korozije,
- brza aplikacija i
- dulji vijek trajanja.

Zbog gore navedenih zahtjeva poboljšavaju se konvencionalni premazi iz 50-ih godina i nastaju dugotrajni (*Long Life*) premazi. Radi pojačanja filma u prijašnje premaze dodana su netopiva veziva kao što su: vinili, epoksidi ili klor kaučuk. Za ovakve antivegetativne premaze korištena su vrlo jaka otapala i visoki sadržaj biocida. Biocidi koji su se uglavnom koristili u ovoj vrsti premaza su bakreni oksid i organokositreni spojevi, dok su do otkrića njihove velike toksičnosti korišteni i živa i arsen. Vijek ovih premaza bio je 16-24 mjeseca, dok je jedan od nedostataka bio taj što su se slojevi premaza nakon nekoliko dokiranja gomilali pa bi dolazilo do guljenja i ljuštenja premaza te je ovaj način zaštite od obraštanja trebalo i dalje unapređivati. Poboľjšani način zaštite postigao se konvencionalnim premazima



koji su se također bazirali na nekontroliranoj brzini izlučivanja toksina, te su takvi premazi imali znatno veću mehaničku čvrstoću i dulji vijek trajanja. Nedostatak ovog premaza je taj što je ispražnjeni lanac polimernog veziva porozan pri absorpciji veziva iz slijedećeg premaza.

Reaktivni antivegetativni premazi razvijeni su na istom principu kao i dugotrajni, ali im je vijek trajanja dulji. Glavni nedostatak ovih premaza je povećanje hrapavosti uklanjanjem potrošenog premaza brušenjem oplata. Prednost mu je to što se mogao otkloniti istrošeni dio premaza podvodnim brušenjem rotacionim četkama bez potrebe dokiranja.

Glavni nedostaci konvencionalnih antivegetativnih premaza su:

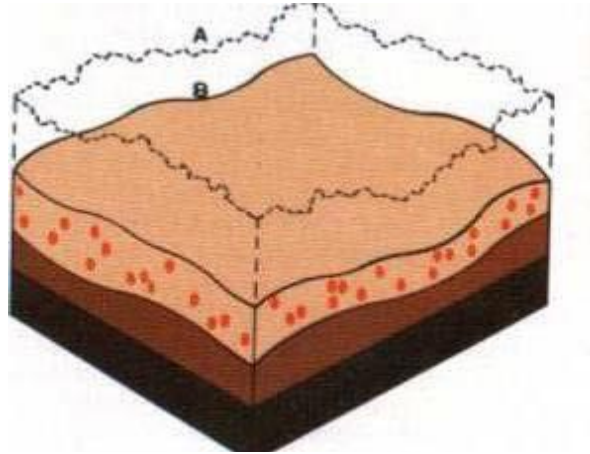
- skupa priprema podloge,
- neekonomično preveliko izlučivanje biocida,
- trajnost uvjetovana debljinom premaza,
- povećanje hrapavosti po svakom dokiranju,
- dio biocida ostaje neiskorišten u premazu,
- bušenje zaostalog biocida u suhom doku onečišćuje okoliš te
- porast potroška goriva.

#### ***4.2.2.2. Samopolirajući premazi s organokositrenim spojevima***

Glavni razlog za pronalazak kvalitetnijeg antivegetativno premaza je potreba za pronalaskom premaza kod kojeg bi se spriječilo prebrzo izlučivanje biocida te se došlo istraživanjima do premaza s organokositrenim spojevima. Pojavom kopolimera tributil-kositrenog (TBT) spoja u premazima, koji su imali ulogu veziva, omogućeno je kontrolirano izlučivanje kositrenog biocida. Glavne pozitivne osobine ovih premaza su mogućnost kontroliranog izlučivanja tributil-kositrenog spoja iz veziva kopolimernog sustava i zaglađivanje premaza.

Tributil-kositreni antivegetativni premazi reagirali su s morem i oslobađali bioaktivnu molekulu TBT, preostali dio kopolimernog lanca veziva, koji je postajao slabo topiv, inspirao

se smičnim silama tijekom plovidbe te bi dolazilo do poliranja ili zaglađivanja. Upravo zbog ovog svojstva ova je vrsta premaza nazvana tributil-kositreni samopolirajući premazi (engl. *Tri-Butyltin Self-Polishing Copolymers TBT SPC*). Samopolirajuće svojstvo osigurava ravnomjernu brzinu izlučivanja nakon uranjanja trupa broda u more. Vrlo bitna, pozitivna, karakteristika ovih premaza je da ne dolazi do pojave *sandwich* premaza koja je karakteristična za konvencionalne premaze, već prifil premaza nakon trošenja postaje glađi, kao što je prikazano na slici broj 9.



Slika 9. Promjena profila premaza nakon perioda trošenja:

A - originalni profil premaza nakon aplikacije TBK SPC premaza

B - profil premaza nakon perioda trošenja postaje glatkiji

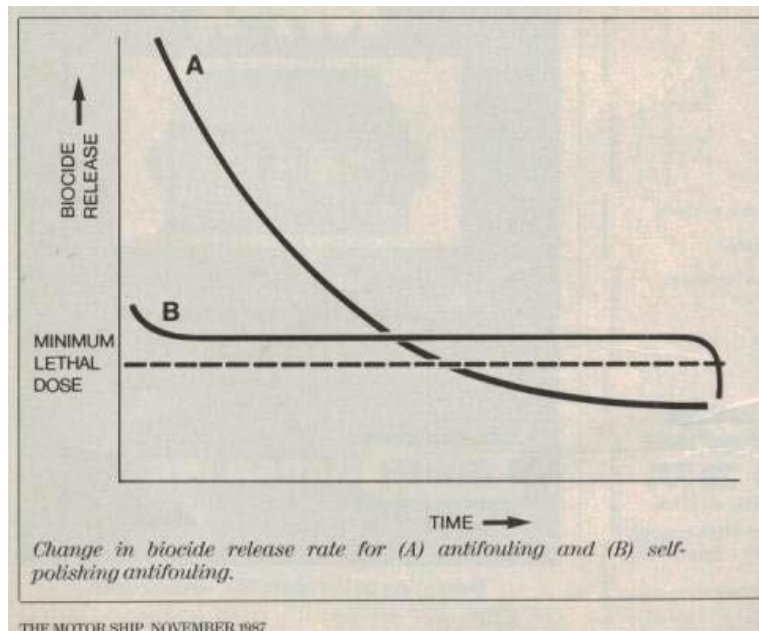
Zadnja generacija TBT SPC-a, koja se počinje proizvoditi 1980.-ih godina, su takozvani debeloslojni (engl. *High-Build*) TBT SPC premazi. Ova vrsta premaza imala je neke od najboljih odlika ove vrste premaza kao što su:

- visok udio krute tvari,
- udio monomera tributil-kositra manji od 50%,
- niži udio kositra te bi osiguravale
- prosječnu hrapavost oplakane površine broda.

Uštede koje su omogućene debeloslojnim TBT SPC HB premazima, u usporedbi s konvencionalnim premazima, bile su impresivne jer je kod primjene konvencionalnih

premaza bilo potrebno 5 dokiranja u vremenskom periodu od 18 mjeseci, dok je kod primjene TBT SPC HB bilo potrebno izvesti 2 do 3 dokiranja u istom vremenskom periodu.

Prednosti organokositrenih premaza u odnosu na konvencionalne antivegetativne premaze bile su velike jer nije dolazilo do pojave *sandwich* premaza, produljen je period eksploatacije broda između dokiranja, imali su predvidive performanse, produljen je vremenski period bez obraštanja, površina broskog trupa bila je izglađena, procedura održavanja u doku postala je lakša i kraća, obraštanje se moglo kontrolirati i vijek trajanja premaza bio je razmjerni debljini osušenog filma. Na slici 10. prikazano je otpuštanje biocida kod konvencionalnih i TBT SPC premaza te se može uočiti da je kod konvencionalnih premaza otpuštanje biocida nekontrolirano, a kod TBT SPC spojeva kontrolirano.



Slika 10. Otpuštanje biocida

(A): konvencionalni premaz: nekontrolirano eksponencijalno otpuštanje

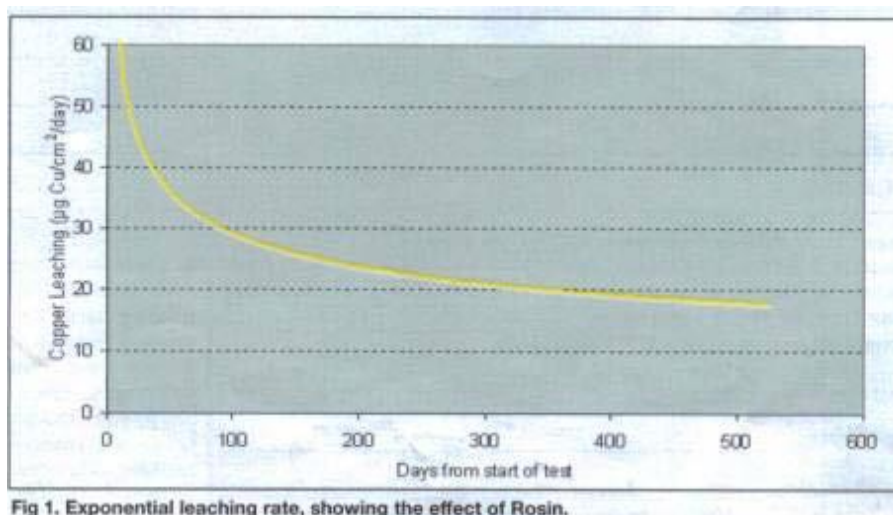
(B): TBT SPC premaz A- kontrolirano izlučivanje biocida

Nedostatak ove vrste premaza je štetnost organokositrenih spojeva na floru i faunu jer su otrovni te su TBT antivegetativni premazi od 1. siječnja 2003. godine zabranjeni.

#### 4.2.2.3. Novi konvencionalni antivegetativni premazi

Zabranom korištenja TBT SPC antivegetativnih premaza zbog njihove otrovnosti dolazi do potrebe brzog otkrića novog premaza kojim bi se onemogućilo obraštanje. Za brodograditelje i proizvođače premaza dolazi do nazadovanja jer je potrebno vratiti se na proizvodnju u korištenje prijašnjih konvencionalnih premaza. Upravo se zbog ove potrebe konvencionalni premazi pokušavaju unaprijediti kako bi njihovo djelovanje bilo što dulje i kako bi se smanjio broj dokiranja naspram broja dokiranja pri korištenju starih konvencionalnih premaza. Zabranom korištenja TBT premaza dolazi do pojave preranog nekontroliranog obraštanja i većeg broja dokiranja.

Kod novih konvencionalnih TBT *Free* premaza bilo je nužno reducirati nekontrolirano izlučivanje bakrenog biocida te se njegova kontrola mogla postići korištenjem komponenata sa sinergijskim djelovanjem koje su kasnije nazvane pojačalima za biocide (engl. *biocide boosters*). Nova pojačala za biocide imala su svojstva niske topivosti u moru, kako bi se spriječilo prebrzo ispuštanje bakra iz antivegetativnih premaza, nisu bila štetna i imala su prihvatljivu cijenu. Novi konvencionalni premazi sastojali su se od nekemijski vezanog biocida, odnosno bakreni (I) oksid koji je bio fino raspršen u premazu. Osnovni sastav vezive činio je kolofonij, te su se difuzijom mora u premazotpuštali biocidi. Naime, ovom tehnikom otpuštanja biocida u more dolazi, kao i kod starih konvencionalnih premaza, do eksponencijalne brzine izlučivanja biocida, gdje se biocid na početku izlučivao u velikim količinama te bi brzina izlučivanja padala dok više ne bi sprječavala obraštanje. Na ovu pojavu znatno su utjecali pojačivači i korištenje kolofonija kao dominantnog veziva koji su za posljedicu dali znatno manji nagib pri eksponencijalnom izlučivanju biocida, kao što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Eksponencijalno izlučivanje biocida s kolofonijem kao dominantnim vezivom

Porastom količine kolofonija u novim konvencionalnim antivegetativnim premazima vezivni sustav postaje mekši i topljiviji u moru. Takva vrsta premaza nazvana je antivegetativnim premazom topivog veziva ili CDP AF (engl. *Controlled Depletion Polymer Anti-Fouling*).

Drugu vrstu novih konvencionalnih premaza bez TBT-a čine premazi nazvani prema mehanizmu izlučivanja biocida kontaktom ili CLP premazi (engl. *Contact Leaching Polymers*). Ova vrsta premaza sadrži manji udio kolofonija zbog čega je vezivo tvrđe i manje topivo u moru te trošenjem ova vrsta premaza postaje manje topiva. Vijek trajanja CDP antivegetativnih premaza povećan je, u odnosu na stare konvencionalne premaza za tri puta, te iznosi 36 mjeseci što je veliki napredak u odnosu na 12 mjeseci pri korištenju prijašnjih premaza.

#### 4.2.2.4. Samopolirajući antivegetativni premazi bez organokositrenih spojeva

Zamjena spojeva TBT SPC sa konvencionalnim novim antivegetativnim premazima nije zadovoljila pa je bilo potrebno pronaći tehnologiju premaza u kojoj bi bakreni biocid imao učinak samopoliranja kao kod toksičnih TBT SPC spojeva. Za biocidna svojstva organokositrenih spojeva bilo je teško naći zamjenu jer su istraživanja bila veoma skupa. Trebalo je napraviti takvu vrstu antivegetativnog premaza koja bi imala kontroliranu brzinu izlučivanja biocida i koja bi imala učinak samopoliranja i izgladivanja površine. Početkom 1990.-ih godina patentirani su novi antivegetativni premazi koji su sadržavali bakrene i

cinkove akrilate a svojim svojstvima su oponašali spojeve s TBT akrilatom ali nisu bili otrovni. Bakreni i cinkovi kopolimeri imali su nisku aktivnost, u odnosu na TBT SPC spojeve, što je korigirano dodavanjem pojačala za biocide koji su imali sinergijsko djelovanje. Najkorištenije pojačalo za biocide korišteno u ovoj vrsti premaza je cinkov pirition koji je ekološki prihvatljiv jer nije trajan, ne akumulira se i brzo se razgrađuje. U kopolimernom vezivu je vezan bakreni spoj. Hidrolizom se iz kopolimernog veziva oslobađaju ioni bakra nakon čega dolazi do ionske izmjene u kojoj ion bakra na sebe veže klorid ion iz natrijevog klorida, a ion natrija veže se na hidroksilnu grupu akrilnog kopolimera te vezivo postaje topivo, postupno se ispire i premaz samopolira. Ova reakcija otapala odvija se samo na graničnom laminarnom sloju premaza koji je u kontaktu s morem dok ostali dio filma sprječava prodiranje mora. Ovim svojstvom ograničeno je ispuštanje biocida iz zaštitnog premaza pa je sloj premaza koji se izlučuje tanak. Tvrtka International i partner Nippon Paint Coatings uvode ove nove TBT-Free SPV antivegetativne premaze pod nazivom Ecoloflex.

Ovaj antivegetativni premaz, na bazi bakrenog akrilata, ima mnoga dobra svojstva koja imaju i TBT SPC antivegetativni premazi kao što su:

- niži potrošak goriva,
- visoki stupanj kontrole obraštanje,
- kontrola izlučenog sloja,
- kontrola brzine poliranja i otpuštanja biocida,
- samozaglađivanje,
- produljena trajnost premaza na 60 mjeseci,
- žilav i trajni film te
- nije potrebna primjena sloja za izravnavanje.

#### ***4.2.2.5. Hibridni antivegetativni premazi***

Hibridni antivegetativni premazi sadrže dvije glavne komponente, a to su: konvencionalni antivegetativni premaz i SPC TBT Free premaz. Do uvođenja ove vrste

premaza došlo je zbog velike cijene najinovativnijih SPC antivegetativnih premaza koji u sebi nisu sadržavali kositar. Kombinacijom svojstava ove dvije vrste premaza došlo se do premaza koji je imao površinska svojstva, velik udio krute tvari, kontrolu brzine poliranja i otpuštanja biocida sa smanjenom debljinom sloja koji se izlučuje. Iako vrlo dobrih karakteristika, ova vrsta premaza u sebi je također sadržavala bakar, te je imala svojstva koja su bila štetna za okoliš. Upravo je zbog štetnosti za okoliš istraživanje i potraga za novim i kvalitetnijim premazima nastavljena.

#### ***4.2.2.6. Antivegetativni premazi bez biocida, neobraštajući premazi***

Novi antivegetativni premaz koji u sebi ne sadrži biocid i nema štetno djelovanje za okoliš te je idealan premaz za glatke površine s nultim obraštanjem je premaz nazvan „Sveti Gral“. Bazirani su na silikonskim ili teflonskim polimerima koji stvaraju površinu koja je klizava i na koju se organizmi ne mogu preхватiti. Obraštanje je ovim antivegetativnim premazom moguće spriječiti pri kretanju brodova, dok pri njihovom mirovanju to nije moguće i dolazi do djelomičnog obraštanja. Kako je danas cilj proizvodnja i korištenje premaza koji neće onečišćivati okoliš, na ovom području aktivirana su mnoga istraživanja te se planira koristiti premaze bez biocida uključujući fotoaktivne metode za kontrolu obraštanja, oprički čiste antivegetativne premaze te premaze obnovljivih izvora.

#### ***4.2.2.7. Silikonski premazi***

Osnovni materijal koji se koristi u ovoj vrsti premaza je polidimetilsiloksan (PDMS), kojima je glavno svojstvo niska energija površine. Polimerni lanac PDMS-a je veoma savitljiv te je njime moguće postići najnižu energiju. Ovi premazi su vrlo glatki, različite površinske teksture od teksture TBT SPC Free premaza. Naime, ova vrsta premaza još nije u široj primjeni zbog velike cijene početne instalacije.

#### ***4.2.2.8. Premazi na bazi mikrovlakana***

Dugotrajnim istraživanjima tvrtka Seal Coat uvodi nove materijale na bazi mikrovlakana u antivegetativne premaze. Premaz se postavlja tako da se površina prekrije

ljepilom te se našprica milijunima mikro-vlakana. Mikrovlakna se elektrostatski nabiju i postavljaju okomito na ljepljivi premaz te tvore površinu koja zgloda kao baršun. Iako je ovaj tip antivegetativne zaštite još u fazi istraživanja, pretpostavke su da će se suvremene zaštite od obraštanja bazirati upravo na ovim premazima jer oni obuhvaćaju ujedno i antivegetativnu i antikoroziivnu zaštitu 5 godina nakon apliciranja.



## **5. ODRŽAVANJE BRODA**

Održavanje broda moguće je definirati kao sprječavanje nastanka kvarova na brodskim sustavima, otklanjanje nastalih kvarova i produženje vremena korištenja navedenih sustava. Podvodni dio broda potrebno je redovito održavati jer se kod neredovitog održavanja javljaju obrasline koje povećavaju otpor trenja broda, te se time povećava potrošnja goriva i smanjuje efikasnost broda u eksploataciji.

Površinu broskog trupa potrebno je pripremiti za premazivanje, a priprema se sastoji od uklanjanja nečistoća, obraslina, starih premaza, soli, prašine, korodiranih nečistoća, te ako je potrebno i od ukaljanja kiselina i lužina. Zaštitni premazi koji se koriste uglavnom se sastoje od temeljnog premaza, međusloja, završnog sloja i antivegetativnog sloja za podvodni dio trupa broda. Temeljni premaz nanosi se na konstrukciju koja je prethodno obrađena kako bi se obrađeni dio zaštitio od korozije. U određenom vremenskom odmaku nakon nanošenja temeljnog premaza nanosi se međupremaz koji također djeluje antikorozivno ali je i podloga za nanošenje završnog premaza. Završni premaz nanosi se kako bi se konstrukcija zaštitila od kemijskih i vremenskih utjecaja. Antivegetativni premazi koji se nanose na podvodni dio trupa trebaju zadržati glatkoću oplata i spriječiti njeno obraštanje. Ukoliko premazi nisu pravilno nanešeni ili odabrani može doći do kredanja, pukotina ili boranja. Glavni razlozi lošeg djelovanja premaza su: pogrešan izbor premaza, njegov neodgovarajući sastav, nanošenje premaza u neodgovarajućim uvjerima te njegovo loše nanošenje.

### **5.1. ZAŠTITA PREMAZIMA**

Svaki je premaz multikomponentna smjesa koja se sastoji od: veziva, pigmenta, punila, aditiva i otapala. Veziva povezuju sve komponente premaza u jednu homogenu cjelinu. Veziva su organske tvari koje ne isparavaju a mogu biti, prema načinu sušenja, kemijska i fizikalna. Veziva podjeljena prema kemijskim spojevima od kojih se sastoje dijele se na: veziva na osnovi prirodnih smola, derivate celuloze, prirodnog ili sintetičkog kaučuka, masnih ulja koja se mogu sušiti, poliplasta te bituminoznih tvari. Pigmenti su tvari koje su netopive, a mogu biti organske ili anorganske, sa svojstvom apsorpiranja i reflektiranja svjetlosti. Glavna uloga pigmenta je da čini premaz neprozirnim, da poveća mehanička i

zaštitna svojstva premaza, povećá njegovu postojanost te poboljša refleksiju svjetlosti. Punila su pigmenti praškastog oblika, anorganskog podrijetla koji trebaju smanjiti poroznost i cijenu završnog proizvoda jer su jeftini. Aditivi se dodaju u premaze kako bi se smanjili njihovi nedostaci. Oni imaju u premazima svojstva sušila, korozijskih inhibitora, konzervansa, disperzanta i svjetlosnih stabilizatora. Razrjeđivači ili otapala su organski spojevi u kojima se otapa vezivo te prilikom otapanja ne dolazi do kemijskih promjena. Koriste se za postizanje viskoznosti koja je potrebna za nanošenje premaza na metalnu konstrukciju. dijele se na ugljikovodike, derivate ugljikovodika s kisikom i klorirane ugljikovodike.

Zaštitne premaze prema njihovim svojstvima i karakteristikama treba izabrati brodovlasnik, te oni moraju biti odobreni od strane međunarodnih konvencija. Bitno je posebnu pozornost obratiti na kvalitetu premaza koja ovisi o:

- svojstvima premaza,
- kemijskim svojstvima površine metalne konstrukcije,
- tehnici nanošenja premaza,
- debljini nanošenog premaza,
- kvaliteti nanošenja,
- klimatskim uvjetima te
- agresivnosti okoliša.

## ZAKLJUČAK

Ovaj rad koncipiran je kao analiza otpora broda kao funkcije obraštanja broda i izbora antivegetativne boje. U njemu su sadržane činjenice dobivene raznim istraživanjima kroz povijest te njihov razvoj pojavom suvremene tehnologije. Od velike važnosti je brodovlasniku pri eksploataciji broda od njega dobiti što veću iskoristivost što ostvaruje smanjenjem otpora broda. Kako bi otpor broda što manje utjecao na svojstva iskoristivosti broda potrebno ga je smanjiti, što je uvelike moguće redovitim održavanjem, dokiranjem i korištenjem antivegetativnih premaza koji imaju najpovoljnija svojstva za određeni tip broda.

Kroz povijest su znanstvenici proučavali pojavu otpora trenja, hrapavosti broda i tražili najefikasnija rješenja za njihovo smanjenje. Naime, obraštanje broda ovisi o području kojim brod plovi, broju dana koje provede u luci, broju dana koje provede u plovidbi, brzini kojom plovi te mnogim drugim čimbenicima. Kako bi se utjecalo na pojavu obraštanja broda i smanjenje otpora broda kroz istraživanja se danas došlo do velikog broja antivegetativnih premaza koji imaju povoljna svojstva za brod na koji se nanose ali i na okoliš u kojem se brod kreće.

Današnje uspješno poslovanje brodovlasnika ovisi o velikom broju čimbenika koji su važni pri eksploataciji broda. Brodovlasnik je osoba koja mora odlučiti kojim će metodama najbolje iskoristiti brod kako bi mu on bio ekonomski najisplativiji. Upravo kako bi postigao ekonomsku isplativost u ovoj vrsti posla od velike je važnosti da brodovlasnik poznaje materiju vezanu za otpor broda te načine njegovog smanjivanja kroz redovito održavanje broda.

## LITERATURA

- [1] Šilović, S.: *Otpor broda*, Uredništvo časopisa „Brodogradnja“, Zagreb, 1953.
- [2] Pulja, G.: *Brodsko hidrodinamika I*, Mornarički školski centar, Split, 1978.
- [3] Vučinić, A., *Otpor i propulzija broda*, Mornaričko-tehnička akademija, Split, 1972.
- [4] *Pomorska enciklopedija*, Leksikografski zavod, Zagreb, 1989.
- [5] *Tehnička enciklopedija*, Leksikografski zavod, Zagreb, 1997.
- [6] Belamarić, B.: *Utjecaj hrapavljenja oplakane površine na eksploatacijska svojstva broda*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [7] Juraga, I.; Stojanović, I.; Noršič, T.: *Zaštita broskog trupa od korozije i obraštanja*, Brodogradnja, 2007.
- [8] Radan, D.: *Uvod u hidrodinamiku broda*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.

## IZVORI

- [1] [www.pfst.hr/nastavni materijali](http://www.pfst.hr/nastavni_materijali)
- [2] [www.wikipedia.hr](http://www.wikipedia.hr)

## POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1. Strujanje u graničnom sloju u podožju točke otkidanja .....	11
Slika 2. Kvalitativna razlika između dobro i loše opstrujavane forme broda gdje je: .....	12
Slika 3. Prikaz maksimalne brzine deplasmanskog broda .....	13
Slika 4. Prikaz intenziteta oštećenja podvodne brodske oplata i vanjske palube s obzirom na osobitosti konstrukcije u uvjeta eksploatacije .....	24
Slika 5. Shema katodne zaštite s vanjskim izvorom struje i uređaj za automatsku regulaciju	25
Slika 6. Idealna površina svježe apliciranog konvencionalnog.....	32
Slika 7. Izgled površine konvencionalnog AV premaza nakon .....	32
Slika 8. Pojava <i>sandwich</i> premaza .....	33
Slika 9. Promjena profila premaza nakon perioda trošenja:.....	35
Slika 10. Otpuštanje biocida.....	36
Slika 11. Eksponencijalno izlučivanje biocida s kolofonijem kao dominantnim vezivom.....	38

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Promjene otpora ploče sa strujanjem u moru .....	19
---	----

## POPIS GRAFOVA

Graf 1. Prikaz snaga na osovini u KS bojnog broda od 32 000 t i brzine koje postiže u čv ....	18
Graf 2. Prikaz snaga na osovini u KS razarača duljine 95 m i brzina u čv .....	19
Graf 3. Krivulja $C_F$ u odnosu na $R_n$ .....	21
Graf 4. Krivulja izlučivanja biocida iz AV premaza.....	31