

Uporedna analiza podvodnih zaštitnih premaza u morskom okruženju

Milan Radan, Špiro Ivošević

Sažetak: Obraštanje značajno smanjuje performanse plovila povećavajući hidrodinamički otpor i potrošnju goriva, čime se takođe povećava emisija štetnih gasova. Primjena protivobraštajućih premaza je od ključnog značaja u prevenciji obraštanja. U ovom istraživanju ispitivana je degradacija i efikasnost samopolirajućih protivobraštajućih premaza u zavisnosti od uslova okruženja i orijentacije uzoraka. Tri komercijalna premaza nanosena su na aluminijske uzorke, koji su postavljeni vertikalno i horizontalno, u zoni plime i osjeke kao i u laboratorijskim uslovima koji simuliraju morsku vodu. Tokom tri mjeseca redovno su vršene vizuelne inspekcije, kao i mjerenja srednje debljine premaza. Pored navedenog, izvršena su posmatranja radi utvrđivanja eventualnih oštećenja površine i prisustva obraštanja. Rezultati pokazuju da vertikalni uzorci imaju manju prosječnu degradaciju u poređenju sa horizontalno postavljenim uzorcima, kao i sa uzorcima iz laboratorijskih uslova. Uzorci postavljeni u zoni plime i oseke prikazali su najveću varijabilnost u performansama. Navedeni rezultati ukazuju da orijentacija i uslovi okruženja značajno utiču na dugotrajnost i efikasnost protivobraštajućih premaza, te se na ovaj način omogućuju smjernice za njihovu optimalniju primjenu prilikom premazivanja trupa broda.

Ključne riječi: Zaštitni premazi, Brodograđevni aluminij, Debljina premaza, Degradacija premaza.

1. Uvod

Aluminijum se u pomorstvu najčešće koristi u obliku legura. Najčešće korišćene legure aluminijuma su serije 5000, konkretno serija 5083. Navedena serija se može koristiti za izgradnju cjelokupnih plovila kao i pojedinih dijelova [1], [2].

Kako bi se brodograđevni materijal zaštitio od mnogobrojnih uticaja okruženja, neophodno je nanijeti premaze. Protivobraštajući premazi se izdvajaju kao jedni od najvažnijih. Uloga protivobraštajućih premaza je da

održe trup bez naslaga organizama. Proces rasta i prikupljanja organizama na trupu broda je veoma intenzivan, a promjene je moguće zabilježiti i na sedmičnom nivou [3].

Kada se broj, kao i veličina organizama poveća, dolazi i do povećanja otpora podvodnog dijela broda. Povećanje otpora direktno smanjuje performanse broda, što se ogleda u manjoj brzini pri istoj snazi ili većoj potrošnji goriva [4], [5], [6]. Važno je naglasiti da uticaj otpora nije isti kod svakog broda, već zavisi od oblika podvodnog dijela trupa, deplasmana, dimenzija trupa, oblika nadvodnog dijela broda, projektne brzine, itd. [7], [8].

Brodovi koji se nalaze duže u eksploataciji ili ukoliko nisu redovno i dobro održavani, imaju veću potrošnju goriva, što ujedno utiče i na operativne troškove, kao i na količinu emisija štetnih gasova iz dimnjaka [9]. Pored ispuštanja štetnih gasova, kretanje brodova sa značajnijim obraštanjem predstavlja ekološki rizik zbog mogućnosti transporta invazivnih vrsta [10], [11].

Proces uklanjanja obraštanja, starog premaza i korozije sa trupa je obiman posao i zahtijeva veliki broj radnih sati, kao i angažovanje velikog broja radne snage [12]. Propadanje materijala usljed mnogobrojnih faktora uzrokuje povećanje hrapavosti površine, a premazi se moraju nanositi na potpuno čistu površinu [13], [14].

Potpuno čista površina se postiže različitim metodama pripreme u skladu sa standardima koje propisuje Međunarodna organizacija za standardizaciju (eng. *International Organization for Standardization*) [15], [16]. Nakon pripreme površine moraju se odabrati premazi i metode premazivanja: važno je da se premazivanje obavi prema propisima konvencije o Standardima i performansama zaštitnih premaza (eng. *Performance Standard for Protective Coatings*), i prema uputstvima proizvođača premaza [17].

Svi premazi moraju biti u skladu sa Međunarodnom konvencijom o kontroli štetnih sistema protiv obraštanja na brodovima (eng. *International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships*) [18]. Za zaštitu podvodnog dijela se koriste različite vrste protivobraštajućih premaza, a najčešće u upotrebi su biocidni premazi.

Biocidni premazi se razlikuju prema mehanizmu djelovanja, odnosno prema načinu otpuštanja biocida, mogu biti sa nekontrolisanim i kontrolisanim otpuštanjem u vodu [13], [19], [20]. Kao posebna vrsta premaza sa kontrolisanim otpuštanjem biocida u vodu, izdvajaju se samopolirajući premazi, a njihove performanse su se pokazale kao najbolje u zaštiti od obraštanja [21].

Iako pružaju adekvatnu zaštitu, vremenom se smanjuje njihova efikasnost, i dolazi do pojave oštećenja, korozije materijala i obraštanja [22], [23]. Prilikom kontakta sa vodom smanjuje se debljina tek nanešenih premaza, a površina postaje ravnija [24]. Svako oštećenje premaza rezultira povećanjem hrapavosti površine [25].

Korozija materijala je svakako jedan od dominantnih degradacionih mehanizama koji utiče na smanjenje strukturne čvrstoće broda, te utiče i na slabljenje površinske zaštite. Iz tog razloga, brojna istraživanja korozije realizovana su nad realnim brodskim strukturnim oblastima čelične konstrukcije [26], [27], [28], kao i istraživanja korozije u različitim uslovima morskog okruženja [29], [30]. Takođe, značajna istraživanja su i nad aluminijumskim konstrukcijama [31], [32], kao i ona koja se baziraju na recikliranom aluminijumu [33], [34].

Uprkos širokoj primjeni samopolirajućih biocidnih premaza u brodogradnji, nedovoljno je istražen njihov stvarni učinak u zavisnosti od prostorne orijentacije i stvarnih uslova izloženosti, posebno na aluminijumskim legurama serije 5083, koje postaju sve značajnije u savremenoj pomorskoj industriji. Postojeća literatura uglavnom se fokusira na performanse premaza u idealizovanim ili ograničeno kontrolisanim uslovima, pri čemu se zanemaruje kombinovani uticaj faktora kao što su položaj površine i dinamika realnog morskog okruženja.

Zbog navedenog, cilj ovog istraživanja je da se ispita uticaj različitih uslova izloženosti (prirodna morska sredina i laboratorijski uslovi) i prostorne orijentacije (horizontalna i vertikalna) na performanse tri komercijalno dostupna samopolirajuća biocidna premaza, primijenjena na brodograđevni aluminijum 5083. Istraživanje ima za cilj da doprinese boljem razumijevanju mehanizama degradacije premaza u stvarnim uslovima, te da omogući efikasnije održavanje i dugoročnu zaštitu.

Ovaj rad se sastoji od pet poglavlja. Drugo poglavlje opisuje metodologiju, treće poglavlje prikazuje rezultate istraživanja dok je četvrto poglavlje diskusija. Zaključna razmatranja i pravci budućih istraživanja su prezentovani u petom poglavlju.

2. Metodologija

Nakon pažljivog pregleda relevantne literature, pristupilo se definisanju eksperimentalnog pristupa koji obuhvata izbor materijala, metode pripreme površina, postupak nanošenja premaza, kao i selekciju odgovarajuće vrste protivobraštajućih premaza. Eksperiment je vremenski ograničen na period od tri mjeseca, od aprila do jula 2024. godine.

Na osnovu karakteristika lokacije i ciljeva istraživanja, odlučeno je da se uzorci postavu u zoni plime i oseke, gdje su izloženi realnim uslovima morske sredine, kao i u kontrolisanim laboratorijskim uslovima. U zoni plime i oseke uzorci su raspoređeni u dvije prostorne orijentacije – vertikalnu i horizontalnu – kako bi se omogućila uporedna analiza uticaja položaja na performanse premaza.

Metodologija istraživanja obuhvata periodična mjerenja debljine premaza, vizuelna posmatranja stanja premaza, kao i praćenje eventualnih oštećenja premaza, te dokumentovanje svih promjena tokom trajanja eksperimenta.

Pravac istraživanja usmjeren je ka procjeni efikasnosti različitih vrsta premaza u zavisnosti od njihove prostorne orijentacije i uslova izloženosti, a cilj je identifikovati premaz koji omogućava dugotrajnu zaštitu od obraštanja.

Kao materijal, odabran je brodograđevni aluminijum serije 5083. Ovakav izbor zasniva se na činjenici da morski aluminij posjeduje specifična mehanička i hemijska svojstva koja ga čine pogodnim za dugotrajnu upotrebu u agresivnim morskim uslovima. Njegova otpornost na koroziju proističe iz formiranja stabilnog pasivnog oksidnog sloja, koji značajno usporava degradaciju materijala usljed dejstva morske vode. Pored izuzetne otpornosti na koroziju, morski aluminij odlikuje se i malom specifičnom masom, što ga čini posebno pogodnim u brodogradnji, gdje je smanjenje ukupne težine broda od suštinskog značaja. Upravo zbog široke praktične primjene u brodogradnji, konstrukciji plovila i drugih morskih struktura, morski aluminij predstavlja relevantan materijal za ispitivanje zaštitnih premaza. Na ovaj način, rezultati eksperimenta omogućavaju realnu procjenu performansi protivobrastajućih premaza u uslovima koji su što sličniji stvarnim, čime se obezbjeđuje njihova naučna i praktična validnost. Najčešće korišćeni materijal za ispitivanje efikasnosti i procesa degradacije protivobrastajućih premaza je čelik, dok su studije koje obuhvataju aluminijske podloge znatno rjeđe.

Aluminijum je nabavljen u vidu ploče veličine 1m², a zatim je isječen na dimenzije 10 cm • 10 cm, debljine 7.5 mm. Na materijalu su se mogle uočiti različite prljavštine i masnoće, pa se pristupilo pripremi površine. Metodom mehaničke pripreme površine uz pomoć brusnog diska različitih granulacija (P 40 srednja, P 180 fina, i P 280 i vrlo fina abrazivna granulacija) je obavljena priprema do standarda St 3. Na slici 1 prikazan je izgled površine prije i nakon obavljene pripreme.



a) Površina prije pripreme



b) Površina posle pripreme

Slika 1 – Izgled površine: a) prije obavljene pripreme i b) posle obavljene pripreme.

Nakon pripreme materijala, izvršena je nabavka premaza. Odabrana su tri samopolirajuća biocidna premaza, prikazana na slici 2, od proizvođača:

- AkzoNobel International, premaz Trilux 33 – Siva boja,
- Hempel, premaz Hempel's Hard Racing TecCel 76880 – Plava boja, i
- Sea Line, premaz Silver Cruise Polishing Antifouling – Crna boja.



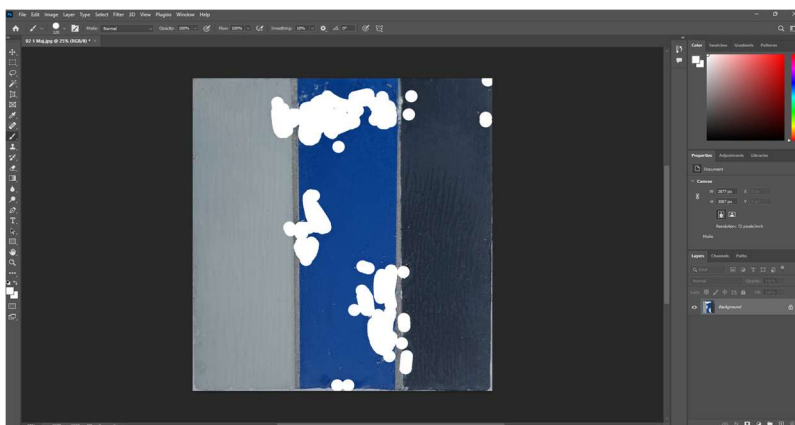
Slika 2 – Samopolirajući premazi upotrijebljeni u eksperimentu.

Premazivanje je obavljeno prema uputstvima proizvođača, a za premazivanje je korištena ručna metoda premazivanja upotrebom četki i valjka. Za svaki premaz je korištena posebna četka i posebni valjak kako ne bi došlo do miješanja premaza. Premazi su nanijeti u vidu tri trake, svaka dimenzija 10 cm • 3.33 cm. Prvobitno se pristupilo premazivanju premaza proizvođača Hempel, srednja traka, a potom traka sa strane. Premazi su ostavljeni da se suše 24h u zatvorenoj prostoriji gdje je prosječna temperatura bila oko 15°C. Nakon obavljenog premazivanja izvršena je vizuelna inspekcija, a na premazima nisu uočena oštećenja. Po obavljenoj vizuelnoj inspekciji pristupilo se i mjerenjima debljine premaza. Definirano je da se obavi po 50 mjerenja za svaki od premaza, odnosno ukupno 150 mjerenja po uzorku. Na slici 3 prikazan je digitalni mjerač debljine njemačkog proizvođača „List-Magnetik GmbH” uz pomoć kojeg su izvršena mjerenja.



Slika 3 - Mjerni instrument i proces mjerenja debljine premaza.

Pored mjerenja debljine premaza, analizirana su i oštećenja premaza nakon perioda izloženosti. Analiza oštećenja prikazana je na slici 4, a izvršena je pomoću programa za obradu slika Adobe Photoshop i metodom ručne selekcije piksela, kako bi se izračunao procenat oštećenja za svaki premaz, odnosno za svaki uzorak.



Slika 4 – Prikaz selekcije oštećenog dijela premaza.

Kao posljednji korak, obrada podataka, kao i sve statističke analize upoređenja, su urađene pomoću softvera IBM SPSS (eng. *Statistical Package for Social Sciences*) verzije 25. Navedeni softver koristi statistički test analize varijanse (eng. *Analysis of Variance – ANOVA*) za ispitivanje razlika između srednjih vrijednosti u više od dvije grupe sa dozvoljenom greškom odstupanja do 5%.

3. Rezultati istraživanja

3.1. Rezultati mjerenja debljine

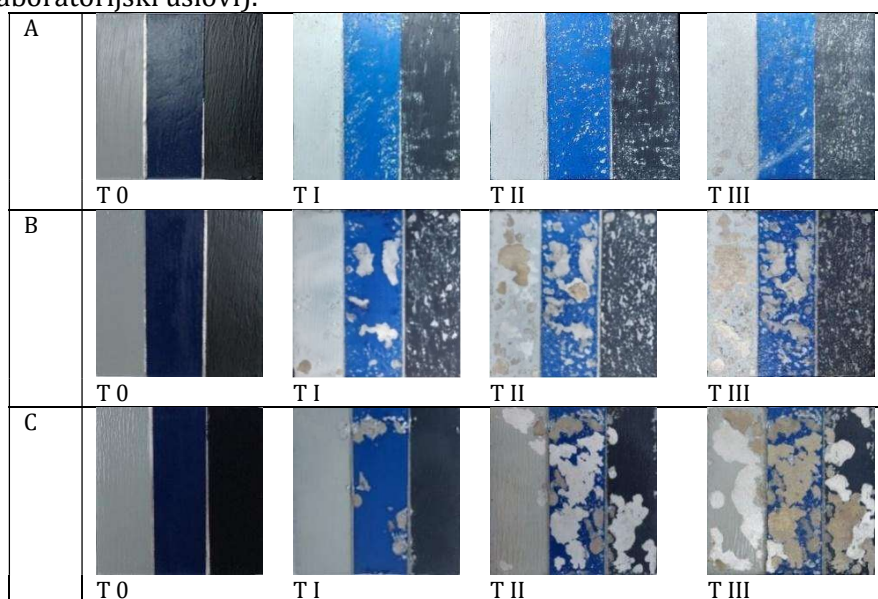
Prilikom analize premaza nanešenih na brodograđevni aluminijum, postavljenih u zoni plime i oseke i laboratorijskim uslovima, posmatran je obim i stepen degradacije u dvije prostorne orijentacije, odnosno vertikalno i horizontalno.

Srednje vrijednosti rezultata mjerenja debljine i prosječnih oštećenja premaza su prikazane po mjesecima izloženosti gdje su:

- T 0 – Srednja vrijednost rezultata prilikom početnog mjerenja,
- T I – Srednja vrijednost rezultata nakon 30 dana izloženosti,
- T II – Srednja vrijednost rezultata nakon 60 dana izloženosti i,
- T III – Srednja vrijednost rezultata nakon 90 dana izloženosti.

U posmatranom periodu konstatovana su manja oštećenja vertikalno postavljenog uzorka, veća oštećenja horizontalno postavljenog uzorka i uzorka u laboratorijskim uslovima. Procenat oštećenja nanešenih premaza prikazan je u tabeli 1. U tabeli su plavom bojom označena najmanja oštećenja, a crvenom najveća.

Izgled oštećenja premaza i uzorci su prikazani na slici 5. Na slici su slovima A, B i C označeni sljedeći uzorci: A (vertikalno), B (horizontalno) i C (laboratorijski uslovi).

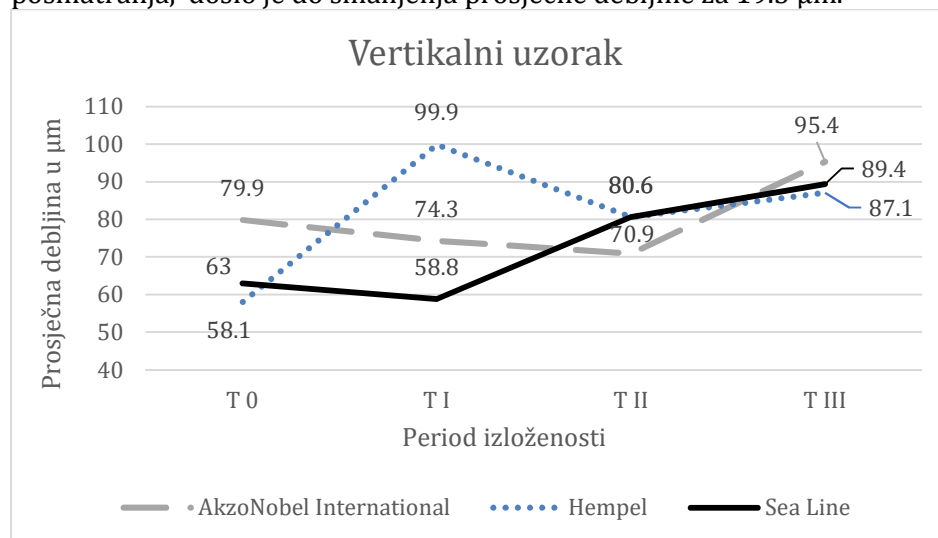


Slika 5 – Prikaz oštećenja premaza na različitim uzorcima.

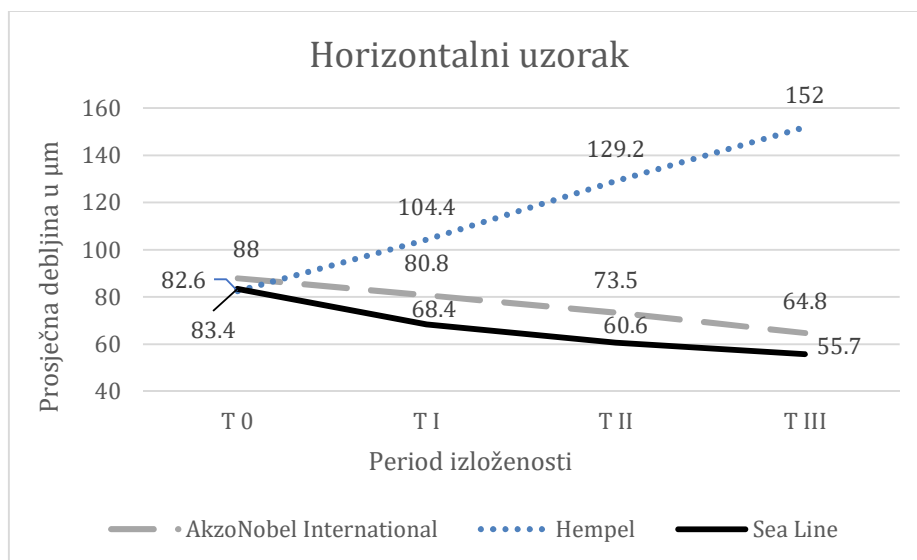
Tabela 1 – Procenat oštećenja premaza.

Vertikalno	Mjerenje	AkzoNobel International	Hempel	Sea Line
	T 0	0%	0%	0%
	T I	1%	13%	11%
	T II	6%	15%	26%
	T III	15%	18%	40%
Horizontalno	Mjerenje	AkzoNobel International	Hempel	Sea Line
	T 0	0%	0%	0%
	T I	10%	34%	26%
	T II	48%	59%	41%
	T III	67%	66%	45%
Laboratorija	Mjerenje	AkzoNobel International	Hempel	Sea Line
	T 0	0%	0%	0%
	T I	5%	27%	1%
	T II	18%	89%	38%
	T III	67%	94%	73%

Na slici 6 prikazane su prosječne vrijednosti debljine premaza kod vertikalno postavljenog uzorka u zoni plime i oseke. Prosječna debljina premaza proizvođača Sea Line i AkzoNobel International se smanjila već prvog mjeseca mjerenja, za 4.2 μm , i 5.6 μm . Smanjenje prosječne debljine premaza proizvođača AkzoNobel International se nastavilo i u drugom mjesecu, za dodatnih 3.4 μm . Nastankom korozije na nezaštićenom i oštećenom dijelu premaza proizvođača Hempel, prosječna debljina povećala se za 41.8 μm . Po završetku korozivnog procesa, tj. nakon drugog mjeseca posmatranja, došlo je do smanjenja prosječne debljine za 19.3 μm .

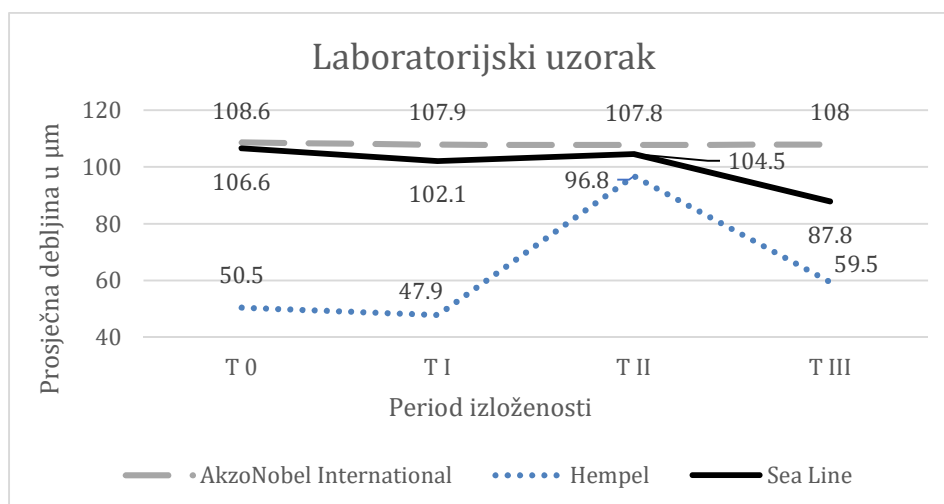
**Slika 6** – Prosječne vrijednosti debljine premaza na vertikalno postavljenom uzorku.

Na slici 7 prikazane su prosječne vrijednosti debljine premaza kod horizontalno postavljenog uzorka u zoni plime i osjeke. Mjerenjem se kod premaza proizvođača Sea Line i AkzoNobel International zabilježilo smanjenje prosječne debljine tokom sva 3 mjeseca posmatranja, pa im je ukupno smanjenje iznosilo 27.7 μm i 23.2 μm . Kod premaza proizvođača Hempel se prosječna debljina povećavala prilikom svakog mjerenja. Važno je napomenuti da se kod premaza proizvođača AkzoNobel International posljednjeg mjeseca posmatranja (T III) izmjerilo samo 15 mjerenja zbog oštećenja premaza. Slično je i sa premazom proizvođača Hempel, gdje se drugog i trećeg mjeseca (T II i T III) realizovalo po 25 mjerenja.



Slika 7 – Prosječne vrijednosti debljine premaza na horizontalno postavljenom uzorku.

Na slici 8 prikazane su prosječne vrijednosti debljine premaza kod uzoraka postavljenih u laboratorijskim uslovima. Premaz proizvođača AkzoNobel International najbolje prikazuje stvarne uslove jer nije došlo do smanjenja prosječne debljine. Važno je napomenuti da se, nakon tri mjeseca (T III), kod navedenog premaza izmjerilo samo 25 mjerenja zbog oštećenja premaza. Kod premaza proizvođača Sea Line prvog mjeseca je zabilježeno smanjenje prosječne debljine za 4.5 μm . Međutim, u drugom mjesecu izloženosti (T II) izvršeno je 30 mjerenja debljine premaza, a tokom posljednjeg mjeseca izloženosti (T III) izvršeno je 15 mjerenja zbog većih oštećenja premaza. Mjerenjem se kod premaza proizvođača Hempel i Sea Line prvog mjeseca zabilježilo smanjenje prosječne debljine za 2.6 μm . Na premazu proizvođača Sea Line došlo je do oštećenja premaza, pa se prilikom drugog i trećeg mjeseca (T II i T III) napravilo po 10 mjerenja za svaki mjesec.



Slika 8 – Prosječne vrijednosti debljine premaza na laboratorijskom uzorku.

3.2. Komparativno ispitivanje premaza

U okviru istraživanja takođe je ispitano da li postoji značajna razlika u debljini premaza u odnosu na položaj uzorka. Za ispitivanje razlika u odnosu na položaj uzorka je primijenjen t-test nezavisnih uzoraka, a rezultati su prikazani u tabeli 2. Statistička obrada podataka i analize su izvršene pomoću softvera IBM SPSS verzija 25. Za graničnu vrijednost značajnosti je korišćen nivo od 0.05.

Tabela 2 – Razlike u debljini premaza u odnosu na položaj uzorka za plimu i osjeku.

	Horizontalno	Vertikalno	t	p
	Srednja vrijednost u μm			
	AkzoNobel International			
Početno mjerenje	87.96 $\pm$ 34.38	79.93 $\pm$ 28.25	1.275	0.205
Posle mjesec dana	80.75 $\pm$ 29.26	74.27 $\pm$ 21.76	1.256	0.212
Posle dva mjeseca	73.54 $\pm$ 34.59	70.86 $\pm$ 18.47	0.482	0.631
Posle tri mjeseca	64.78 $\pm$ 32.34	95.41 $\pm$ 26.11	-3.767	<0.0005*
Ukupan period	79.30 $\pm$ 33.30	80.12 $\pm$ 25.57	-0.266	0.790
	Hempel			
Početno mjerenje	82.55 $\pm$ 40.60	58.11 $\pm$ 21.01	3.780	<0.0005*
Posle mjesec dana	104.42 $\pm$ 36.77	99.88 $\pm$ 68.00	0.415	0.679
Posle dva mjeseca	129.21 $\pm$ 69.46	80.64 $\pm$ 36.09	3.282	0.003*
Posle tri mjeseca	151.95 $\pm$ 98.54	87.09 $\pm$ 22.28	3.250	0.003*
Ukupan period	109.18 $\pm$ 62.83	81.43 $\pm$ 43.82	4.866	<0.0005*
	Sea Line			
Početno mjerenje	83.36 $\pm$ 59.92	62.97 $\pm$ 17.01	2.315	0.024
Posle mjesec dana	68.35 $\pm$ 32.44	58.75 $\pm$ 17.31	1.847	0.069
Posle dva mjeseca	60.61 $\pm$ 27.71	80.56 $\pm$ 34.62	-3.180	0.002*
Posle tri mjeseca	55.72 $\pm$ 27.05	89.43 $\pm$ 29.64	-5.939	<0.0005*
Ukupan period	67.01 $\pm$ 40.28	72.93 $\pm$ 28.55	-1.694	0.091

Statistička značajnost na nivou od 0.05

Na osnovu rezultata t-testa prikazanih u tabeli 2 može se zaključiti da postoji značajna razlika kod premaza proizvođača AkzoNobel International poslije tri mjeseca, gdje je debljina premaza posle tri mjeseca značajno veća kod vertikalno postavljenog uzorka. Zaključuje se da postoji i značajna razlika kod premaza proizvođača Hempel prilikom početnog mjerenja, posle drugog i trećeg mjeseca, kao i za ukupan period, gdje je debljina sloja u svim slučajevima veća kod horizontalno postavljenog uzorka. Takođe, zaključuje se da postoji značajna razlika kod premaza proizvođača Sea Line posle drugog i trećeg mjeseca, gdje je debljina sloja vertikalno postavljenog uzorka značajno veća u odnosu na horizontalni uzorak.

U okviru istraživanja je ispitano da li postoji značajna razlika u debljini premaza u zoni plime i oseke u odnosu na laboratorijska mjerenja. Kao i u prethodnom dijelu, primijenjen je t-test nezavisnih uzoraka, a rezultati su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3 – Razlike u debljini premaza između plime i oseke sa laboratorijskim mjerenjima.

	Plima i oseka	Laboratorijska mjerjenja	t	p
	Srednja vrijednost u μm			
	AkzoNobel International			
Početno mjerenje	83.95 $\pm$ 31.56	108.59 $\pm$ 23.98	-4.859	<0.0005*
Posle mjesec dana	77.51 $\pm$ 25.86	107.91 $\pm$ 25.82	-6.788	<0.0005*
Posle dva mjeseca	72.20 $\pm$ 27.62	107.81 $\pm$ 24.92	-7.683	<0.0005*
Posle tri mjeseca	88.34 $\pm$ 30.33	107.98 $\pm$ 37.08	-2.582	0.011*
Ukupan period	79.75 $\pm$ 29.28	108.08 $\pm$ 26.73	-10.821	<0.0005*
	Hempel			
Početno mjerenje	70.33 $\pm$ 34.43	50.53 $\pm$ 23.12	3.670	<0.0005*
Posle mjesec dana	102.15 $\pm$ 54.43	47.94 $\pm$ 21.62	8.681	<0.0005*
Posle dva mjeseca	96.83 $\pm$ 54.39	96.82 $\pm$ 59.90	0.009	0.999
Posle tri mjeseca	108.71 $\pm$ 66.52	59.52 $\pm$ 39.15	2.279	0.025
Ukupan period	93.32 $\pm$ 54.49	54.06 $\pm$ 31.26	7.478	<0.0005*
	Sea Line			
Početno mjerenje	73.16 $\pm$ 45.00	106.57 $\pm$ 23.79	-5.945	<0.0005*
Posle mjesec dana	63.55 $\pm$ 26.31	102.06 $\pm$ 21.08	-8.998	<0.0005*
Posle dva mjeseca	70.59 $\pm$ 32.77	104.50 $\pm$ 19.96	-6.919	<0.0005*
Posle tri mjeseca	72.57 $\pm$ 32.92	87.82 $\pm$ 28.78	-1.697	0.093
Ukupan period	69.97 $\pm$ 34.99	102.65 $\pm$ 23.10	-12.585	<0.0005*

Statistička značajnost na nivou od 0.05

Na osnovu rezultata t-testa prikazanih u tabeli 3, može se zaključiti da postoji značajna razlika kod premaza proizvođača AkzoNobel International u svim periodima, gdje je za sve periode mjerenja srednja vrijednost debljine sloja veća kod laboratorijskih mjerenja. Zaključuje se da postoji i značajna razlika kod premaza proizvođača Hempel kod početnog mjerenja, poslije prvog mjeseca i za ukupan period, gdje je u svim slučajevima veća prosječna debljina za uzorke postavljene u zoni plime i oseke. Takođe, zaključuje se da postoji značajna razlika kod premaza proizvođača Sea Line kod početnog mjerenja, poslije prvog i drugog mjeseca, kao i za ukupan period, gdje je za sve periode prosječna debljina uzoraka veća kod laboratorijskih mjerenja.

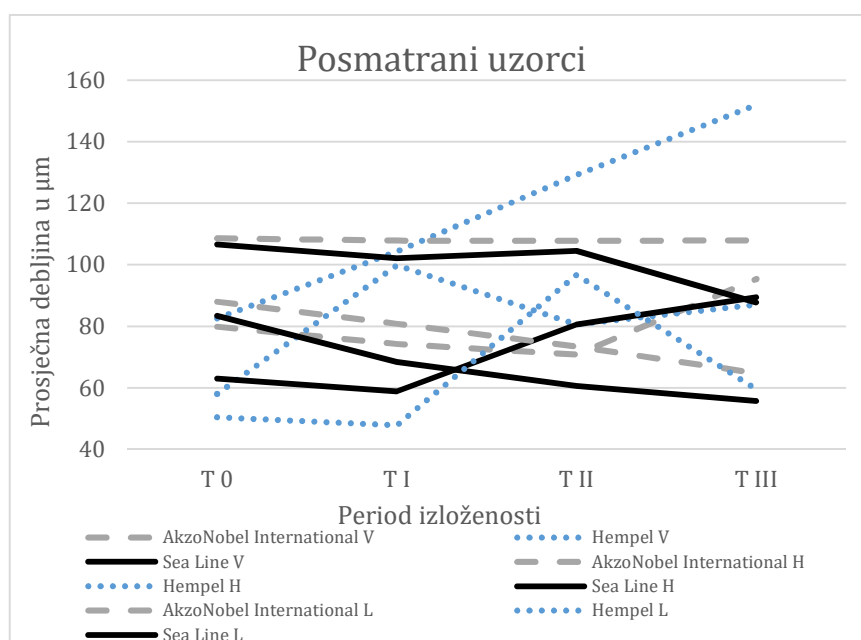
4. Diskusija

U razmatranom periodu istraživanja od 3 mjeseca na svim uzorcima zabilježena su oštećenja. Najmanja oštećenja (u vidu manjih tačaka) su primijećena na vertikalno postavljenom uzorku. Kod horizontalno postavljenog uzorka primijećena su veća oštećenja na premazima proizvođača Hempel i Sea Line. Na premazu proizvođača AkzoNobel International prvog mjeseca posmatranja nije došlo do oštećenja, međutim sljedećih mjeseci su se stvorila veća oštećenja. Kod laboratorijskog uzorka zabilježena su veća oštećenja, prvog mjeseca najveća oštećenja su bila na premazu proizvođača Hempel, drugog mjeseca najmanja oštećenja su bila na

premazu proizvođača AkzoNobel International, a tokom posljednjeg mjeseca primjećena su veća oštećenja na svim premazima. Prema Tabeli 1, prosječna oštećenja po uzorku su bila najveća u laboratorijskim uslovima sa 78%, na horizontalnom uzorku 59.3%, a na vertikalnom najmanja, odnosno 24.3%. U navedenom periodu premaz proizvođača AkzoNobel International imao je najmanje prosječno oštećenje sa 15% (vertikalno), a premaz proizvođača Hempel najveće, sa 94% (horizontalno). Premaz proizvođača Sea Line je imao srednja do velika oštećenja u rasponu od 40% do 73% u zavisnosti od položaja uzorka.

Na slici 9 prikazane su srednje vrijednosti debljine premaza kod svih posmatranih uzoraka. Na slici su prikazana oznake koje odgovaraju vrstama uzoraka prema sljedećem rasporedu:

- V – Uzorke vertikalno postavljene,
- H – Uzorke horizontalno postavljene, i
- L – Uzorke u laboratorijskim uslovima.



Slika 9 – Srednje vrijednosti debljine premaza kod posmatranih uzoraka.

Prema navedenoj slici, u posmatranom periodu ukupno je 16 puta došlo do samopolirajućeg efekta i smanjenja prosječne debljine premaza, dok je 11 puta došlo do povećanja prosječne debljine i pojave korozije.

Tokom pripreme i sprovođenja eksperimenta identifikovana su sljedeća ograničenja: ograničen izbor dostupnih protivobraštajućih premaza, nepostojanje uslova za primjenu automatskih metoda pripreme i nanošenja premaza, kao i vremensko ograničenje eksperimenta na period od tri mjeseca.

7. Zaključak

Istraživanjem uticaja uslova izloženosti i prostorne orijentacije na performanse premaza, premazanom na brodograđevnom aluminijumu, utvrđeno je da su vertikalno postavljeni uzorci u zoni plime i oseke pokazali najmanji stepen degradacije, dok su horizontalni uzorci i oni izloženi u laboratorijskim uslovima zabilježili veća oštećenja. Najveća prosječna oštećenja su evidentirana kod laboratorijskog uzorka, nešto manja kod horizontalnog, dok je vertikalni uzorak imao najmanja prosječna oštećenja.

Statistička analiza (t-test) potvrdila je značajne razlike u debljini premaza u odnosu na položaj uzoraka i uslove izloženosti, posebno poslije trećeg mjeseca izloženosti. Premaz proizvođača AkzoNobel International pokazao je najbolju otpornost, naročito u vertikalnoj orijentaciji, dok je premaz proizvođača Hempel imao najveća oštećenja, posebno u horizontalnom položaju.

Promjene u prosječnoj debljini premaza tokom posmatranog perioda ukazuju na promjenljiv uticaj morskog okruženja, kao i djelovanje samih premaza, sa ukupno 16 zabilježenih smanjenja i 11 povećanja debljine. Najveći broj smanjenja debljine izmjeren je kod horizontalno postavljenih uzoraka.

Dobijeni rezultati ukazuju na značaj pravilnog izbora premaza u cilju povećanja efikasnosti zaštite brodograđevnog aluminijuma u morskom okruženju od obraštanja, što je od suštinskog značaja za smanjenje operativnih troškova broda.

Buduća istraživanja biće usmjerena na detaljniju analizu performansi premaza kroz duži vremenski period i pri većem broju različitih uslova izloženosti.

Literatura

- [1] N. R. Mandal, *Ship Construction and Welding*, vol. 2. in Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, vol. 2. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [2] Bureau Veritas, *Rules on materials and welding for the classification of marine units NR216*. in Materials & Welding. Bureau Veritas Marine & Offshore, 2024.

- [3] W. Sakinah, R. F. Kusnadi, D. B. Prasetyaji, P. P. Aji, R. P. G. Widityo, and F. X. Kristianta, "The Effect of Shipbuilding Material Type on Biofouling Growth at Boom Marina, Banyuwangi, East Java, Indonesia," *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 44–51, 2023.
- [4] R. Adland, P. Cariou, H. Jia, and F.-C. Wolff, "The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning," *J. Clean. Prod.*, vol. 178, pp. 1–13, 2018.
- [5] M. L. Hakim, B. Nugroho, M. N. Nurrohman, I. K. Suastika, and I. Utama, "Investigation of fuel consumption on an operating ship due to biofouling growth and quality of anti-fouling coating," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2019, p. 012037.
- [6] Y. K. Demirel, O. Turan, and A. Incecik, "Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD," *Appl. Ocean Res.*, vol. 62, pp. 100–118, Jan. 2017.
- [7] A. Farkas, N. Degiuli, I. Martić, and R. Dejhalla, "Impact of hard fouling on the ship performance of different ship forms," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 10, p. 748, 2020.
- [8] S. Song, Y. K. Demirel, C. De Marco Muscat-Fenech, T. Tezdogan, and M. Atlar, "Fouling effect on the resistance of different ship types," *Ocean Eng.*, vol. 216, p. 107736, Nov. 2020.
- [9] M. P. Schultz, J. A. Bendick, E. R. Holm, and W. M. Hertel, "Economic impact of biofouling on a naval surface ship," *Biofouling*, vol. 27, no. 1, pp. 87–98, Jan. 2011.
- [10] S. A. Alghamdi and R. A. Quijada Cordova, "The impact of biofouling on marine environment: a qualitative review of the current antifouling technologies," 2019.
- [11] J. L. Molnar, R. L. Gamboa, C. Revenga, and M. D. Spalding, "Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity," *Front. Ecol. Environ.*, vol. 6, no. 9, pp. 485–492, Nov. 2008.
- [12] D. Butler, *A guide to ship repair estimates in man-hours*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [13] A. M. Berendsen, *Marine painting manual*. Springer Science & Business Media, 1989.
- [14] A. K. Dev, M. Saha, and G. Bruce, *Ship Repairing: Analyses and Estimates*, vol. 12. in Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, vol. 12. Singapore: Springer Singapore, 2022.
- [15] International Organization for Standardization, *ISO 8501-1:2007 – Preparation of steel substrates before application of paints and related*

- products – Visual assessment of surface cleanliness*, Geneva, Switzerland, 2007.
- [16] International Organization for Standardization, *ISO 8501-4:2020 – Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness – Part 4: Initial surface conditions, preparation grades and flash rust grades in connection with high-pressure water jetting*, Geneva, Switzerland, 2020.
- [17] International Maritime Organization, "Performance Standard for Protective Coatings (PSPC)," IMO, London, UK, MSC.215(82), 2006.
- [18] International Maritime Organization, "Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships (AFS)," IMO, London, UK, A.895(21), 2001.
- [19] B. Belamarić, "Utjecaj hrapavljenja oplakane površine na eksploatacijska svojstva broda," PhD Thesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2008.
- [20] I. Juraga, I. Stojanović, and T. Noršić, "Zaštita brodskog trupa od korozije i obraštanja," *Brodogr. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. Res. Dev.*, vol. 58, no. 3, pp. 278–283, 2007.
- [21] L. Tian, Y. Yin, W. Bing, and E. Jin, "Antifouling Technology Trends in Marine Environmental Protection," *J. Bionic Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 239–263, Mar. 2021.
- [22] K. Péliissier, N. Le Bozec, D. Thierry, and N. Larché, "Evaluation of the long-term performance of marine and offshore coatings system exposed on a traditional stationary site and an operating ship and its correlation to accelerated test," *Coatings*, vol. 12, no. 11, p. 1758, 2022.
- [23] F. Casse and G. W. Swain, "The development of microfouling on four commercial antifouling coatings under static and dynamic immersion," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 57, no. 3, pp. 179–185, 2006.
- [24] X. Wang, S. M. Olsen, E. Andres Martinez, K. N. Olsen, and S. Kiil, "Drag resistance of ship hulls: effects of surface roughness of newly applied fouling control coatings, coating water absorption, and welding seams," *J. Coat. Technol. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 657–669, Jul. 2018.
- [25] A. Farkas, "Numerical modelling of the effects of biofouling on ship resistance and propulsion characteristics," PhD Thesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2021.
- [26] N. Kovač, Š. Ivošević, and N. Momčilović, "Corrosion-induced thickness diminution of an ageing bulk carrier," *Brodogr. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. Res. Dev.*, vol. 75, no. 4, pp. 1–20, 2024.

- [27] N. Momčilović, N. Ilić, M. Kalajdžić, Š. Ivošević, and A. Petrović, "Effect of corrosion-induced structural degradation on the ultimate strength of a high-tensile-steel ship hull," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 5, p. 745, 2024.
- [28] G. Vukelic, B. Mihaljec, and Š. Ivošević, "Marine Environment Effect on Welded Additively Manufactured Stainless Steel AISI 316L," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 3, p. 459, 2025.
- [29] D. Pastorčić, G. Vukelić, and Š. Ivošević, "Welded steel in marine environment—Experimental and numerical study of mechanical properties degradation," *Mater. Today Commun.*, vol. 34, p. 105280, 2023.
- [30] N. Kovač, Š. Ivošević, G. Vastag, G. Vukelić, and R. Rudolf, "Statistical approach to the analysis of the corrosive behaviour of NiTi alloys under the influence of different seawater environments," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 19, p. 8825, 2021.
- [31] S. Ferraris and L. M. Volpone, "Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: materials, technologies, perspectives," in *The Fifth International Forum on Aluminium Ships, Tokyo, Japan*, Citeseer, 2005.
- [32] C. Vargel, *Corrosion of aluminium*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [33] J. Krolo, V. Špada, M. Bilušić, and N. Čatipović, "Welding of Solid-State-Recycled Aluminum Alloy: Comparative Analysis of the Mechanical and Microstructural Properties," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 3, p. 1222, 2025.
- [34] S. Gudić, L. Vrsalović, J. Krolo, A. Nagode, I. Dumanić Labetić, and B. Lela, "Corrosion Behaviour of Recycled Aluminium AlSi9Cu3 (Fe) Machining Chips by Hot Extrusion and Thixoforming," *Sustainability*, vol. 16, no. 4, p. 1358, 2024.

Comparative Analysis of Underwater Protective Coatings in Seawater Environment

Milan Radan, Špiro Ivošević

Abstract: Marine biofouling presents a significant challenge to vessel performance by increasing hydrodynamic drag, fuel consumption and greenhouse gas emissions. Therefore, the use of antifouling coatings is essential. This study investigates how environmental exposure and panel orientation influence the degradation and effectiveness of self-polishing antifouling coatings over time. Three commercially available coatings were selected and applied to aluminum panels prepared according to industry standards and manufacturers' guidelines. The coated panels were positioned in vertical and horizontal orientations and exposed to two conditions: natural intertidal zones and laboratory tanks simulating seawater. Over three months, regular inspections were conducted to assess coating thickness, surface degradation and biofouling accumulation. The results showed that coating erosion and biofouling varied significantly with panel orientation and exposure type; vertical panels generally exhibited less degradation than horizontal ones and those placed in laboratory conditions. Samples exposed to the intertidal zone demonstrated greater variability in coating performance. These findings suggest that both environmental conditions and panel orientation play critical roles in the long-term durability and efficiency of self-polishing antifouling coatings, providing valuable insights for optimizing their application in the maritime industry.

Keywords: Protective coatings, Shipbuilding aluminium, Coating thickness, Coating degradation.

Submitted: 25/08/2025

Accepted: 23/09/2025

Milan Radan

University of Montenegro,

Faculty of Maritime Studies Kotor

Put I Bokeljske brigade 44, Dobrota,

Kotor, Montenegro

Email: milanradan@edu.ucg.ac.me

Špiro Ivošević

University of Montenegro,

Faculty of Maritime Studies Kotor

Put I Bokeljske brigade 44, Dobrota,

Kotor, Montenegro

Email: spiroi@ucg.ac.me