

# ABRAZIJSKA I EROZIJSKA SVOJSTVA IC SUŠENIH PREMAZA

## ABRASION AND EROSION PROPERTIES OF IR DRIED COATINGS

Ivan Cindrić<sup>1</sup>, Lara Janković<sup>1</sup>, Ivan Stojanović<sup>1</sup>, Ivan Juraga<sup>1</sup>, Dražen Mezdić<sup>1</sup>, Hrvoje Franjić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10002 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Končar - Metalne konstrukcije d.d., Fallerovo šetalište 22, 10000, Zagreb, Hrvatska

**Ključne riječi:** abrazija, erozija, otpornost premaza, tvrdoća premaza

**Keywords:** abrasion, erosion, coating resistance, coating hardness

**Sažetak:** Otpornost na habanje često zauzima sporedno mjesto u odnosu na otpornost na koroziju u procesu odabira premaza. No, budući da abrazija i erozija s vremenom troše sustav zaštitnog premaza, rezultirajući prernom korozijom i oštećenjem materijala, potrebno je za specifične uvjete uzeti u obzir otpornost na habanje pri odabiru premaza. Sustavi zaštitnih premaza odabiru se na temelju radnog okruženja, željenog vijeka trajanja, jednostavnosti održavanja i budžeta. Iako premazi otporni na habanje bolje podnose zahtjevna okruženja i duže traju, obično su i znatno skuplj, kako u pogledu materijala, tako i u pogledu troškova rada. Premazi na bazi polimera, osiguravaju vrhunsko prianjanje i štite površinu od kemijskih i/ili mehaničkih oštećenja. Ovi premazi široko se koriste u različitim industrijama, od prerade hrane do proizvodnje automobila. U ovom radu ispitani su otapalni i vodorazrjedivi sustavi premaza s cinkom i bez cinka u temeljnog sloju koji su sušeni atmosferski i infracrvenim (IC) zračenjem. Provedena su tribološka ispitivanja abrazije i erozije te ispitivanja tvrdoće i prionjivosti premaza s ciljem procjene utjecaja cinka u premazu, vrste otapala i različitih načina sušenja na otpornost premaza. Premazi sa cinkom pokazali su bolju otpornost na abrazijsko i erozijsko trošenje, pri čemu su IC sušeni sustavi otporniji prema abrazijskom trošenju za sve slučajevе. Ispitivanjem prionjivosti i tvrdoće ostvareni su zadovoljavajući rezultati.

**Abstract:** Abrasion resistance often takes a second place to corrosion resistance in the coating's selection process. But since abrasion and erosion erode a protective coating system over time, resulting in premature corrosion and failure of material, abrasion resistance when choosing coatings for specific conditions must be considered. Protective coating systems are selected based on service environment, longevity of the coating system, ease of maintenance and budget. While abrasion-resistant coatings better withstand heavy-duty environments and last longer, they tend to be significantly more expensive, both in material and labor costs. Polymer-based coatings ensure superior adhesion and protect the surface from chemical and/or mechanical damage. These coatings are widely used in a variety of industries, from food processing to car manufacturing. In this paper, solvent and water-borne coating systems with zinc and without zinc in the primer, which were dried either with IC radiation or at room temperature were tested. Tribological tests of abrasion and erosion as well as tests of hardness and adhesion of coatings were performed in order to assess the influence of zinc in the coating, the type of solvent and different drying methods on the resistance of the coating. Zinc-rich coatings have shown better resistance to abrasion and erosion wear, with IR-dried systems being more resistant to abrasion wear for all cases. The systems achieved satisfactory results regardless of the type of coating and the drying method.

### 1 UVOD

Krajnji cilj svakog zaštitnog sustava premaza je zaštita materijalne imovine. Vodeći uzrok degradacije i oštećenja takve imovine je korozija. Kako bi se korozija kontrolirala, sustav premaza mora biti u stanju izdržati sva naprezanja koja se javljaju tijekom njegove upotrebe bez prijevremenog propadanja [1].

Pravilna priprema površine i nanošenje premaza doprinose dugovječnosti, ali uz to postoje i stalni zahtjevi za udarna opterećenja i abraziju tijekom rada. U suprotnom, premaz može puknuti (pri snažnim udarima) ili se polako trošiti (pri stalnom protoku vode ili pijeska) izlažući podlogu vodi, soli, atmosferilijama i, na kraju, koroziji. Oštećenja uslijed abrazije ili erozije manifestiraju se kao oštećenja koja zahvaćaju šire područje oko mjesta gdje je došlo do gubitka zaštite premazima. U mnogim industrijama kao što su pomorska, offshore, zrakoplovna i rudarska mora se osigurati trajnost i sigurnost za dijelove poput ventila, pumpi, cjevovoda, lopatica turbina itd. kako bi dana konstrukcija mogla izdržati zahtjeve erozivno-korozivne okoline [2, 3].

Premazi na bazi polimera, npr. uretan, polivinil klorid, akril, epoksid, silikon, fenolne smole i nitroceluloza osiguravaju vrhunsko prianjanje i štite površinu od kemijskih i/ili mehaničkih oštećenja. Ovi premazi široko se koriste u različitim industrijama, od prerade hrane do proizvodnje automobila. Najčešći i najvažniji mehanizmi kvarova polimernih kompozita su abrazija, erozija i zamor. Abrazijsko trošenje nastaje kada neravnine hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini i oštećuju površinu pomoću plastične deformacije ili loma. Abrazivna erozija je u osnovi udarna erozija s udarnim kutovima koji se približavaju nuli. Poliuretan se smatra prikladnim materijalom otpornim na eroziju te

se stavlja u upotrebu. Iako je proces erozije opsežno proučavan, mehanizmi abrazivne erozije poliuretana i dalje su nejasni [4, 5].

Erozija skida zaštitne slojeve s površine metala u obliku otopljenih iona ili dimenzijski stabilnih korozijskih produkata i onemogućuje njihovo zaštitno djelovanje pri čemu dolazi do izlaganja površine materijala korozivnom djelovanju medija. Istdobno, korozija povećava hrapavost površine metala i tvrdi kompaktni metal obično pretvara u meksički rahli korozijski produkt, što, dodatno, ubrzava eroziju. Metali koji stvaraju relativno debele slojeve zaštitnih korozijskih produkata (poput ugljičnog čelika) podložniji su erozijskoj koroziji od konvencionalnih pasivnih metala (poput nehrđajućeg čelika i titana) jer je sloj oksida nehrđajućih metala tanji i mnogo bolje prianja na površinu. Meki metali poput bakra i nekih bakrenih legura tako su podložni eroziji [6].

U ovom radu ispitani su dvokomponentni, otapalni i vodorazvodivi premazi, sa ili bez cinka u temelju, koji su sušeni atmosferski i infracrvenim (IC) zračenjem. Premazi su podvrgnuti ispitivanju otpornosti na abrazivno trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ te na erozijsko trošenje metodom erozije česticama. Praćen je gubitak mase i izmjerena je debljina suhog filma (DSF) nakon svakog ciklusa ispitivanja s ciljem usporedbe svojstava između pojedinih skupina premaza. Uz navedeno izmjerena je još tvrdoća olovkama te prionjivost premaza Pull-off metodom.

## 2 MATERIJALI I METODE

Ispitani su otapalni (SB) i vodorazvodivi (WB) sustavi premaza s cinkom i bez cinka u temeljnog sloju koji su sušeni atmosferski i infracrvenim (IC) zračenjem. Korišteni su premazi od dva proizvođača, a cijela podjela prikazana je u tablici 1. Premazi su naneseni na čelične ispitne površine koje su sačmarenne na kvalitetu čistoće Sa 2,5 prema normi ISO 8501 - 1 te je postignut srednji stupanj hrapavosti (medium „M“) sukladno normi ISO 8503 - 1. Dimenzije uzorka za ispitivanje otpornosti na abraziju su 25 x 75 x 12 mm, a kod ispitivanja otpornosti na eroziju koriste se uzorci dimenzija 18 x 18 x 18 mm.

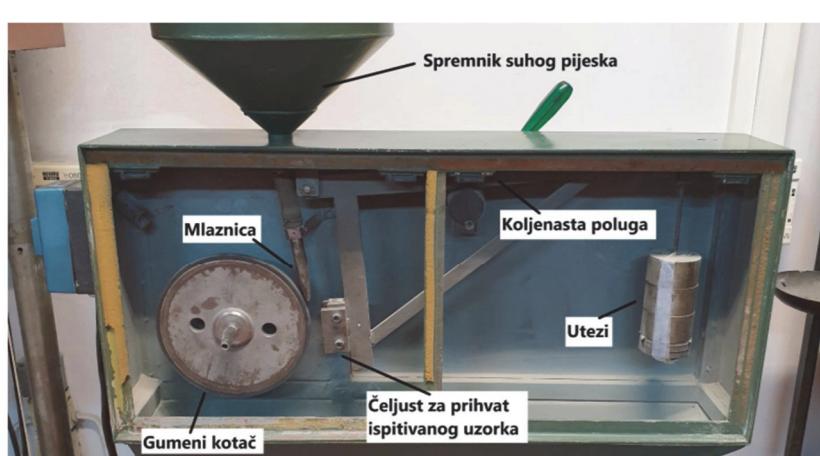
IC emiter koji radi na principu katalitičke infracrvene radijacije koristio se za ubrzano sušenje premaza prilikom čega je bitno da se valne duljine uređaja koji odašilje zračenje i premaza koji to zračenje prima poklapaju. Plinski katalitički IC emiter radi s valnim duljinama od 2 do 10 µm. Metoda provjere završetka sušenja je kontaktna i provodila se pomoću olovke, a premaz se smatrao suhim kada olovka više nije ostavljala trag. Kvaliteta sušenja ocijenjena je vizualnim pregledom, a prije početka triboloških ispitivanja na svim premazima je izmjerena debljina suhog filma (DSF).

Tablica 1. Aplicirani sustavi premaza s obzirom na način sušenja, vrstu otapala i temeljnog sloja

Način sušenja	Br. Uzorka	Aplicirani sustav: temelj - međusloj - završni sloj
IC / atm.	A1 / A2	SB: Zn(R) EP - EP - PUR
	B1 / B2	SB: EP - EP - PUR
	C1 / C2	WB: Zn(R) EP - EP - PUR
	D1 / D2	WB: EP - EP - PUR
	E1 / E2	SB: Zn(R) EP - EP - PUR
	F1 / F2	SB: EP - EP - PUR

Kratice: SB - otapalni (eng. solvent-borne); WB - vodorazvodivi (eng. water-borne); Zn(R) EP - epoksid obogaćen cinkom; EP - epoksid; PUR – poliuretan.  
Napomena: sustavi A-D su premazi njemačkog proizvođača, a E i F danskog proizvođača

Ispitivanje otpornosti na abrazivno trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ provedeno je u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Zagreb. Metoda ispitivanja otpornosti na abrazivno trošenje standardizirana je prema ASTM G65-94, a uređaj na kojem je ispitivanje provedeno prikazan je na slici 1.

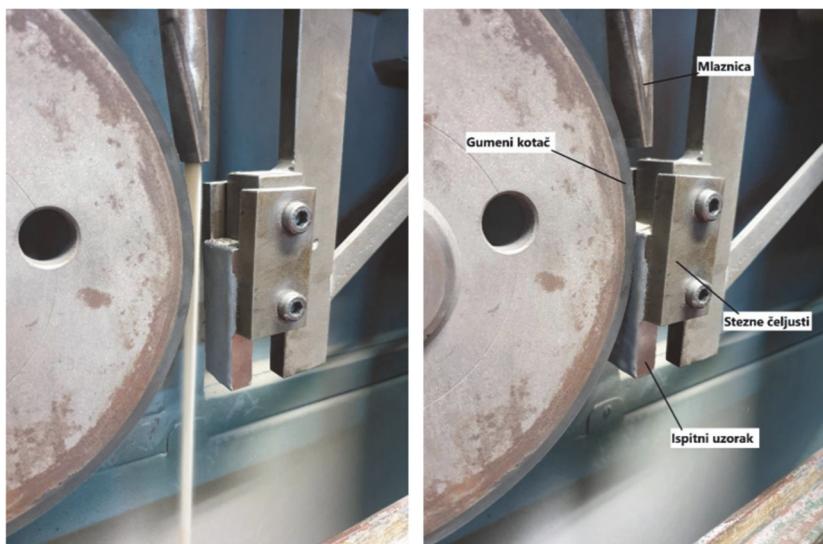


Slika 1. Dijelovi uređaja za ispitivanje otpornosti na abrazivno trošenje [7]

Test se sastoji od abradiranja epruvete standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70. Veličina zrnaca ovog kvarcnog pijeska je između 212 i 300 µm. Brzina prolaska pijeska mora biti između 250 i 400 g/min. Epruveta se naslanja na kotač obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore A, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila F iznosi 45 N, a ispitivanje je na svakom uzorku trajalo 3 i 5 sekundi zbog tankog sloja filma.

Mjera otpornosti na trošenje je gubitak mase tijekom ispitivanja. Uzorak se izvaja na vagi s preciznošću mjerjenja 0,0001 g prije i poslije ispitivanja. Iz izmjerene mase se izračuna gubitak volumena na temelju poznate gustoće ispitivanog materijala.

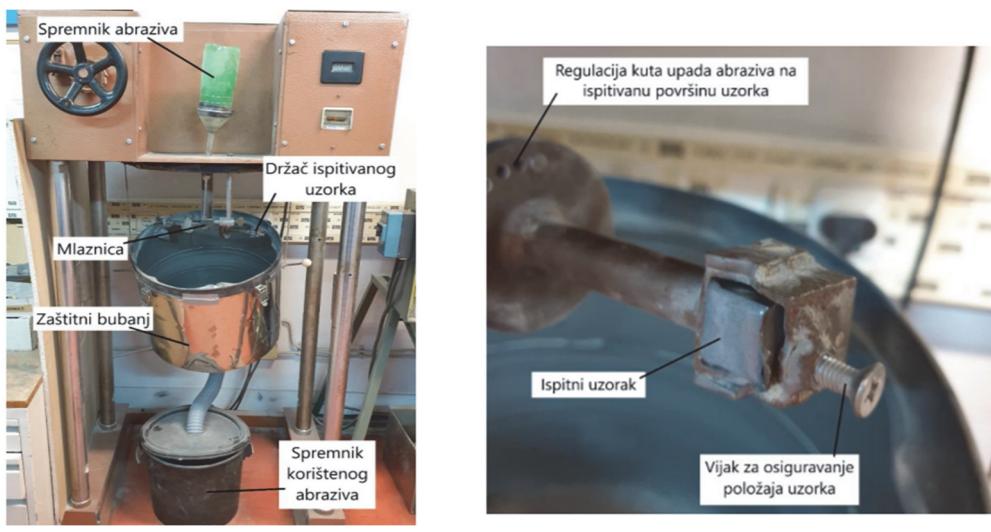
Slika 2 prikazuje stezne čeljusti koje pridržavaju ispitni uzorak za vrijeme ispitivanja otpornosti na abrazivsko trošenje te način prianjanja gumenog kotača na površinu premaza.



*Slika 2. Ispitni uzorak u steznim čeljustima pri ispitivanju otpornosti na abrazivsko trošenje [7]*

Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje, ispitivanje se provodi tako da se uzorci, koji se nalaze na držacima uzoraka, rotiraju velikom brzinom oko osovine te pri tome udaraju o čestice abraziva, tj. suhog pijeska, koje slobodnim padom izlaze iz spremnika kroz sapnicu. Na taj način dolazi do erozijskog trošenja na površini uzorka u koji udaraju čestice. Kut upada čestica moguće je regulirati ovisno o vrsti ispitivanja, a za ovaj slučaj je bio 90° čime je premaz izložen najvećem stupnju erozije. Abraziv korišten za potrebe ovog ispitivanja je kvarjni pijesak SiO<sub>2</sub>, tvrdoće oko 1200 HV te veličine čestica 0,15 - 0,25 mm, dok je vrijeme ispitivanja bilo 7, 14 i 21 minutu. Također, kao i kod prethodnog ispitivanja, uzorcima se prije i nakon ispitivanja mjeri masa te se gubitak mase preračunava kao gubitak volumena  $\Delta V$  [mm<sup>3</sup>].

Za ispitivanje otpornosti premaza na erozijsko trošenje, korišten je uređaj sa slike 3a, a ispitivanje je također provedeno u Laboratoriju za tribologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Slika 3b prikazuje ispitni uzorak u držaču prije početka ispitivanja.



*Slika 3. Dijelovi uređaja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje (desno) i ispitni uzorak prije početka ispitivanja (lijevo) [7]*

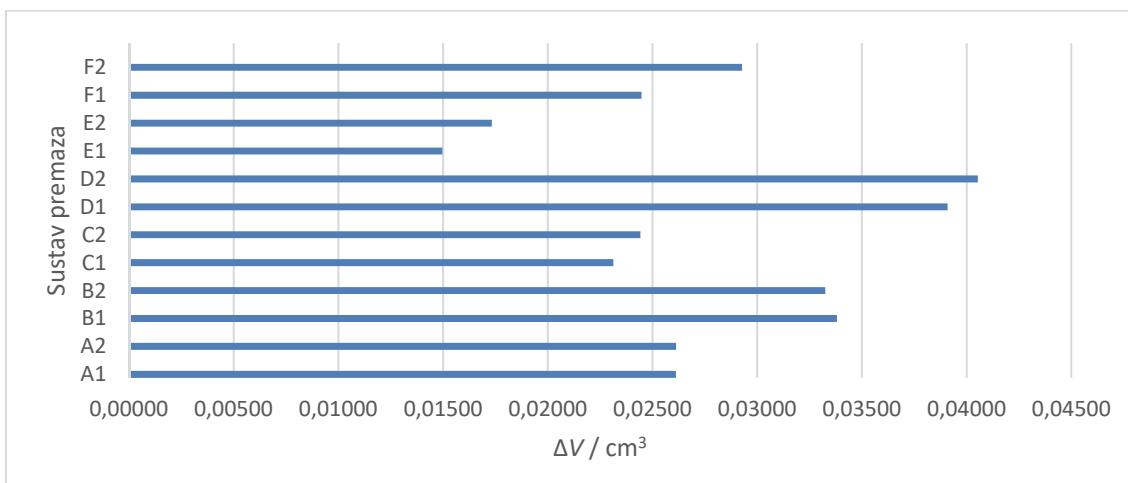
S ciljem utvrđivanja fizikalnih svojstava, provedena su ispitivanja tvrdoće i adhezije premaza. Tvrdoća se određivala olovkama tj. Pencil testom (HRN EN ISO 15184:2020), a adhezija premaza ispitivana je Pull-off testom prema normi HRN EN ISO 4624:2016.

### 3 REZULTATI I DISKUSIJA

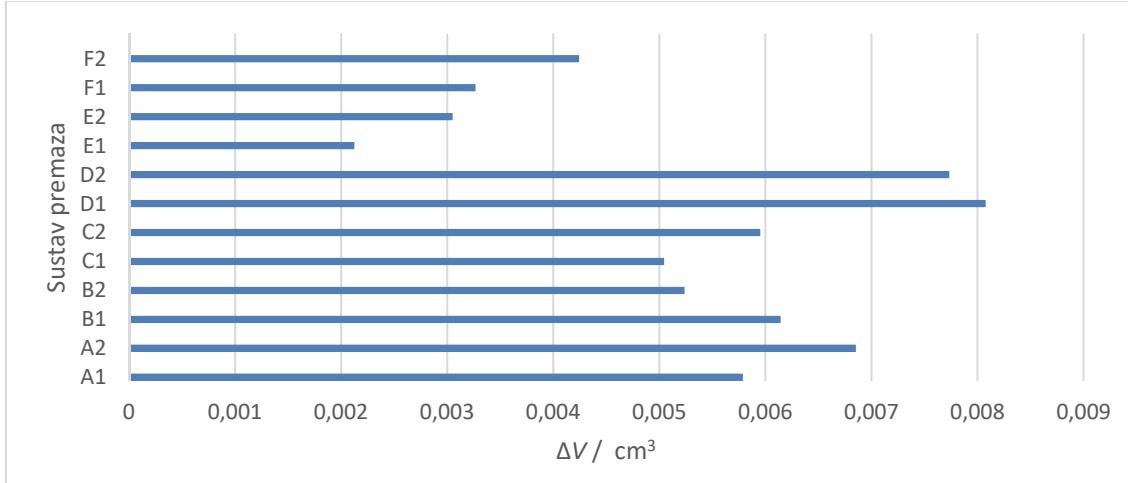
Rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju (slika 4) i eroziju (slika 5) su pokazali da sustavi premaza s cinkom u temelju generalno imaju manji gubitak volumena od onih bez cinka, s time što je za sustave premaza s cinkom u temelju (A, C, E) prema HRN EN ISO 12944 za C4 - H propisana debljina suhog filma (DSF) od 200 µm, dok je za sustave bez cinka (B, D, F) DSF 240 µm. Razlog manjeg trošenja odnosno manjeg gubitka volumena može biti sam cink u temeljnog premazu koji pruža bolju otpornost na takve vrste trošenja u odnosu na epoksid bez cinka. Najviše volumena i kod abrazijskog i kod erozijskog trošenja izgubio je vodorazredivi sustav premaza bez cinka u temelju (sustav D), s razlikom u tome što je kod abrazijskog trošenja veći gubitak za uzorak koji je sušen atmosferski, a kod erozijskog trošenja veći gubitak ima IC sušeni uzorak.

Uspoređujući sustave s cinkom u temelju, najmanju otpornost prema abrazijskom trošenju pokazao je sustav A, zatim sustav C pa sustav E. Kod sva tri sustava bolju otpornost pokazuju IC sušeni premazi (A1, C1, E1). Sustavi bez cinka rangirani od najmanje do najveće otpornosti prema abrazijskom trošenju su: D, B, F. Kada se uspoređuju načini sušenja, IC sušeni uzorci su otporniji za D i F, dok je kod sustava B bolji atmosferski sušeni uzorak. Premazi sustava E i F pripadaju danskom proizvođaču premaza, a premazi sustava A - D njemačkom i prilikom abrazijskog ispitivanja otpornosti boljim su se pokazali premazi danskog proizvođača.

Erozijsko trošenje ne daje tako jasnu razliku između sustava premaz s cinkom i bez cinka, no mogu se povući slične usporedbe unutar svake skupine kao i kod abrazijskog trošenja. Sustavi s cinkom u temelju imaju jednake vrijednosti kao i kod abrazijskog trošenja gdje od najmanje do najveće otpornosti redom idu sustav A, C, E pri čemu za sva tri sustava bolju otpornost imaju IC sušeni uzorci. I za sustave bez cinka u temelju poredak je isti (D, B, F) s razlikom u tome što kod sustava B i D veći gubitak volumena imaju IC sušeni uzorci, a kod sustava F atmosferski sušeni uzorak. I u ovom slučaju se boljim pokazao danski proizvođač premaza.

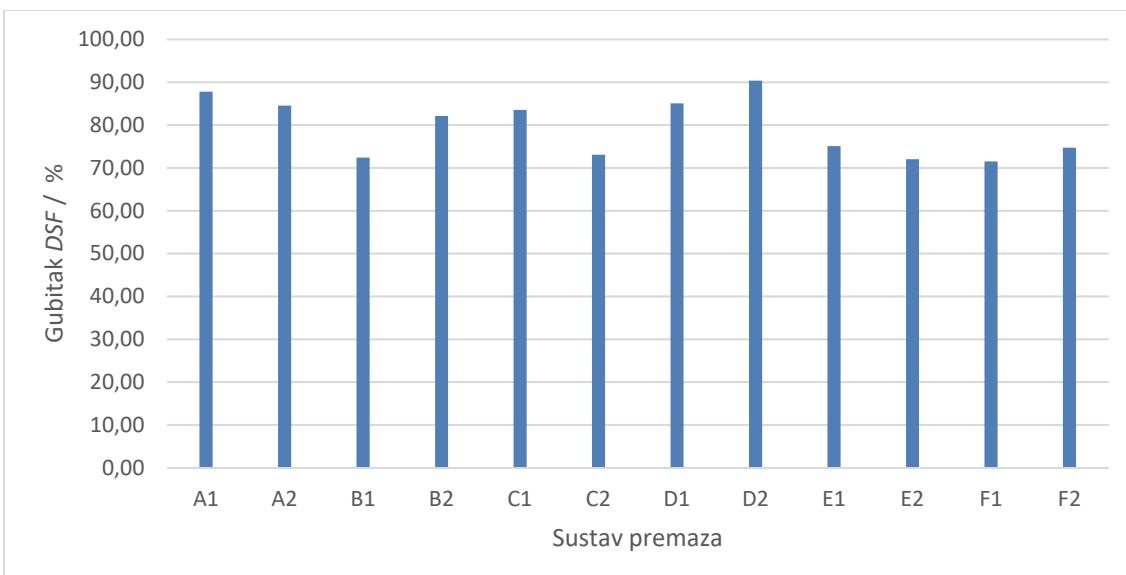


Slika 4. Prosječan gubitak volumena premaza tijekom ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

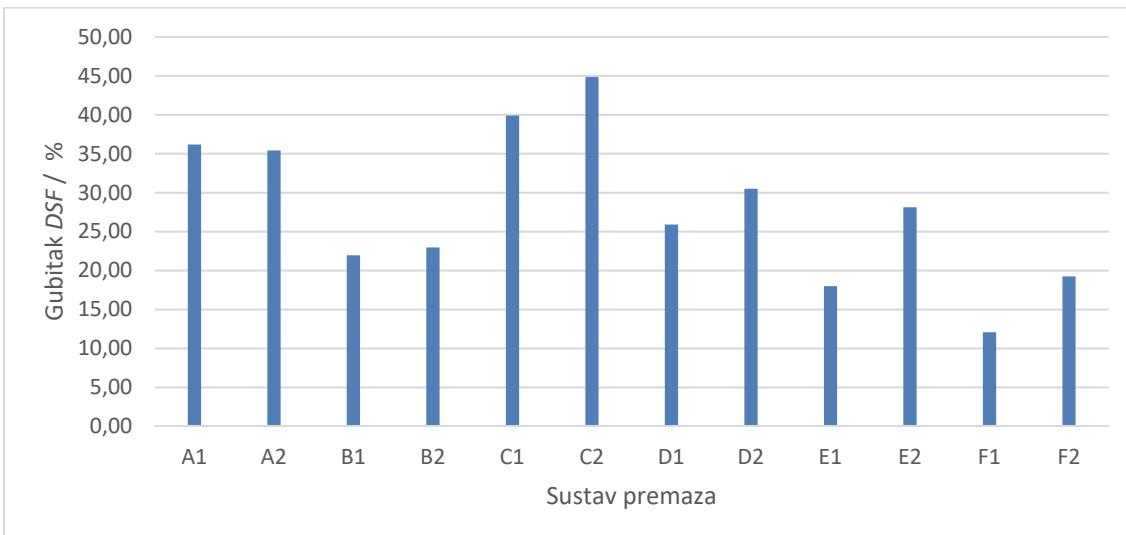


Slika 5. Prosječan gubitak volumena premaza tijekom ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje

Analizirajući gubitke DSF u slikama 6 i 7 uočava se da je značajniji gubitak debljine prilikom abrazijskog trošenja gdje se gubici u debljini kreću između 70 i 90 %. Pritom, najveće gubitke DSF imaju sustavi A i D, a najmanje sustavi E i F. Gubitci DSF kod erozijskog trošenja iznose između 10% i 45% od čega je sustav C izgubio najviše debljine, a sustav F najmanje.



*Slika 6. Gubitak DSF nakon ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje*



*Slika 7. Gubitak DSF nakon ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje*

Fizikalna ispitivanja sustava premaza pokazala su da svi sustavi zadovoljavaju kriterij prionjivosti s vrijednostima većim od 12 MPa. Najbolju prionjivost općenito, a i kod IC sušenih premaza ostvario je sustav E, dok je kod atmosferskih najveća vrijednost zabilježena na sustavima B. Najtvrdima su se pokazali sustavi D i C1, a najmekši A2. Rezultati fizikalnih ispitivanja prikazani su u tablici 2.

*Tablica 2. Fizikalna ispitivanja sustava premaza*

Sustav premaza	A1	B1	C1	D1	E1	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2
Pull-off / MPa	17,06	18,18	17,98	12,9	19,97	15,61	13,7	15,43	12,42	13,4	15,2	14,68
Pencil test	HB	HB	H	H	HB	HB	B	HB	HB	H	HB	HB

Tablica 3 prikazuje ispitne površine nakon 3 i 5 sekundi ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje. Vidi se povećanje abradirane površine na dijelu gdje je ispitivanje trajalo 5 sekundi. U tablici 4 su prikazani uzorci nakon ukupno 21 minute ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje.

Tablica 3. Uzorci nakon 3 i 5 sekundi abrazivskog ispitivanja, uvećanje 8x

Sustav premaza	A1	B1	C1	D1	E1	F1
3 s						
5 s						
Sustav premaza	A2	B2	C2	D2	E2	F2
3 s						
5 s						

Tablica 4. Uzorci nakon ukupno 21 minute erozijskog ispitivanja, uvećanje 8x

Sustav premaza	A1	B1	C1	D1	E1	F1
21 min						
Sustav premaza	A2	B2	C2	D2	E2	F2
21 min						

#### 4 ZAKLJUČAK

Premazi su jedna od osnovnih metoda zaštite metalnih konstrukcija od korozije, abrazije i erozije zbog čega danas na tržištu postoji mnogobrojni sustavi premaza različitih primjena ovisno o zahtjevima korisnika. U ovom radu ispitani su dvokomponentni, otapalni i vodorazredivi sustavi premaza, sa ili bez cinka u temelju, koji su sušeni atmosferski i IC zračenjem. Iako se primarno koriste u jakim korozivnim atmosferskim okruženjima zbog završnog dvokomponentnog poliuretanskog sloja, cilj ovog istraživanja bio je ispitati utjecaj različitih načina sušenja na njihovu otpornost prema abrazivskom i erozijskom trošenju te usporediti i druga fizikalna svojstva poput prionjivosti i tvrdoće. Promatrajući otpornost na abrazivsko trošenje boljim su se pokazali sustavi čiji je temeljni sloj obogaćen cinkom, i to oni uzorci koji su sušeni IC tehnologijom. Kod erozijskog trošenja razlika nije tako očita, no i tu su se generalno boljim pokazali sustavi s cinkom u temelju. Razlog tomu može biti veća otpornost cinkovih čestica na abrazivska i erozijska trošenja u odnosu na čisti epoksid ili manje debljine suhog filma koje se zahtijevaju za takve sustave. Svi sustavi su pokazali iznimno dobre rezultate prionjivosti pri čemu su kod svih sustava osim jednog (D) veću prionjivost ostvarili IC sušeni uzorci. Infracrvenom tehnologijom sušenja ostvarena su jednaka ili bolja zaštitna svojstva premaza, no za primjenu u abrazivnim i erozivnim okolinama zaštitni premazi bi trebali biti ojačani staklenim vlaknima ili keramičkim kuglicama radi povećanja otpornosti na takve načine trošenja.

#### ACKNOWLEDGEMENT

Ovaj rad temelji se na istraživanju u sklopu projekta „Pametno postrojenje za sušenje tekućih premaza“ (referentna oznaka: KK.01.2.1.02.) koji je koji je sufinanciran u okviru Operativnog programa konkurentnost i kohezija, iz Europskog fonda za regionalni razvoj. Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

#### 5 REFERENCES

- [1] Levy A.V. (1988). The Erosion-Corrosion Behavior of Protective Coatings. *Surface and Coatings Technology* 36 (1988), pp. 387 – 406.
- [2] Alqallaf J., Ali N., Amaral Teixeira J., Addali A. (2020). Solid Particle Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades-A Review. *Processes* 8, 984.
- [3] Wood R.J.K. (1999). The sand erosion performance of coating. *Materials and Design* 20, pp. 179 – 191, Elsevier.

- [4] Malaki M., Hashemzadeh Y., Fadaei Tehrania A. (2018). Abrasion resistance of acrylic polyurethane coatings reinforced by nanosilica. *Progress in Organic Coatings* 125, pp. 507–515, Elsevier.
- [5] Zhang S.W., Renyang He, Deguo W., Qiyun F. (2001). Abrasive erosion of polyurethane. *Journal of Materials Science* 36, pp. 5037 – 5043, Kluwer Academic Publishers.
- [6] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I., Alar V. (2007). Erosion corrosion and protection methods. *Zbornik radova, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, MATRIB*.
- [7] Kovačić T. (2020). Epoksidni premazi otporni na koroziju i mehaničko trošenje. *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*.