



USPOREDBA OTPORNOSTI NA TROŠENJE TVRDIH NAVARENIH PREVLAKA U MASI ABRAZIVA COMPARISON OF THE WEAR RESISTANCE OF HARD WELDED COATINGS BY ABRASIVE PARTICLES

I. Vidaković^{1,*}, G. Pačarek¹, G. Heffer¹, K. Šimunović², T. Giber¹

¹Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Republika Hrvatska

²Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Republika Hrvatska

* Autor za korespondenciju. E-mail: ivan.vidakovic@fazos.hr

Sažetak

U ovom radu predstavljeni su rezultati istraživanja abrazijskog trošenja tvrdih navarenih prevlaka. Za navarivanje je primijenjen REL postupak s dvije elektrode različite tvrdoće (Elgaloy Hard M 60 i Elgaloy Hard 100). Kao osnovni materijal na koji su navarene prevlake odabran je konstrukcijski čelik oznake S235. Ispitivanje otpornosti na trošenje provedeno je gibanjem u masi abraziva pri različitim brzinama uzorka (1, 1,75 i 2,5 m/s) te pri različitim kutovima sudara abraziva i trošene površine (30° i 60°). Cilj istraživanja bio je usporedba otpornosti na trošenje dvije navarene prevlake u ovisnosti o brzini gibanja i kutu sudara abraziva i trošene površine. Kao abraziv, u istraživanju je primijenjen kvarcni pijesak granulacije 0,5 – 1,5 mm. Prilikom eksploatacije, radni dijelovi poljoprivredne mehanizacije izloženi su djelovanju abraziva (tla) različite granulacije, različitog kemijskog i mehaničkog sastava, pri čemu najznačajniji abraziv u tlu predstavlja kvarc te je iz toga razlog kvarcni pijesak odabran kao abraziv. Istraživanjem je utvrđeno da povećanjem brzine uzorka dolazi do povećanja gubitka mase, dok se povećanjem kuta sudara abraziva i trošene površine gubitak mase smanjivao. Također, utvrđen je veći gubitak mase prevlake navarene elektrodom veće tvrdoće, što ukazuje da je prevlaka navarena elektrodom manje tvrdoće bolje apsorbirala energiju udara čestica abraziva.

Ključne riječi: trošenje u masi abraziva, tvrdo navarivanje, čelik S235, otpornost na trošenje

1. Uvod

Trošenje u masi abraziva javlja se unutar određenog tribosustava kojeg čine funkcionalni dio (trošena površina) i masa abraziva kroz koju se radni dio giba određenom brzinom, pri čemu masa abraziva predstavlja i okoliš tribosustava [1]. Trošenju u masi abraziva izloženi su radni dijelovi mnogih poljoprivrednih, građevinskih i rudarskih strojeva [2]. Proces trošenja ima negativan utjecaj na radne dijelove strojeva, a najčešće se očituje povećanjem financijskih izdataka koji su posljedica ranije zamjene ili potrebe za reparacijom istrošenih dijelova [3, 4]. U svrhu poboljšanja otpornosti na trošenje radnih dijelova strojeva primjenjuju se različiti postupci zaštite, koji se obično dijele na postupke promjene strukture radne površine ili promjene vrste materijala radne površine. U ovom istraživanju primijenjen je postupak promjene vrste materijala radne površine primjenom postupka navarivanja. Mnogi autori navode postupak navarivanja kao najučinkovitiji postupak za produljenje životnog vijeka dijelova izloženih trošenju te smanjenja troškova zamjene [5-8]. Kao dodatni materijal, u istraživanju su primijenjene dvije elektrode izrađene od legura različitog kemijskog sastava i različite tvrdoće.

Cilj istraživanja bio je utvrditi i usporediti otpornost na trošenje primijenjenih legura gibanjem u masi abraziva u ovisnosti o različitoj brzini i kutu sudara čestica abraziva i trošene površine.

2. Materijal i metode

2.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal, u istraživanju je primijenjen konstrukcijski čelik oznake S235 (EN 10025-2). Ovaj čelik ubraja se u skupinu konstrukcijskih čelika, a primjenjuje se za izradu različitih konstrukcijskih dijelova i uređaja. Također, konstrukcijski čelici moraju imati dobra mehanička svojstva, dobru otpornost na trošenje, visoku zavraljivost te dobru obradljivost odvajanjem čestica i plastičnu oblikovljivost [9]. Na slici 1 prikazan je čelik S235 primijenjen kao osnovni materijal u istraživanju.



Slika 1. Čelik S235 primijenjen u istraživanju

Navedeni čelik izabran je zbog svojstva dobre zavarljivosti i prihvatljive cijene nabave. Uzorci su izrezani na dimenzije 40 x 25 x 15 mm što odgovara dimenzijama držača uzoraka za ispitivanje trošenja u masi abraziva.

2.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal, u istraživanju su primijenjene dvije elektrode Elgaloy Hard M 60 (prosječne površinske tvrdoće 58 HRC) i Elgaloy Hard 100 (prosječne površinske tvrdoće 63 HRC), švedskog proizvođača Elga. Prema specifikacijama proizvođača [10] prevlake izrađene ovim elektrodama odlikuju se visokom tvrdoćom i otpornošću na abrazijsko trošenje. U tablici 1, naveden je kemijski sastav primijenjenih elektroda.

Tablica 1. Kemijski sastav primijenjenih elektroda [11,12]

Elektroda	Mo	V	C	Cr	Si	Mn	P	S
Hard M 60	-	-	0,45	9,20	2,95	0,35	0,025	0,002
Hard 100	0,5	0,4	3,5	30	-	-	-	-

Navarivanje uzoraka izvedeno je postupkom ručnog elektro-lučnog zavarivanja na uređaju Fronius TPS 320i. Navedeni uređaj je univerzalni aparat za zavarivanje, dostupan u različitim izvedbama, ovisno o jakosti struje zavarivanja (320 – 600 A).



Slika 2. Aparat za zavarivanje Fronius TPS 320i

Uz prethodno navedeno, ovaj uređaj dostupan je u varijantama specifičnim za određenu zemlju, što omogućava njegovu primjenu u regijama s različitim mrežnim naponima.

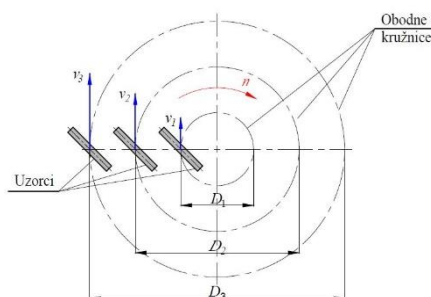
2.3. Pokus otpornosti na trošenje

Pokus otpornosti na trošenje izveden je na uređaju za trošenje u masi abraziva pri odabranim kinematskim parametrima pogodnim za ispitivanje. Prilikom ispitivanja, ispitni uzorci postavljaju se

u držač uzoraka koji je koji je povezan s trokrakim nosačem uzoraka postavljenim na pogonsko vratilo uređaja, koje je pogonjeno elektromotorom. Navedeni uzorci se prilikom ispitivanja gibaju kružno kroz masu abraziva te se na taj način simuliraju radni uvjeti vrlo slični uvjetima prilikom eksploatacije poljoprivrednih strojeva. Uređaj za trošenje u masi abraziva prikazan je na slici 3. Kinematske veličine navedenog uređaja prikazane su na slici 4.



Slika 3. Uređaj za trošenje u masi abraziva,
[1]



Slika 4. Shematski prikaz kinematskih veličina u
pokusu trošenja u masi abraziva [1]

Navedeni uređaj ima slijedeće mogućnosti:

- primjena različite vrste abraziva (ovisno o granulaciji, obliku, vrsti materijala)
- primjena različite vrste uzoraka u istim uvjetima ispitivanja
- mogućnost odabira različitih parametara ispitivanja (brzina uzorka, kut sudara)
- mogućnost ponavljanja ispitivanja s jednakim parametrima ispitivanja u cilju kvalitetne statističke obrade podataka [1].

2.4. Abraziv primijenjen u pokusu

Budući je ovo istraživanje provedeno u svrhu utvrđivanja otpornosti prema abrazivskom trošenju i mogućnosti primjene istraživanih prevlaka na dijelovima poljoprivredne tehnike kao zaštite od trošenja, u istraživanju je kao abraziv primijenjen kvarcni pijesak. Prilikom eksploatacije, radni dijelovi poljoprivrednih strojeva izloženi su djelovanju abraziva (tla) različitog mehaničkog sastava, pri čemu je kvarc najvažniji abraziv. U tablici 2 naveden je kemijski sastav kvarcnog pijeska trgovačke oznake "FB150S" koji je primijenjen u istraživanju.

Tablica 2. Kemijski sastav kvarcnog pijeska "FB150S" [13]

Kemijski element, % mase	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O
	> 99	0,297	0,658	0,032	0,041	0,027	0,009	0,104

Primijenjeni kvarcni pijesak je granulacije 0,5 – 1,5 mm, ispran i očišćen od zemlje i nečistoća te osušen na visokoj temperaturi.



2.5. Parametri izvođenja pokusa

Istraživanje otpornosti na trošenje provedeno je u ovisnosti o brzini uzorka i kutu sudara abraziva i trošene površine. Brzina uzorka varirana je na tri razine (1, 1,75 i 2,5 m/s), dok je kut sudara variran na dvije razine (30° i 60°) s ciljem utvrđivanja utjecaja brzine uzorka i kuta sudara abraziva i trošene površine na abrazijsko trošenje. Ukupni put trošenja iznosio je 20 000 metara.

2.6. Način utvrđivanja gubitka mase uzoraka

Mjera otpornosti na trošenje bio je gubitak mase ispitivanih uzoraka. Navedeni gubitak utvrđen je na temelju razlike između mase ispitivanih uzoraka prije pokusa trošenja i nakon pokusa trošenja u masi abraziva. Ispitivani uzorci su prije vaganja temeljito očišćeni acetonom te osušeni strujom vrućeg zraka. Vaganje uzoraka je provedeno na analitičkoj vagi Mettler Toledo AB204, preciznosti 10^{-4} g te mjernog intervala 0 do 210 g. Mjerenje je provedeno u Laboratorijskom praktikumu za agroekologiju i zaštitu okoliša, Zavoda za agroekologiju i zaštitu okoliša, Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek.

3. Rezultati i rasprava

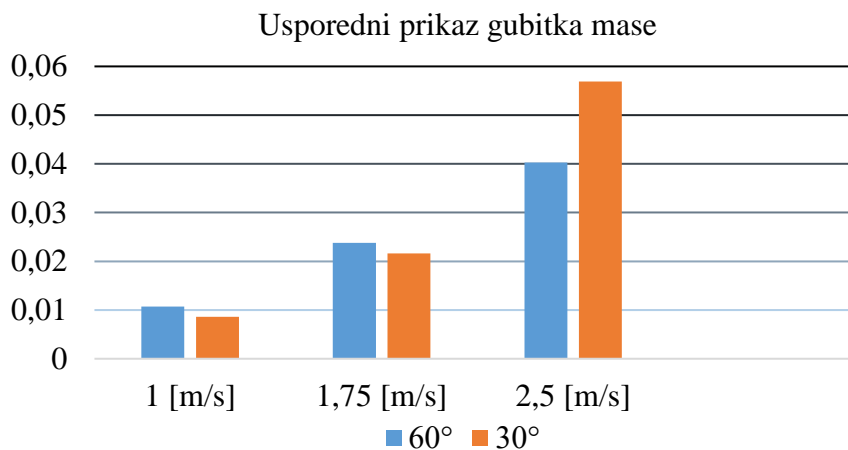
3.1. Eksperimentalni rezultati

U tablici 3 dan je usporedni prikaz prosječnih gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva nakon 3 ponavljanja. Brzine gibanja ispitnih uzoraka bile su 1, 1,75 i 2.5m/s pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60° i 30°.

Tablica 3. Usporedni prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30° [14]

Kut sudara, [°]	MEKŠA ELEKTRODA		
	Brzina uzorka, [m/s]		
	1	1,75	2,5
	Prosječni gubitak mase nakon 3 ponavljanja, [g]		
60°	0,0107	0,0238	0,0403
30°	0,0086	0,0216	0,0569

Prosječni usporedni gubitci mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom oznake HARD 60 M na konstrukcijskom čeliku oznake S235 pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi kvarcnog pijeska oznake FB150S prikazani su na slici 5.



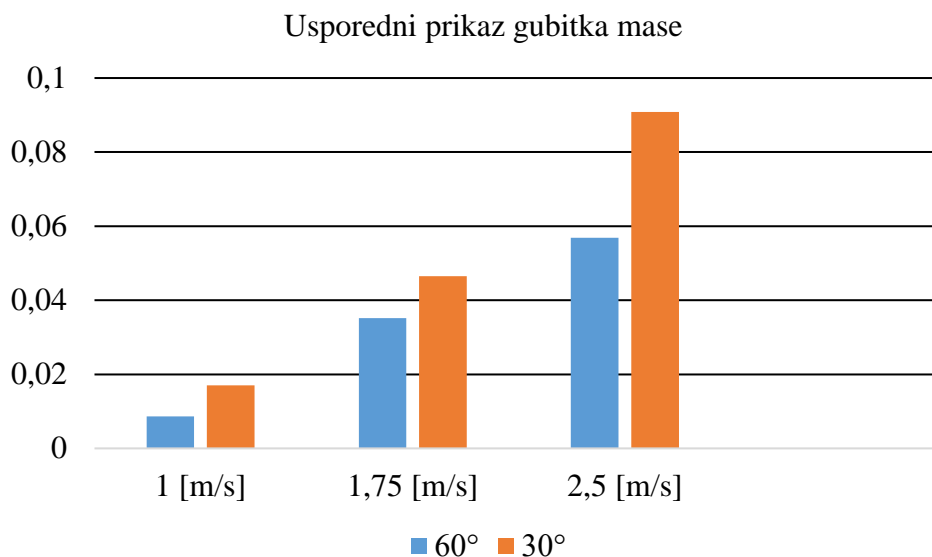
Slika 5. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30° [14]

U tablici 4 dan je usporedni prikaz prosječnih gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri ispitivanju abrazijskog trošenja gibanjem u masi abraziva nakon 3 ponavljanja. Brzine gibanja ispitnih uzoraka bile su 1, 1,75 i 2,5 m/s pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60° i 30°.

Tablica 4. Usporedni prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30° [14]

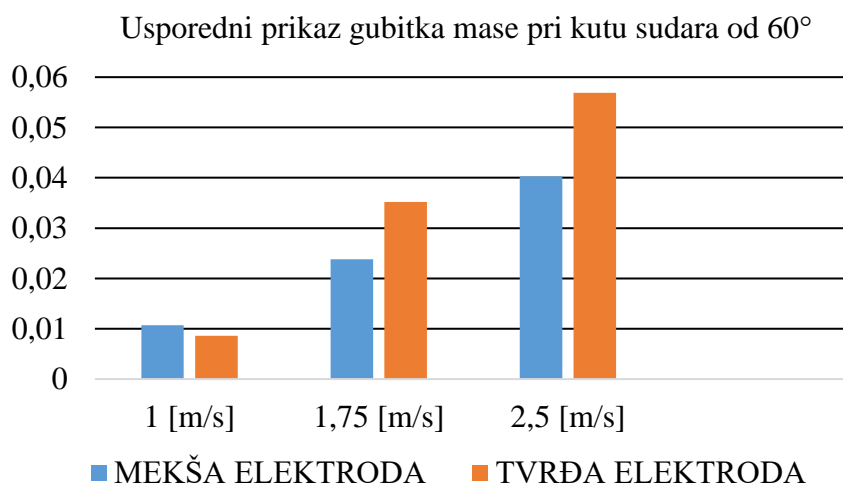
Kut sudara, [°]	TVRĐA ELEKTRODA		
	Brzina uzorka, [m/s]		
	1	1,75	2,5
	Prosječni gubitak mase nakon 3 ponavljanja, [g]		
60°	0,0086	0,0352	0,0569
30°	0,0170	0,0465	0,0908

Prosječni usporedni gubitci mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom oznake HARD 100 M na konstrukcijskom čeliku oznake S235 pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi kvarcnog pijeska oznake FB150S prikazani su na slici 6.



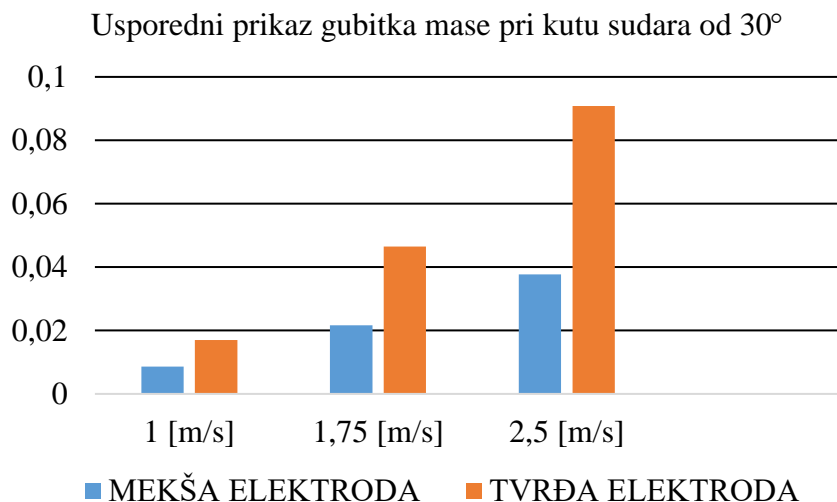
Slika 6. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30° [14]

Na slici 7 usporedno je prikazan prosječan gubitak mase za mekšu i tvrđu elektrodu pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°.



Slika 7. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom i tvrdom elektrodom pri različitim brzinama gibanja i kutu sudara od 60° [14]

Na slici 8 dan je usporedni prikaz prosječnog gubitka mase za mekšu i tvrđu elektrodu pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°



Slika 8. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom i tvrdom elektrodom pri različitim brzinama gibanja i kutu sudara od 30° [14]

3.2. Rasprava

Ispitivanjem trošenja mekše elektrode (58 HRC) prilikom gibanja u masi abraziva brzinom od 1 m/s i pri kutu sudara od 60°, utvrđen je gubitak mase od 0,0107 g, nakon tri ponavljanja. Povećanjem brzine gibanja na 1,75 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0238 g, što je 122,36 % više od prethodnog. Ispitivanje trošenja pri brzini od 2,5 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0403 g, što je 69,33 % više od prosječnog trošenja pri brzini od 1,75 m/s i 276,64 % više nego pri brzini od 1 m/s. Ispitivanjem trošenja mekše elektrode prilikom gibanja u masi abraziva brzinom od 1 m/s i pri kutu sudara od 30°, utvrđen je gubitak mase nakon tri ponavljanja od 0,0086 g. Povećanjem brzine gibanja na 1,75 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0216 g, što je 151,16 % više od prethodnog. Ispitivanje trošenja pri brzini od 2,5 m/s, prosječan gubitak mase iznosi 0,0569 g, što je 163,4 % više od prosječnog trošenja pri brzini od 1,75 m/s i 561,83 % više nego pri brzini od 1 m/s.

Ispitivanjem trošenja tvrde elektrode (63 HRC) prilikom gibanja u masi abraziva brzinom od 1 m/s i pri kutu sudara od 60°, utvrđen je gubitak mase nakon tri ponavljanja od 0,0086 g. Povećanjem brzine na 1,75 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0352 g, što je 309,3 % više od prethodnog. Ispitivanje trošenja pri brzini od 2,5 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0596 g, što je 61,65% više od prosječnog trošenja pri brzini od 1,75 i 561,63 % više nego pri brzini od 1 m/s. Ispitivanjem trošenja tvrde elektrode prilikom gibanja u masi abraziva brzinom od 1 m/s i pri kutu sudara od 30°, utvrđen je gubitak mase nakon tri ponavljanja od 0,0170 g. Povećanjem brzine gibanja na 1,75 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0465 g, što je 173,53% više od prethodnog. Ispitivanje trošenja pri brzini od



2,5 m/s prosječan gubitak mase iznosi 0,0908 g, što je 95,27 % više od prosječnog trošenja pri brzini od 1,75 m/s i 434,12 % više nego pri brzini od 1 m/s.

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je da povećanjem brzine gibanja uzoraka dolazi do povećanja gubitka mase uzoraka. Ovakvi rezultati ispitivanja bili su očekivani jer povećanjem brzine uzoraka dolazi do povećanja kinetičke energije udara između čestica abraziva i trošene površine, budući da u izrazu za kinetičku energiju brzina sudjeluje s kvadratnom vrijednosti. Također, iz rezultata provedenog istraživanja vidljivo je da je pri manjem kutu sudara (30°) čestica abraziva i trošene površine gubitak mase veći nego pri većem kutu sudara (60°), kod svih ispitanih uzoraka. Takav rezultat je posljedica dužeg kontakta čestica abraziva i trošene površine pri manjem kutu sudara. Pri većem kutu sudara, čestice abraziva se više odbijaju od površine te je kontakt čestica abraziva i trošene površine kraći.

Iz rezultata prikazanih u tablicama 3 i 4 te dijagramskih prikaza danih na slikama 7 i 8 vidljivo je da je tvrđa elektroda imala veći prosječni gubitak mase pri oba kuta sudara. Takav rezultat vjerojatno je posljedica veće žilavosti prevlake navarene s mekšom elektrodom koja je bolje apsorbirala kinetičku energiju udara čestica abraziva o trošenu površinu.

4. Zaključak

Cilj ovog rada bio je analizirati ponašanje trošenja navarenih legura različite tvrdoće na podlozi od navedenog konstrukcijskog čelika, gibanjem u masi abraziva u ovisnosti o brzini gibanja i kutu sudara čestica abraziva i trošene površine.

Rezultati ispitivanja pokazuju kako je najmanji gubitak mase zabilježen pri najmanjoj brzini uzoraka (1 m/s) i većem kutu sudara mase abraziva i trošene površine uzoraka (60°). Najveći gubitak mase postignut je pri najvećoj brzini uzoraka (2,5 m/s), te pri manjem kutu sudara (30°). Takav rezultat je posljedica dužeg kontakta između čestica abraziva i trošene površine pri manjem kutu sudara te veće energije udara čestica abraziva u trošenu površinu pri većoj brzini uzoraka.

Uspoređujući dobivene rezultate ispitivanja otpornosti na trošenje gibanjem u masi abraziva mekše i tvrđe elektrode vidljivo je da je tvrđa elektroda imala prosječno veći gubitak mase pri oba kuta sudara čestica abraziva i trošene površine. Kako je ranije navedeno, ovakav rezultat je posljedica boljeg apsorbiranja kinetičke energije prevlake navarene mekšom elektrodom.

5. Literatura

- [1] Vidaković, Ivan. (2021). Statističko modeliranje i optimiranje trošenja tvrdih toplinski naštrecanih prevlaka u masi abraziva. Doktorska disertacija. Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu.
- [2] Ivušić, Vinko. (1998). Tribologija. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu. (ISBN 953-96038-3-8).



- [3] Singh Kang, Amardeep; Singh Cheema, Gurmet, Singla, Shivali. (2014). Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades. *Procedia Engineering*, 97, 1442-1451. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.426>
- [4] Narayanaswamy, Balaji; Hodgson, Peter; Beladi, Hossein. (2016). Effect of particle characteristics on the two-body abrasive wear behavior of a perlitic steel. *Wear*, 354-355, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.001>
- [5] Singh Kang, Amardeep; Singh, Gurjinder; Singh Cheema, Gurmeet. (2017). Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel. *Materials Today: Proceedings*, 4, No.8, 7991-7999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.136>
- [6] Singh Mann, Parvinkal; Kaur Brar, Navjeet. (2015). Tribological aspects of agricultural equipments: a review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 02(03), 1704-1708.
- [7] Buchely, M.F.; Gutierrez, J.C.; Leon, L.M.; Toro, A. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>
- [8] Sobachkin, Aleksei; Sitnikov, Alexander; Sviridov, Alexander. (2015). Evaluation of Wear Resistance of Products on The Basis of Mechanically Activated Materials. *Applied Mechanics and Materials*, 698, 374-377. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.374>
- [9] Kožuh, Stjepan. (2010). Specijalni čelici. Skripta. Sveučilište u Zagrebu. Metalurški fakultet, Sisak,
- [10] Priručnik Elga Welding:
https://elgawelding.com/wp-content/uploads/2018/08/Elga_Handbook_2017_LowRes.pdf
- [11] Priručnik Elga WELding
<https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-m60/>
- [12] Priručnik Elga Welding
<https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-100/>
- [13] KEMA tehnički list za pijesak FUGA SAND. (2015). Baumit Crna Gora d.o.o., Podgorica
- [14] Giber, Tomislav. (2022). Otpornost tvrdih navarenih prevlaka u zaštiti od trošenja dijelova poljoprivrednih strojeva. *Diplomski rad*. Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.