

Otpornost tvrdih navarenih prevlaka u zaštiti od trošenja dijelova poljoprivrednih strojeva

Giber, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:498307>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet
agrobiotehničkih
znanosti Osijek**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Tomislav Giber

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**OTPORNOST TVRDIH NAVARENIH PREVLAKA U ZAŠTITI OD TROŠENJA
DIJELOVA POLJOPRIVREDNIH STROJEVA**

Diplomski rad

Osijek, 2022.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Tomislav Giber

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

OTPORNOST TVRDIH NAVARENIH PREVLAKA U ZAŠTITI OD TROŠENJA
DIJELOVA POLJOPRIVREDNIH STROJEVA

Diplomski rad

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. prof. dr. sc. Goran Heffer, predsjednik
2. dr.sc. Ivan Vidaković, mentor
3. izv. prof. dr. sc. Vjekoslav Tadić, član

Osijek, 2022.

SADRŽAJ

1.UVOD	1
2.PREGLED LITERATURE	2
2.1 Konstrukcijski čelik S235	2
2.2 Primjena konstrukcijskog čelika	3
2.3 Zavarivanje	3
2.4 MIG – MAG metoda zavarivanja	4
2.5 REL Metoda zavarivanja	5
2.6 Oprema za REL metodu zavarivanja	7
2.7 Tvrdo navarivanje	9
2.8. Teorijske osnove o trošenju	11
2.8.1. Tribologija.....	11
2.8.2. Opći model tribosustava.....	11
2.8.3. Definiranje i razvoj tribologije.....	12
2.8.4. Tribološki sustav	13
2.9. Trenje i trošenje materijala	14
2.9.1. Trenje	14
2.9.2. Trošenje materijala.....	16
3. MATERIJAL I METODE	18
3.1 Aparat za zavarivanje FRONIUS TPS 320i	18
3.2 Konstrukcijski čelik	19
3.3 Elektrode Elgaloy Hard 100 i Elgaloy Hard M60	19
3.4 Uređaj za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva	20
3.5 Mjerna oprema za utvrđivanje gubitaka mase uzoraka	23
3.6 Abraziv korišten za pokus trošenja materijala	24
3.7.1. Izračun parametara za izvođenje ispitivanja	27
4. REZULTATI	30
5. RASPRAVA	42
6. ZAKLJUČAK	44
7. POPIS LITERATURE	45
8. SAŽETAK	46
9. SUMMARY	47
10. POPIS TABLICA	48

11. POPIS SLIKA	50
------------------------------	-----------

1.UVOD

Tijekom istraživanja provedenih prilikom izrade ovog diplomskog rada, kao osnovni materijal primijenjen je konstrukcijski čelik oznake S235. Navedeni čelik je komercijalno dostupan te je kupljen u trgovini koja se bavi prodajom metalnih materijala. Primijenjeni čelik inače ima udio ugljika manji od 0.6 %, a koristi se za izradu različitih strojnih dijelova; vratila, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, itd. Na podlogu od konstrukcijskog čelika navarene su dvije vrste elektroda različite tvrdoće (60 – 64 HRC i 55 – 60 HRC). Navedene elektrode nose trgovački naziv Elgaloy Hard 100 i Elgaloy Hard M 60. Kao tehnologija za navarivanje primijenjen je postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja (REL postupak). Radi lakše provedbe postupka, navarivanje je izvedeno na čeličnoj šipci dimenzija 40 x 15 mm te su nakontoga izrezani uzorci za daljnja ispitivanja. Uzorci su izrezani na dimenzije 40 x 25 x 15 mm što odgovara dimenzijama držača uzoraka za ispitivanje trošenja u masi abraziva. Postupak rezanja uzoraka izveden je uz obilno hlađenje kako se ne bi promijenila mikrostrukturna svojstva uzoraka uslijed zagrijavanja prilikom rezanja. Ukupno je ispitano 18 uzoraka navarenih elektrodom veće tvrdoće i 18 uzoraka navarenih elektrodom manje tvrdoće. U radu je također opisana primjena konstrukcijskih čelika, tehnologija zavarivanja navedenih čelika, te teorijske osnove o trenju i trošenju materijala.

Cilj ovog rada bio je analizirati ponašanje trošenja navarenih legura različite tvrdoće na podlozi od konstrukcijskog čelika S235, gibanjem u masi abraziva u ovisnosti o brzini gibanja i kutu sudara čestica abraziva i trošene površine. Ispitivanje trošenja uzoraka provedeno je na Zavodu za poljoprivrednu tehniku i obnovljive izvore energije Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku. Navedeno ispitivanje provedeno je na uređaju za trošenje gibanjem u masi abraziva pri različitom kutu sudara čestica abraziva i trošene površine (30° i 60°) i različitim brzinama uzoraka (1, 1,75 i 2,5 m/s). Kao abraziv u ispitivanju primijenjen je kvarcni pijesak granulacije 0,5 – 1,5 mm, dok je odzivna veličina u istraživanju bio gubitak mase uzoraka. Navedeni gubitak utvrđen je na temelju razlike mase uzoraka prije i nakon postupka ispitivanja, pri čemu je vaganje uzoraka izvedeno na analitičkoj vagi velike preciznosti (10^{-4} grama)

2.PREGLED LITERATURE

2.1 Konstrukcijski čelik S235

Konstrukcijski čelik je ugljični čelik s udjelom ugljika manjim od 0,6%. Upotrebljava se za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja. Razlikuju se obični (ugljični ili niskolegirani) čelici za opću masovnu upotrebu i plemeniti (rafinirani) ugljični ili legirani čelici za dijelove s većim zahtjevima (dijelovi strojeva itd.). Konstrukcijski čelici se primjenjuju kod izrade karakterističnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. S obzirom na mehanička svojstva, konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost, visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama, te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstrukcijski čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), imati dobru zavarljivost, sklonost hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje), itd. (Kožuh, 2010.). Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se upotrebljava za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr. Opći konstrukcijski čelici dijele se na:

- Ugljične čelike za nosive konstrukcije i

- Čelike za strojogradnju

Općenito se konstrukcijski čelici mogu podijeliti na ugljične (nelegirani) i legirane. Konstrukcijski čelici (nelegirani i legirani koji sadrže ugljika manje od 0.60%) često se primjenjuju za izradu strojeva i uređaja koji rade u neagresivnim sredinama i pri temperaturama od -25 do 300 °C, kao i za nosive i građevinske konstrukcije. Na svojstva čelika također utječe maseni udio pratioca i nečistoća, te vrsta i udio legirajućih elemenata, koji omogućavaju postizanje posebnih traženih svojstava (Kostadin, 2017.). Ugljični čelici imaju niz nedostataka koji se otklanjaju legiranjem. Legiranjem se poboljšavaju svojstva čelika kako eksploatacijska (granica tečenja, žilavost, dinamička izdržljivost), tako i proizvodna (sposobnost obrade: rezanje, deformiranje, zavarivanje, toplinska obrada, lijevanje) (Gabrić i Šitić, 2015.).

2.2 Primjena konstrukcijskog čelika

Prema Kostadin (2017.) od ove se podskupine čelika traži dovoljno visoka nosivost i sigurnost, a također je poželjno da ovi čelici budu dovoljno čvrsti kod rada pri povišenim temperaturama, zatim dovoljno otporni na trošenje i dovoljno dinamički izdržljivi. Od tehnoloških svojstava bitna je zavarljivost. Pokazatelj dobre zavarljivosti je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta – C_b . Zavarljivost je bolja, što je niži postotak ugljika i što je niži stupanj legiranosti. Prihvatljivo je da je vrijednost $C_e < 0,4$; jer u slučaju većih iznosa ugljičnog ekvivalenta, kod zavarivanja je potrebno predgrijavanje materijala, pa je poslije i ohlađivanje sporije. Kemijski sastav ovih čelika nije propisan, ali su zajamčena mehanička svojstva. Ovi čelici nisu predviđeni za toplinsku obradu, upravo zbog nezajamčenog kemijskog sastava, kao i višeg masenog udjela nečistoća nego kod ostalih čelika.

Temperature uporabe su normalne i snižene (Od -40°C do $+50^{\circ}\text{C}$), a kod sniženih temperatura, povećava se opasnost od krhkog loma. Primjena ovakvih konstrukcijskih čelika je u građevinarstvu; spremnici tekućina i plinova, dijelovi vozila, kostur i oplata brodova.



Slika 1. Konstrukcijski čelik s235 koji smo koristili u istraživanju
(Izvor: Giber 2022.)

2.3 Zavarivanje

Zavarljivost je jedan ključni pojam u zavarivačkoj tehnologiji, a odnosi se kako na osnovni i dodatni materijal, tako i na zavarivani proizvod ili strukturu, parametre, režim i postupak zavarivanja. To je, zapravo, jedno vrlo složeno svojstvo i nije ga jednostavno točno odrediti. Zavarljivost je sposobnost materijala, da se pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj, koji će svojstvima udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku primjene.

Na zavarljivost metala utječu: kemijski sastav (poglavito udio legiranih elemenata i mogućih nečistoća), dimenzije dijelova koji se zavaruju, vrsta dodatnog materijala, priprema spoja za zavarivanje, i drugo. Pojednostavljeno, može se uzeti da je zavarljivost svojstvo zavarivanog metala koje pokazuje da se određenim postupkom zavarivanja može ostvariti homogeni spoj, koji će udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku uporabe zavarenog proizvoda ili strukture. Nema opće zavarljivosti nekog materijala. Ona se mora utvrditi za svaki pojedini postupak zavarivanja, dodatni materijal, vrstu spoja, predviđenu namjenu proizvoda ili strukture, odnosno za svaki slučaj zavarivanja posebice. (Klobučar, 2016.)

Homogenost se zavarenog spoja može narušiti, prije svega, pojavom pukotina, nemetalnih uključaka i poroznosti, pa se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. Zahtjevi za dobro zavarljive čelike su: Zadovoljavajuća žilavost osnovnog metala; kemijski sastav mora biti takav da nakon hlađenja ne dolazi do porasta krhkosti; što manje ugljika jer ugljik utječe na porast zakaljivosti, tvrdoće i krhkosti.



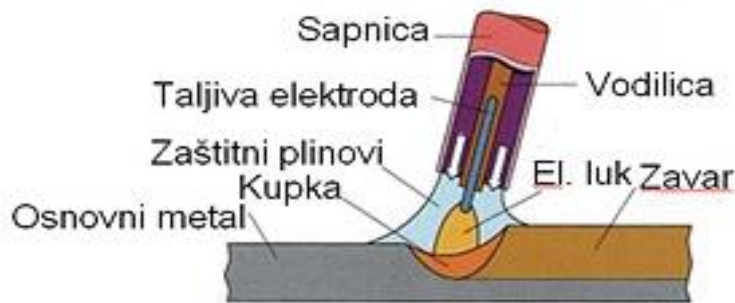
Slika 2. Proces zavarivanja

(Izvor: <https://www.laser-ing.hr/blog/osobitosti-zastitnih-plinova-kod-tig-zavarivanja-nehrdajucih-celika/>)

2.4 MIG – MAG metoda zavarivanja

MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) ili GMAW (Gas Metal Arc Welding), je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog metala i dodatnog metala pri čemu se za zaštitu rastopljenog metala koriste inertni, aktivni plinovi ili njihove mješavine. Kod ovoga postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu

koja je spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Taj proces odvija se u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju zaštitni plinovi, inertni (Ar ili He) ili aktivni (CO₂ ili mješavine). Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevi paketa i pištolja do mjesta zavarivanja gdje se uspostavlja električni luk. Sama žica ujedno je i elektroda i dodatni materijal. Samim njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili automatski. (Klobučar,2016.)

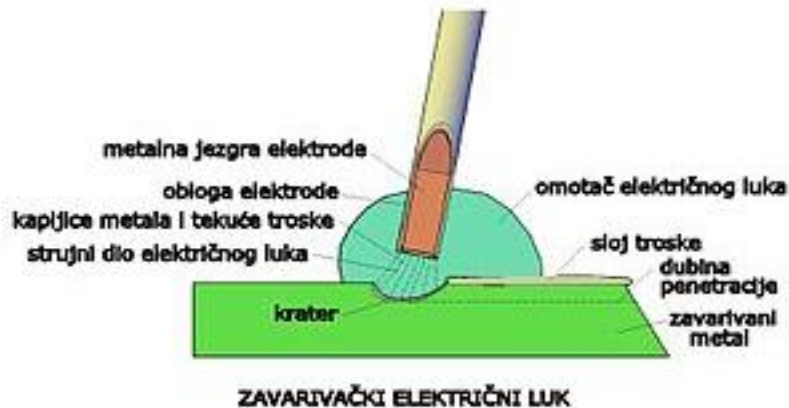


Slika 3. MIG/MAG Metoda zavarivanja

(Izvor: <https://www.zavarivanje.info/cd/11940/zavarivanje-moderni-postupci-mig-mag-tig-rel-autogeno>)

2.5 REL Metoda zavarivanja

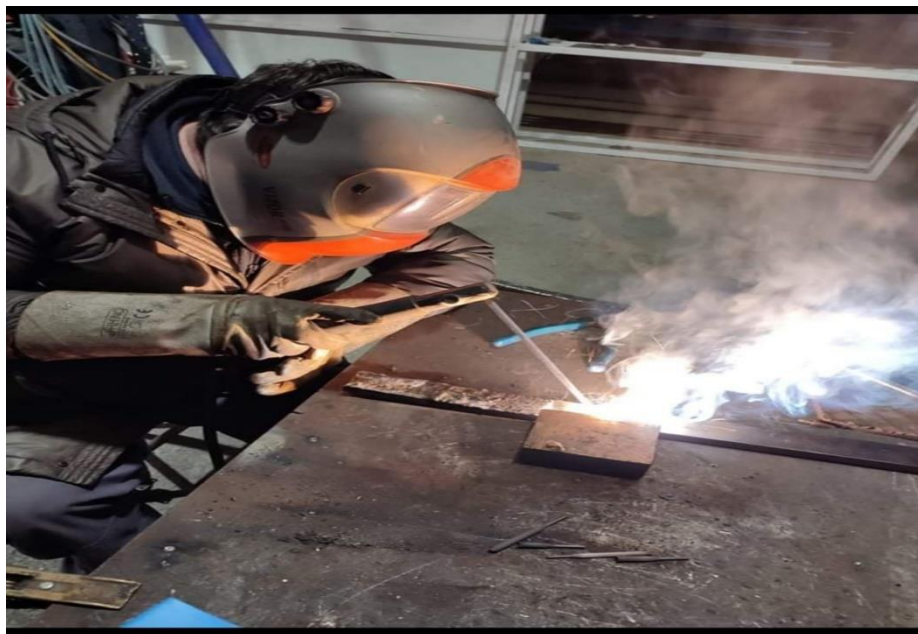
Ručno elektrolučno zavarivanje (REL), točnije izraženo ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom je postupak zavarivanja koji se najviše koristi u praksi, prilikom izrade uzoraka ovog diplomskog rada korištena je navedena metoda. Električna struja se koristi da pokrene električni luk, između osnovnog materijala i potrošenih elektroda, čija obloga stvara zaštitu zavara od oksidacije i zagađivanja stvaranjem ugljikovog dioksida (CO₂). Elektroda služi i kao dodatni materijal za stvaranje zavara. Postupak je vrlo raznovrstan i može se obaviti s relativno jeftinom opremom, tako da se koristi u radionicama i na otvorenim gradilištima. Zavarivač može postati dovoljno iskusan i sa skromnijom obukom, a vješt majstor postaje se s iskustvom. Vrijeme zavarivanja je relativno sporo, jer se elektrode moraju često zamjenjivati i troska se mora čistiti nakon svakog zavara. Taj postupak je uglavnom ograničen na čelične proizvode, iako specijalne elektrode postoje i za lijevano željezo, nikal, aluminij, bakar i ostale metale. (Radomir M. Miličević 2010.)



Slika 4. REL Metoda zavarivanja

(Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje)

Ručno elektrolučno zavarivanje se obavlja uglavnom na zraku. Zaštitu električnog luka i taline zavara od okolnog zraka obavljaju uglavnom plinovi i troska, koji nastaju pri taljenju i kemijskim reakcijama mineralne obloge potrošene elektrode. Obloga ima još i druge zadaće: stabilizaciju električnog luka, legiranje, dezoksidaciju i rafinaciju (smanjenje količine sumpora i fosfora) taline zavara. Prema namjeni razlikuju se elektrode za zavarivanje, za navarivanje, za žlijebljenje i za rezanje. U vezi s tehnološkim osobinama, razlikuju se elektrode s dubokim provarom, za posebne radne zahtjeve (za zavarivanje u okomitom položaju, iznad glave, zavarivanje korijena zavarenog spoja), elektrode s velikim rastalnim učinkom (s korisnošću do 200% i više). Ručno elektrolučno zavarivanje kao postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. Ipak zbog ekonomičnosti (male brzine zavarivanja i približno 1,5 do 2 kilograma položenog materijala na sat) se primjenjuje za izvođenje kraćih zavara, obično debljine ne iznad 20mm sučeonih zavarenih spojeva, te kraćih kutnih spojeva manje debljine zavara (gdje se obično ne traži pojačana penetracija u korijenu zavara). (Radomir M. Miličević 2010.)



Slika 5. REL metoda zavarivanja u praksi

(Izvor: Giber 2022.)

2.6 Oprema za REL metodu zavarivanja

Izvori struje za zavarivanje su takvi uređaji koji daju na mjestu zavarivanja električnu struju s karakteristikama pogodnim za zavarivanje. Najčešće se koristi napajanje s konstantnom jačinom struje i drugi tip, napajanje s konstantnim naponom. Kod elektrodučnog zavarivanja, dužina električnog luka je u direktnoj vezi s naponom, dok je s jačinom struje direktno povezan unos topline na zavarenom spoju. Napajanje s konstantnom jačinom struje se često koristi za ručne postupke zavarivanja, kao što je zavarivanje TIG postupkom i ručno elektrodučno zavarivanje obloženom elektrodom. To je važno jer je vrlo teško održavati elektrodu mirnom, a time se razmak i napon mijenjaju. Napajanje s konstantnim naponom se češće koristi za automatske postupke, kao što je elektrodučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog ili inertnog plina. Vrsta električne struje kod elektrodučnog zavarivanja isto igra vrlo važnu ulogu. Postupci s taljivim elektrodama, kao što je kod REL metode, uglavnom koriste istosmjernu struju, ali elektroda može biti pozitivno ili negativno nabijena. Kod zavarivanja, pozitivno nabijena anoda će imati veću koncentraciju zagrijavanja i zavar će biti dublji. Ako je elektroda pozitivno nabijena, onda će to rezultirati plićim zavarom. (Radomir M. Miličević 2010.)



Slika 6. Aparat za zavarivanje „FRONIUS TPS 320i“ koji je korišten u izradi rada

(Izvor: Giber 2022.)

Elektrode za zavarivanje mogu biti gole (ugljeni ili metalni štap, žica ili traka), obložene (metalna jezgra, a obloga mineralni materijal) ili punjene (mineralna jezgra i metalna obloga) ili nekih drugih oblika. Dodatni materijali i elektrode za elektrolučno zavarivanje (i druge načine zavarivanja) su standardizirani za pojedine načine zavarivanja i prema vrsti osnovnog materijala. Priprema, odnosno oblici dodirnih površina koje se zavaruju (zavareni spoj) i njihovih rubova, je standardizirana za pojedine načine zavarivanja i prema vrsti osnovnog materijala. Materijal obloge elektrode tali se zajedno s metalnom žicom i stvara trosku. Troska je lakša od čelika, pa pliva po zavaru i pokriva ga. Plinovi koji se oslobađaju pri taljenju obloge stvaraju zaštitni omotač oko mjesta zavarivanja i ne dozvoljavaju prilaz kisiku i dušiku iz zraka u taljenju. Ako bi dušik ušao u taljevinu, zavar bi postao krhak, a ako bi se kisik vezao s usijanim čelikom, dobio bi se nečist zavar, tako bi se znatno smanjila čvrstoća spoja. Ako je obloga elektrode deblja, postiže se bolja zaštita. Gola elektroda nema ova zaštitna svojstva. (Radomir M. Miličević 2010.)



Slika 7. Shema gole elektrode, elektrode s jezgrom i obložene elektrode

(Izvor: Tehnologija strojarskih instalacija)

2.7 Tvrdo navarivanje

Tvrdo navarivanje (eng. Hardfacing) je nanošenje tvrdog materijala otpornog na trošenje (habanje) postupkom zavarivanja. Procjenjuje se da od ukupnog neželjenog trošenja (habanja) materijala u proizvodnim procesima, na abraziju otpada 40%, udarno trošenje 25%, trošenje metal na metal 10%, koroziju 5%, visokotemperaturno trošenje 5% i ostale vidove trošenja oko 5%. Materijali koji se najčešće tvrdo navaruju su ugljični čelici i nisko legirani čelici s niskim sadržajem ugljika. Navarivanje je postupak nanošenja dodatnog materijala zavarivanjem na površinu radnog predmeta radi postizanja željenih svojstava, mjera i oblika. Navarivanje se obično provodi u vodoravnom položaju, rjeđi su slučajevi nekih drugih položaja. Zbog velikih količina topline, plinova izgaranja te rasprskavanja, potrebno je predvidjeti odgovarajuće mjere zaštite na radu. Gotovo svi klasični postupci zavarivanja mogu biti primijenjeni u svrhu navarivanja. (Vorax.hr/Materijali-Za-Navarivanja)

Najčešće korišteni postupci za tvrdo navarivanje su:

- Plinsko zavarivanje: za navarivanje tvrdih metala i karbida
- Ručno elektrolučno zavarivanje (REL): za navarivanje manjih površina, npr. Zupčanika ili tvrdih slojeva na zubima utovarivača, čeljustima drobilica i slično;
- Zavarivanje MIG postupkom: za navarivanje rotacionih dijelova npr. Osovina. Povećana učinkovitost se postiže uz primjenu praškom punjenih žica;

- Zavarivanje pod praškom: za navarivanje većih ploha. Učinkovitost se povećava korištenjem trake kao elektrode;
- Zavarivanje TIG postupkom uz dodavanje dodatnog materijala u obliku žice u električni luk tijekom zavarivanja. Ovaj se postupak koristi za manje popravke, npr. kod navarivanja zupčanika.
(https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo_navarivanje)

Najčešće korišteni materijali za tvrdo navarivanje (dodatni materijali) su:

- Dodatni materijali na osnovi volframovog karbida vrhunske otpornosti na trošenje
- Dodatni materijali za navarivanje slojeva otpornih na snažne udarce i slabu abraziju
- Dodatni materijali za navarivanje slojeva otpornih na abraziju, eroziju i slabe udare
- Dodatni materijali za navarivanje alatnih čelika
- Dodatni materijali za navarivanje na osnovi kobalta
- Dodatni materijali za navarivanje na osnovi nikla
- Dodatni materijali za navarivanje sivog lijeva
(https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo_navarivanje)



Slika 8. Navarivanje tvrdog materijala na lemeš pluga
(Izvor: Dtzsb.unisb.hr)

2.8. Teorijske osnove o trošenju

2.8.1. Tribologija

Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnu gibanju i o pratećim aktivnostima (Grilec, Jakovljević, Marić 2017). Može se i definirati da je tribologija znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja [Ivušić1998].

Glavna područja primjene tribologije su:

- mehaničke konstrukcije (zupčanci, ležaji, klizni elementi)
- materijali (novi materijali, keramika, polimeri, metali, inženjerstvo površina)
- obrada materijala (sredstva za hlađenje i podmazivanje, alatni materijali, lakoobradljivi materijali)
- podmazivanje (ulja, masti, aditivi).

2.8.2. Opći model tribosustava

Prema bivšoj normi DIN 50320, tribosustav je osnovni mehanički sustav u kojemu se zbiva tribološki proces. Postojanjem i praćenjem realnog tribosustava može se pouzdano utvrditi djelujući i prevladavajući mehanizam trošenja kojemu su izloženi pojedini elementi tribosustava i na osnovi toga poduzimati mjere u svrhu upravljanja tim procesom, tj. smanjenje trošenja, uklanjanje njegovih štetnih posljedica i izbjegavanje iznenadnih kvarova (Ivušić1998).

Tribosustav je definiran skupinom parametara:

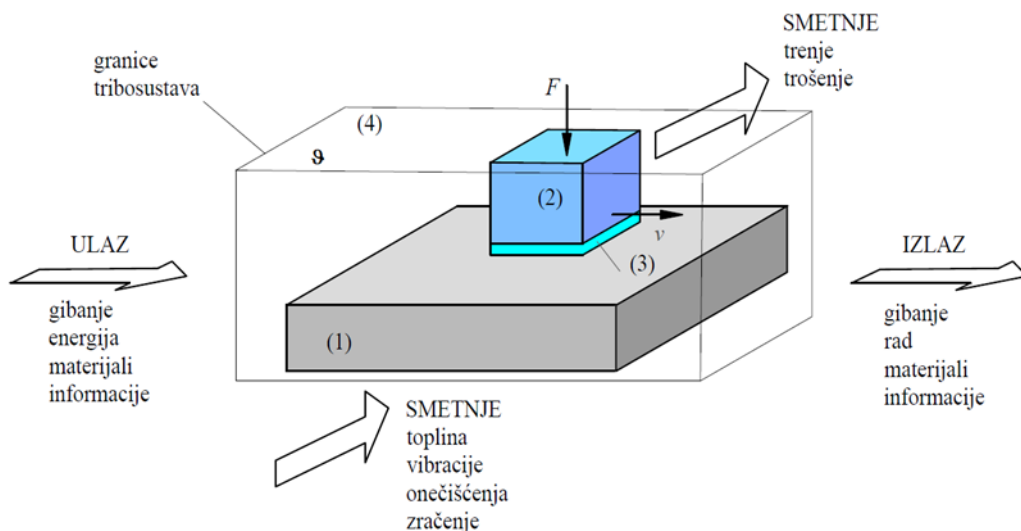
1. Struktura tribosustava:

- elementi tribosustava – funkcionalni dijelovi, međusredstvo, okoliš
- svojstva elemenata tribosustava – materijali, oblici, stanja površina
- tribološki utjecaji među elementima tribosustava – oblik kontakta, trenje, mehanizam trošenja.

2. Radni uvjeti tribosustava:

- oblici gibanja – klizanje, kotrljanje, udar, strujanje, osciliranje
- vremensko određenje gibanja – kontinuirano, intermitirajuće
- veličine opterećenja – sila, brzina, temperatura, trajanje opterećenja.

Na slici 9. prikazana je shema jednostavnog tribosustava s ulaznim i izlaznim parametrima te granicama prikazanog tribosustava.



Slika 9. Shema jednostavnog tribosustava

(Izvor: Czichos 1987.)

Elementi tribosustava se sastoje od: funkcionalnih dijelova, na slici 9. označenih sa (1) i (2), medusredstva-maziva (3) između funkcionalnih dijelova i okoliša (4) koji djeluje na tribosustav. Također, u elemente tribosustava ubrajaju se radni uvjeti, koje čine opterećenje (F), uvjeti okoliša (ρ) i brzina gibanja (v), kao i međudjelovanje elemenata tribosustava, npr. korozijsko djelovanje okoliša (4) na funkcionalne dijelove (1) i (2) (Ivušić1998.).

2.8.3. Definiranje i razvoj tribologije

Pokuša li se definirati tribologija, najčešća definicija je ona prema kojoj je tribologija znanost koja proučava pojave i procese na površinama u međusobnom djelovanju, neposrednom ili posrednom dodiru i relativnom gibanju. Osnove tribologije počivaju na pojavi trenja do kojeg dolazi na dodirnim površinama i habanja koje je posljedica tog trenja. Habanje odnosno trošenje površina pojava je zbog koje je potrebno pronaći metode kojima će se smanjiti oštećenje materijala i upravo je to zadatak proučavanja u tribologiji (Ivušić, 1998, str. 13).

Trenje se pojavljuje kao mehanički otpor odnosno kao sila koja ometa ili sprečava relativno gibanje tijela u međusobnom dodiru. Sila trenja djeluje na tijelo suprotno od relativne brzine gibanja. Trenje se također javlja i pri relativnom gibanju čestica unutar krutih materija, tekućina i plinova. Kako bi se savladalo trenje koristi se energija koja se pretvara u toplinu. Toplina se potom prenosi na dijelove u dodiru uslijed čega dolazi do zagrijavanja. Količina trenja ovisna je o stupnju iskoristivosti n mehaničkog sustava pri čemu n predstavlja omjer izlazne i ulazne mehaničke

energije odnosno snage. Brzinu trošenja određuje trajnost konstrukcijskih elemenata. Prema tome, tribološki procesi uzrokuju promjene u karakteristikama mehaničkih sustava uslijed rada i dovode do oštećenja elemenata uključenih u rad (Križan, 2008, str. 316).

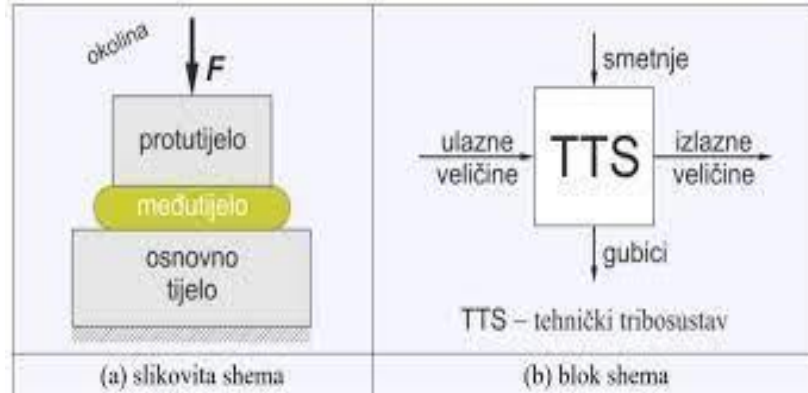
Praktična primjena strojeva pokazuje kako do kvarova dolazi veoma često uslijed triboloških procesa, značajno češće nego uslijed statičkih ili zamornih lomova. Uslijed toga je značajno primijeniti spoznaje iz tribologije pri konstrukciji i korištenju strojeva te posebice pri redovitom održavanju istih. S obzirom na činjenicu kako se uslijed trenja dio mehaničke energije pretvara u toplinsku energiju koja se potom prenosi na okolinu tj. dolazi do gubitka energije, tada postaje vidljivo kako će smanjenje trenja dovesti do smanjenja iscrpljivanja i posljedično trošenja materijala ali i smanjenja potrošnje energije (Lončarić, 2021)

2.8.4. Tribološki sustav

Tri su temeljne komponente koje se pojavljuju u tribološkom sustavu, to su (Ivušić, 1998, str. 11):

- osnovno tijelo koje predstavlja temeljni element stroja iz perspektive trošenja (klizna staza vodilice, grabilica bagera i dr.).
- Protutijelo odnosno unutar zatvorenih strojnih sustava u pravilu strojni element (rukavac vratila, klizna prizma vodilice) dok kod otvorenih strojnih sustava čini tijelo u stalnoj promjeni (prešani komadi, stijene).
- Međutijelo, odnosno „treće tijelo“ koje se pojavljuje u prostoru između glavnog tijela i protutijela (sredstvo za podmazivanje, abrazivno sredstvo).

Osim navedenih elemenata, kako bi se moglo ostvariti optimalne rezultate prilikom rješavanja triboloških problema trenja, habanja i podmazivanja, mora se uzeti u obzir opterećenje, F , silu trenja, smjer gibanja, protok kroz sustav (gibanje, energija, materijali, informacije), kao i razne druge čimbenike poput smetnji i gubitaka do kojih dolazi uslijed trenja odnosno habanja (Kovačević & Vrsaljko, 2020, str. 8).



Slika 10. Shematski prikaz tribološkog sustava

(Izvor: <https://repository.pfri.uniri.hr/islandora/object/pfri%3A2261/datastream/PDF/view>)

2.9. Trenje i trošenje materijala

2.9.1. Trenje

Trenje se može definirati kao otpor kretanju tijela o drugo i od najveće je važnosti u postupcima obrade metala. Trenje nije materijalni parametar, već odziv sustava u obliku reakcijske sile. Ovisi npr. temperatura, vlaga, opterećenje, mehanička svojstva i topografija površine. Općenito zakon trenja, poznat kao Amonton-Coulombov zakon, koeficijent trenja (M) opisuje kao odnos sile trenja F_t (tangencijalna sila) i normalne sile F_n (opterećenja) (Bhushan, 2013).

$$M = F_t / F_n$$

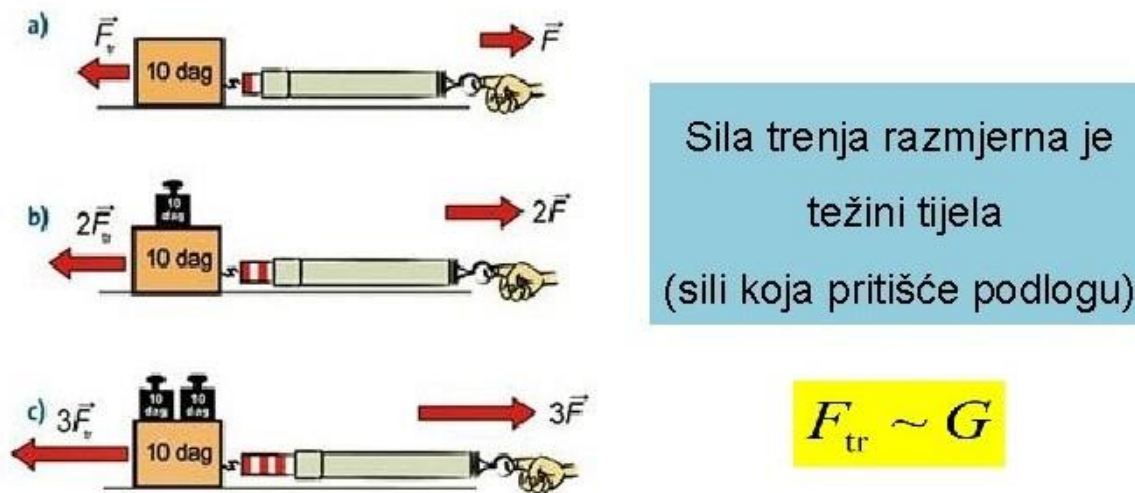
Pretpostavlja se da je ovaj zakon točan u tribološkim kontaktima s uobičajenim kontaktnim pritiscima (kao što je većina kontakata oko njega) i često se naziva Coulombovim trenjem.

Posljedice trenja su:

- Zagrijavanje na mjestu dodira
- „Gubitak“ mehaničke energije koja se pretvara u toplinu
- Moguća dodatna toplinska naprezanja u dijelovima koji se dodiruju
- Habanje dodirnih površina
- Povećani šum tijekom rada
- Promjena fizikalnih svojstava površine

Važno je napomenuti kako trenje nije izvorna sila, već čini silu koja nastaje kao reakcija djelovanja neke druge sile. Čine ga elektromagnetne sile koje se pojavljuju između atoma. U trenutku kad površine koje su u kontaktu počnu pomicati u relativno suprotnim smjerovima, dolazi do pojave trenja između navedene dvije površine pri čemu se kinetička energija pretvara u termalnu energiju.

Trenje uvijek djeluje u smjeru suprotnom od smjera u kojem se objekt kreće ili se pokušava pomaknuti. Trenje uvijek usporava pokretni predmet. Količina trenja ovisi o materijalima od kojih su izrađene dvije površine. Što je površina hrapavija, stvara se više trenja. Trenje također proizvodi toplinu. (Križan,2008)



Slika 11. Ovisnost sile trenja o težini tijela

(Izvor: <https://slidetodoc.com/7-sila-trenja-trenje-je-sila-koja-se/>)

Tri su temeljna razloga zbog kojih dolazi do pojave trenja pri relativnom klizanju dviju suhих površina čvrstih tijela. Prvi uzrok je adhezija odnosno privlačna sila koja se pojavljuje između čestica dva tijela u dodiru. Drugi uzrok je pojava hladno zavarenih mikrospojeva, pri čemu se zavarivanje zbiva na mjestima na kojima se velike sile prenose preko veoma malih površina. Pri tome dolazi do pojave velike topline u jednoj točki te se ta toplina ne može procesom prevođenja dovoljno brzo odvesti u okolni materijal uslijed čega se pojavljuje taljenje a potom i skrućivanje

odnosno spajanje vrhova neravnine u dodirnoj točki. Pri tome gotovo u istom trenutku pojavljuje se prekid zavarenog spoja. Kako bi se ostvarilo klizanje jedne površine po drugoj, potrebno je primijeniti silu koja će nadvladati adheziju i izvršiti prekid na zavarenom mjestu. Treći je uzrok pojave trenja prilikom klizanja brazdanje mekše površine neravninama tvrđe površine pri čemu vrhovi tvrdog tijela zapinju za vrhove neravnina mekšeg tijela te pri žilavim materijalima dolazi do plastične deformacije a kod krhkih materijala dolazi do loma. Deformiranje i lomovi također dodatno povećavaju potrošnju energije zbog potrebnog djelovanja sile (Križan, 2008)

Postoje razne vrste trenja, koje uključuju statičko, kotrljajuće, kinetičko, klizno i fluidno trenje. Statičko trenje je trenje prisutno između dva predmeta koji se nemaju relativno kretanje, poput bloka drva koji je ostao na stolu. Trenje kotrljanja opisuje silu trenja koja postoji kad se jedan predmet kotrlja po drugoj površini, poput one koja se javlja kada se kotači automobila kreću prema ulici. Kinetičko trenje je trenje koje nastaje kad se dva predmeta u dodiru pomaknu jedan prema drugom i trljaju zajedno, poput onog koji bi se dogodio kada dijete padne niz tobogan. Trenje klizanja događa se kada jedan predmet klizi po površini drugog, poput drvenog bloka koji klizi po stolu kad se gurne. Konačna vrsta trenja, trenje tekućine, javlja se kada se čvrsti predmet kreće kroz tekućinu ili plin, poput onog koji se događa kada zrakoplov leti. (Bhushan, 2013).

2.9.2. Trošenje materijala

Prema Ivušić (1998.) trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Prema Kovačević i Vrsaljko (2011.) trošenje predstavlja oštećenje površine ili odstranjenje materijala s jedne ili s obje strane dviju čvrstih površina koje su u dodiru tijekom gibanja. Ivušić (1998.) navodi kako se mehanizmi trošenja opisuju jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. Prema Kovačević i Vrsaljko (2011.) posljedice trošenja materijala mogu biti potpuno uklanjanje materijala s površine ili samo premještanje materijala prema dodirnim površinama. U slučaju samo prijenosa materijala s jedne na drugu površinu konačni volumen ili gubitak mase na međupovršini je nula, odnosno nema odvajanja materijala kao čestice kod trošenja. Kako oštećenje materijala kod trošenja napreduje gubitak materijala raste. Definicija trošenja materijala zasniva se na gubitku materijala, ali oštećenje i bez promjene volumena i mase, također predstavlja trošenje. Vizualni izgled trošenih površina i oblika čestica nastalih trošenjem, primarni su pokazatelj za određivanje mehanizama trošenja. Iako postoji veliki broj primjera

različitih vrsta trošenja, pod osnovne mehanizme trošenja ubrajaju se: adhezijski, abrazijski, umor površine, efekt erozije i sudara, kemijski (ili korozijski) i inducirano električnim lukom.

Svi mehanizmi trošenja, osim umora, pojavljuju se uz postupno odstranjenje materijala. Neželjeno trošenje mehaničkih komponenti obično rezultira smanjenjem preciznosti i učinkovitosti elemenata, većom zračnosti između komponenata, vibracijama, pojačanim trošenjem te ponekad i lomom uslijed umora materijala. Prema tome, trošenje može predstavljati značajan financijski gubitak (Dadić, 2013.).

3. MATERIJAL I METODE

3.1 Aparat za zavarivanje FRONIUS TPS 320i

Aparat FRONIUS TPS 320i je univerzalni aparat za zavarivanje, dostupan u kategorijama snage 320A, 400A, 500A i 600A. Navedeni aparat potpuno je redizajniran u odnosu na prethodne modele. Kao rezultat novog dizajna, svojstva zavara su značajno poboljšana, komunikacija između čovjeka i stroja je potpuno optimizirana, a rukovanje usavršeno. Modularni dizajn i mogućnost dodavanja sustava osiguravaju visok stupanj fleksibilnosti. (<https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/tpsi/tpsi/tps-320i>)

Tablica 1. Tehničke karakteristike aparata za zavarivanje FRONIUS TPS 320i.

Mrežni napon	3 x 400V
Minimalna struja zavarivanja	3A
Maksimalna struja zavarivanja	320A
Napon otvorenog kruga	73V
Stupanj zaštite	IP23
Duljina	706mm
Širina	300mm
Težina	33,7kg
Visina	510mm

(Izvor: www.fronius.com)

Slika 12. Prikazuje aparat za zavarivanje FRONIUS TPS 320i



Slika 12. Aparat za zavarivanje FRONIUS TPS 320i

(Izvor: Giber, 2022.)

3.2 Konstrukcijski čelik

Čelik korišten kao podloga za navarivanje tvrdih legura za potrebe ispitivanja trošenja uzoraka gibanjem u masi abraziva je konstrukcijski čelik oznake S235, na koji su navarene dvije vrste elektroda različite tvrdoće (60 – 64 HRC i 55 – 60 HRC). Konstrukcijski čelik je ugljični čelik s udjelom ugljika manjim od 0,6%. Upotrebljava se za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja.

3.3 Elektrode Elgaloy Hard 100 i Elgaloy Hard M60

Elektrode korištene u istraživanju su Elgaloy Hard 100 i Elgaloy Hard M60.

Elgaloy Hard 100 elektroda je izuzetno bogata kromovim karbidima koji su vrlo otporni na abraziju, ali pokazuje ograničenu otpornost na udarce. Idealna je za tvrdo navarivanje. Ima dobru otpornost na trošenje i koroziju na povišenim temperaturama. Površinsko pucanje je normalno i može se smanjiti predgrijavanjem na 250 – 450° (<https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-100/>). U tablici 2, prikazan je kemijski sastav elektroda Elgaloy Hard 100.

Tablica 2. prikazuje kemijski sastav elektrode Elgaloy Hard 100, u postotcima

	C	Cr	Mo	V
Minimalno	3,0	29,0	0,45	0,30
Uobičajeno	3,5	30	0,5	0,4
Maximalno	4,5	32,0	0,6	0,50

(Izvor: <https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-100/>)

Elgaloy Hard M60 je čvrsta žica koja proizvodi martenzitni metal za zavarivanje tvrdoće od 55-60 HRC. Navar pokazuje dobru otpornost na trošenje u uvjetima abrazije i trenja zajedno s umjerenim udarcima i može se oblikovati brušenjem (<https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-m60/>). U tablici 3, prikazan je kemijski sastav elektrode Elgaloy Hard M60.

Tablica 3. prikazuje kemijski sastav elektrode Elgaloy Hard M60, u postotcima

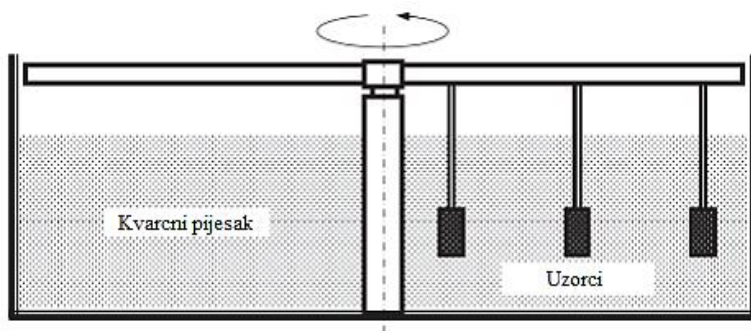
	C	Si	Mn	P	S	Cr
Uobičajeno	0,45	2,95	0,35	0,025	0,002	9,20

(Izvor: <https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-m60/>)

3.4 Uređaj za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva

Uređaj za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi krutih čestica, tj. abraziva, konstruiran je i izrađen na Zavodu za poljoprivrednu tehniku i obnovljive izvore energije Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Uređaj ima sljedeće značajke i mogućnosti:

- primjena različitih vrsta abraziva (s obzirom na granulaciju, oblik, vrstu materijala)
- primjena različitih materijala ispitnih uzoraka u istim ispitnim uvjetima
- primjena različitih parametara gibanja ispitnih uzoraka
- odabir različitih kutova sudara trošene površine uzorka i čestica abraziva
- mogućnost ponavljanja ispitivanja pri jednakim uvjetima ispitivanja s ciljem točne statističke obrade podataka. (Vidaković 2021.)



Slika 13. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva

(Izvor: Heffer i sur. 2014.)

Uređaj za trošenje u masi abraziva sastoji se od postolja na koje je ugrađena okrugla posuda za smještaj abraziva promjera 1000 mm i dubine 340 mm. Na gornji dio posude uređaja postavlja se poklopac čija je namjena sprječavanje izbacivanja abraziva i prašine koja nastaje tijekom rada uređaja.

Na slici 14. prikazan je uređaj za ispitivanje trošenja gibanjem ispitnih uzoraka u masi abraziva.



Slika 14. Uređaj za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva

(Izvor: Giber 2022.)

Radni dio uređaja je pogonjen elektromotorom WEG watt drive W21, snage 2,2kW preko reduktora s maksimalnim brojem okretaja od 58 min^{-1} , prikazanim na slici 15.



Slika 15. Pogonski elektromotor WEG watt drive w21 s reduktorom

(Izvor: Giber, 2022.)

Upravljački dio uređaja sastoji se od odgovarajuće električne instalacije i frekventnog pretvarača Emerson Unidrive SP2403 s mogućnošću promjene smjera vrtnje radnog dijela uređaja. Upravljački dio uređaja prikazan je na slici 16.



Slika 16. Upravljački dio uređaja za trošenje u masi abraziva
(Izvor: Vidaković, 2021.)

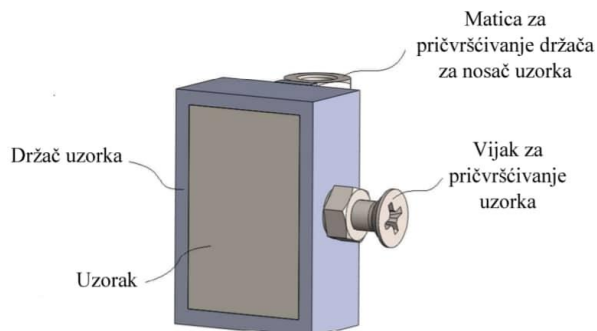
Kako je prikazano na slici 14., kroz središte posude za smještaj abraziva postavljeno je vratilo na koje je pričvršćen trokraki nosač uzoraka. Na svaki od krakova nosača moguće je postaviti nekoliko držača uzoraka, ovisno o primijenjenom planu pokusa. Svaki od držača uzoraka postavlja se točno na određenu poziciju koja se proračunava u odnosu na udaljenost od osi rotacije vratila.



Slika 17. Trokraki nosač uzoraka
(Izvor: Vidaković, 2021.)

Kako je vidljivo na slici 17, na nosač uzoraka postavljene su „grablje“ odnosno „trnovi“ koji služe za rahljenje abraziva te elementi za poravnavanje površine abraziva. Navedeni elementi imaju za

cilj ostvarivanje jednakih uvjeta ispitivanja za sve uzorke, odnosno, tijekom rada ovi elementi sprječavaju stvaranje „stalnih tragova“ zbog opetovanog prolaska uzoraka kroz masu abraziva. Na slici 18, prikazan je držač ispitnih uzoraka koji se montira na nosač uzoraka.



Slika 18. Prikaz držača uzoraka

(Izvor: Vidaković, 2021.)

Držač uzorka konstruiran je na način da je trošenju izložena samo prednja površina na koju je navarena prevlaka, dok su ostale površine zaštićene. Upravo takva konstrukcija pruža najbolji mogući način praćenja trošenja materijala, takvom konstrukcijom izbjegnuto je trošenje ostalih površina i rubova uzoraka (Vidaković, 2021).

3.5 Mjerna oprema za utvrđivanje gubitaka mase uzoraka

Izlazna varijabla u pokusu trošenja u masi abraziva bila je gubitak mase uzoraka. Razlika mase uzoraka izračunava se tako da se prvo izvaži uzorak prije provođenja postupka i nakon provođenja postupka.



Slika 19. Analitička vaga Adam PW 124

(Izvor: Giber, 2022.)

Mjerenje mase uzoraka provedeno je primjenom analitičke vage Mettler Toledo AB204. Navedena vaga prikazana je na slici 19 i ima preciznost 10^{-4} g te mjerni interval od 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. Kako bi se uklonili eventualni ostaci abraziva (naslage prašine, pijeska, itd.), prije svakog mjerenja, svaki uzorak je temeljito ispran mlazom vode, očišćen acetonom te osušen strujom vrućeg zraka.

3.6 Abraziv korišten za pokus trošenja materijala

Kao abraziv u ispitivanju trošenja tvrdih navarenih prevlaka korišten je kvarcni pijesak granulacije 0,5 mm – 1,5 mm proizvođača Kema, oznake „FB150S“. Navedeni kvarcni pijesak je u procesu proizvodnje ispran od nečistoća i prašine te je osušen na visokoj temperaturi. Fizikalno – mineraloški podaci i kemijski sastav pijeska prikazan je u tablici 2 i 3.

Tablica 4. Fizikalno – mineraloški podaci kvarcnog pijeska

KVARCNI PIJESAK „FB150S“		
Granulacija	0,5 – 1,5 mm	
Tvrdoća po Mohsu	7	
Gubitak žarenjem	< 0,2 %	
Temperatura sintranja	Iznad 1500 °C	
Temperatura smekšavanja	Iznad 1720 °C	
Gustoća (prirodno vlažan)	Zbito stanje	1,39 kg/dm ³
	Sipko stanje	1,37 kg/dm ³
Vlaga	do 0,2 %, plamenom sušeni	

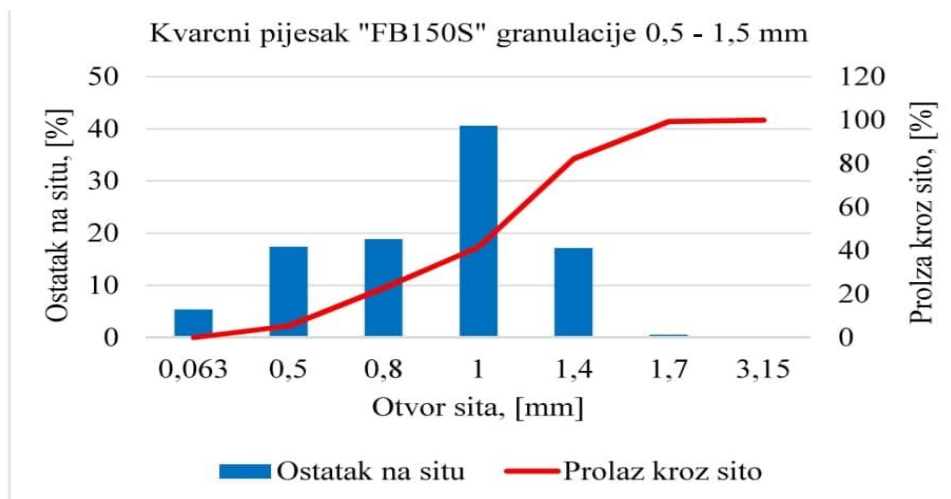
(Izvor: Kema,2020.)

Tablica 5. Kemijski sastav kvarcnog pijeska

KVARCNI PIJESAK „FB150S“								
Kemijski element, %	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

(Izvor: Kema,2020)

Na slici 20, prikazana je sitena analiza kvarcnog pijeska „FB150S“ granulacije 0,5 – 1,5 mm.



Slika 20. Sitena analiza kvarcnog pijeska „FB150S“

(Izvor: Kema 2020.)

3.7. Način određivanja parametara za izvođenje ispitivanja

Kako je izlazni broj okretaja pogonskog vratila elektromotora 58 min^{-1} , temeljem navedenog broja okretaja moguće je izračunati brzine gibanja ispitnih uzoraka. Budući da se u promatranom ispitivanju trošenja ispitni uzorci gibaju kružno, brzina gibanja izračunava primjenom jednadžbe za obodnu brzinu vrtnje v_x :

$$v_x = \frac{D_x \cdot \pi \cdot n}{60}, [\text{m/s}]$$

Pretvorbom jednadžbe za obodnu brzinu vrtnje v_x , izračunava se promjer obodne kružnice D_x , na temelju kojega je moguće odrediti položaj držača uzoraka te time postići odgovarajuću željenu brzinu gibanja uzoraka.

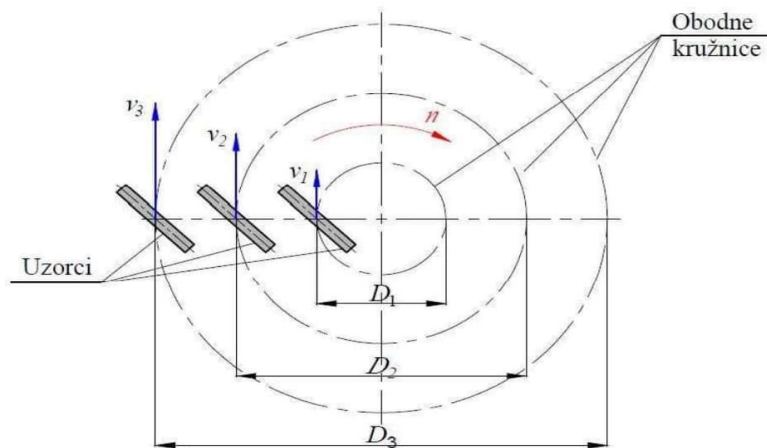
$$D_x = \frac{60 \cdot v_x}{\pi \cdot n}, [\text{m}]$$

Gdje je: D_x – promjer obodne kružnice, [m]

v_x – brzina gibanja uzoraka, [m/s]

n – broj okretaja pogonskog vratila, [min^{-1}]

Slika 21. shematski prikazuje kinematske veličine pri ispitivanju trošenja gibanjem uzoraka u masi čestica abraziva.



Slika 21. Prikaz kinematskih veličina pri ispitivanju trošenja u masi čestica abraziva
(Izvor: Vidaković, 2021.)

Na temelju izračunatog promjera obodne kružnice D_x , izračunava se opseg obodne kružnice O_x prema jednadžbi:

$$O_x = D_x \cdot \pi, [\text{m}]$$

Gdje je: O_x – opseg obodne kružnice, [m]

Prema izračunatom opsegu obodne kružnice O_x i poznatog broja okretaja vratila n , izračunava se prijeđeni put uzoraka za jednu minutu ispitivanja s_x prema jednadžbi:

$$s_x = O_x \cdot n, [\text{m/min}]$$

Gdje je: s_x – prijeđeni put uzoraka za vrijeme od jedne minute, [m/min]

Temeljem izračuna ukupnog prijeđenog puta trošenja S uzoraka koji iznosi 20000 m i prijeđenog puta uzoraka u vremenu od jedne minute s_x , izračunava se vrijeme potrebno za prelazak ukupnog puta trošenja u masi abraziva t prema jednadžbi:

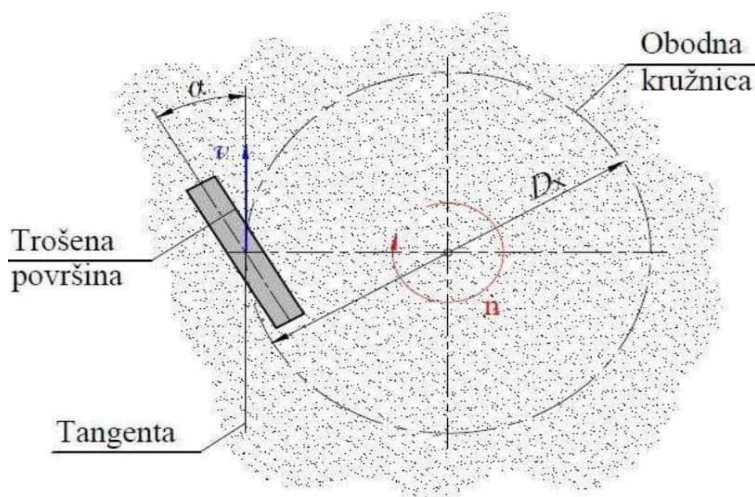
$$t = \frac{S}{s_x}, [\text{min}]$$

Gdje je: t – vrijeme potrebno za prelazak ukupnog puta trošenja, [min]

S – ukupni put trošenja, [m]

s_x – prijeđeni put uzoraka za vrijeme od jedne minute, [m/min]

Brzina gibanja uzoraka pri ispitivanju, prema prikazanim izrazima određuje se postavljanjem uzoraka na obodne kružnice na točno određeno mjesto. Promjer obodnih kružnica izračunava pomoću jednadžbe za izraz D_x . Brzina gibanja uzoraka može se mijenjati u rasponu od 0 do 3 m/s. Ovaj raspon brzina ograničen je obzirom na izvedbu uređaja za trošenje u masi abraziva i ograničenja broja okretaja reduktora. Postavljanjem uzorka pod kutom α u odnosu na tangentu pripadajuće obodne kružnice promjera D_x , određuje se kut sudara trošene površine uzorka sa česticama abraziva. Zakretanjem uzorka u smjeru kazaljke na satu i obrnuto, omogućuje se povećavanje i smanjivanje kuta sudara čestica abraziva i trošene površine uzorka. Slika 22. shematski prikazuje način određivanja kuta sudara trošene površine uzorka i čestica abraziva. (Vidaković, 2021.)



Slika 22. Prikaz načina određivanja kuta sudara trošene površine i čestica abraziva
(Izvor: Vidaković, 2021.)

3.7.1. Izračun parametara za izvođenje ispitivanja

1. Parametri ispitivanja trošenja pri zadanoj brzini gibanja uzoraka $v_1 = 1 \text{ m/s}$

$$v_1 = \frac{D_1 \cdot \pi \cdot n}{60}, [\text{m/s}]$$

- promjer obodne kružnice D_1 :

$$D_1 = \frac{60 \cdot v_1}{\pi \cdot n} = \frac{60 \cdot 1}{\pi \cdot 58} = 0,329 \text{ m} = 329 \text{ mm}$$

- radijus obodne kružnice, $R_1 = 164,6 \text{ m}$
- opseg obodne kružnice, O_1 :

$$O_1 = D_1 \cdot \pi = 0,329 \cdot 3,14 = 1,033 \text{ m}$$

- prijeđeni put za vrijeme od jedne minute, s_1 :

$$s_1 = O_1 \cdot n = 1,033 \cdot 58 = 59,914 \text{ m}$$

- vrijeme potrebno za prijeđeni put od 20000 m, t_1 :

$$t_1 = \frac{S}{s_1} = \frac{20000}{59,914} = 334 \text{ min} = 5 \text{ h } 34 \text{ min}$$

- brzina gibanja uzoraka, v_1 :

$$v_1 = \frac{S}{t_1} = \frac{20000}{20040} = 1 \text{ m/s}$$

2. Parametri ispitivanja trošenja pri zadanoj brzini gibanja uzoraka $v_2 = 1,75 \text{ m/s}$

$$v_2 = \frac{D_2 \cdot \pi \cdot n}{60}, [\text{m/s}]$$

- promjer obodne kružnice, D_2 :

$$D_2 = \frac{60 \cdot v_2}{\pi \cdot n} = \frac{60 \cdot 1,75}{\pi \cdot 58} = 0,577 \text{ m} = 577 \text{ mm}$$

- radijus obodne kružnice, $R_2 = 288,5 \text{ m}$

- opseg obodne kružnice, O_2 :

$$O_2 = D_2 \cdot \pi = 0,577 \cdot 3,14 = 1,81 \text{ m}$$

- prijeđeni put za vrijeme od jedne minute, s_2 :

$$s_2 = O_2 \cdot n = 1,81 \cdot 58 = 104,98 \text{ m}$$

- vrijeme potrebno za prijeđeni put od 20000 m, t_2 :

$$t_2 = \frac{S}{s_2} = \frac{20000}{104,98} = 190,51 \text{ min} = 3 \text{ h } 11 \text{ min}$$

- brzina gibanja uzoraka, v_2 :

$$v_2 = \frac{S}{t_2} = \frac{20000}{11430,6} = 1,75 \text{ m/s}$$

3. Parametri ispitivanja trošenja pri zadanoj brzini gibanja uzoraka $v_3 = 2,5 \text{ m/s}$

$$v_3 = \frac{D_3 \cdot \pi \cdot n}{60}, [\text{m/s}]$$

- promjer obodne kružnice, D_3 :

$$D_3 = \frac{60 \cdot v_3}{\pi \cdot n} = \frac{60 \cdot 2,5}{\pi \cdot 58} = 0,824 \text{ m} = 824 \text{ mm}$$

- radijus obodne kružnice, $R_3 = 412 \text{ m}$

- opseg obodne kružnice, O_3 :

$$O_3 = D_3 \cdot \pi = 0,824 \cdot 3,14 = 2,59 \text{ m}$$

- prijeđeni put za vrijeme od jedne minute, s_3 :

$$s_3 = O_3 \cdot n = 2,59 \cdot 58 = 150,22 \text{ m}$$

- vrijeme potrebno za prijeđeni put od 20000 m, t_3 :

$$t_3 = \frac{S}{s_3} = \frac{20000}{150,22} = 133,14 \text{ min} = 2 \text{ h } 13 \text{ min}$$

- brzina gibanja uzoraka, v_3 :

$$v_3 = \frac{S}{t_3} = \frac{20000}{7988,4} = 2,5 \text{ m/s}$$

4. REZULTATI

Tablica 4. prikazuje rezultate gubitaka mase uzoraka s navarenom prevlakom od mekše elektrode oznake Elgaloy HARD 60 M na konstrukcijskom čeliku oznake S325 pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva „FB105S“ pri 3 različite brzine i kutu sudara od 60°:

1. $v = 1 \text{ m/s}$, kut sudara 60°
2. $v = 1,75 \text{ m/s}$, kut sudara 60°
3. $v = 2.5 \text{ m/s}$, kut sudara 60°.

Tablica 6. Gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°

UZORAK	1. MJERENJE	2. MJERENJE	GUBITAK MASE
A 1.1.1	125,7415	125,7333	0,0082
A 1.2.1	131,7589	131,7360	0,0229
A 1.3.1	123,3992	123,3442	0,0550
A 2.1.1	120,0284	120,0184	0,0100
A 2.2.2	131,1656	131,1404	0,0252
A 2.3.1	129,2665	129,2358	0,0307
A 3.1.1	119,7506	119,7367	0,0139
A 3.2.1	124,7819	124,7586	0,0233
A 3.3.1	123,7692	123,7340	0,0352

(Izvor: Giber, 2022.)

Tablica 6. prikazuje rezultate gubitaka mase uzoraka s navarenom prevlakom od mekše elektrode oznake Elgaloy HARD 60 M na konstrukcijskom čeliku oznake S325 pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva „FB105S“ pri 3 različite brzine i kutu sudara od 30°:

1. $v = 1 \text{ m/s}$, kut sudara 30°
2. $v = 1,75 \text{ m/s}$, kut sudara 30°
3. $v = 2.5 \text{ m/s}$, kut sudara 30°.

Tablica 7. Gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°

UZORAK	1. MJERENJE	2. MJERENJE	GUBITAK MASE
A 1.1.2	128,4201	128,4131	0,0070
A 1.2.2	123,1743	123,1543	0,0200
A 1.3.2	124,8076	124,7726	0,0350
A 2.1.2	126,4680	126,4594	0,0086
A 2.2.2	127,6033	127,5814	0,0219
A 2.3.2	124,4732	124,4360	0,0370
A 3.1.2	123,7061	123,6975	0,0086
A 3.2.2	134,9404	134,9174	0,0230
A 3.3.2	122,6589	122,6179	0,0410

(Izvor: Giber,2022.)

Oznake uzoraka navedenih u tablicama 4 i 5 sljedećeg su značenja:

A – Mekša elektroda

Prvi broj: označava ponavljanje (prvo, drugo i treće)

Drugi broj: označava brzinu uzorka (1 – brzina 1 m/s, 2 – brzina 1,75 m/s i 3 – brzina 2,5 m/s)

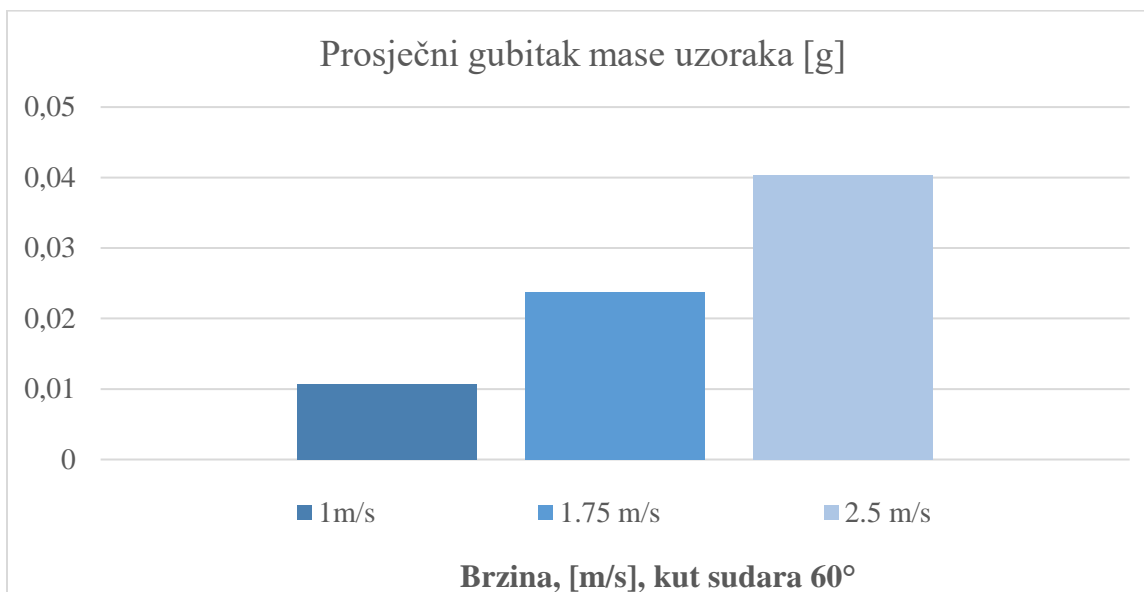
Treći broj: označava kut sudara (1 – kut 60°, 2 – kut 30°)

Tablica 8. prikazuje prosječan gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom na podlozi od konstrukcijskog čelika oznake S325 pri ispitivanju trošenja u masi abraziva „FB105S“ nakon tri ponavljanja. Brzine gibanja ispitnih uzoraka iznose 1, 1,75 i 2.5 m/s, pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60°.

Tablica 8. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 60°

PONAVLJANJE	Brzina 1m/s, Kut 60°	Gubitak mase
1. Ponavljanje	A 1.1.1	0.0082
2. Ponavljanje	A 2.1.1	0.0100
3. Ponavljanje	A 3.1.1	0.0139
	PROSJEK:	0.0107
	Brzina 1.75 m/s, Kut 60°	Gubitak mase
1. Ponavljanje	A 1.2.1	0.0229
2. Ponavljanje	A 2.2.1	0.0252
3. Ponavljanje	A 3.2.1	0.0233
	PROSJEK:	0.0238
	Brzina 2.5 m/s, Kut 60°	Gubitak mase
1. Ponavljanje	A 1.3.1	0.0550
2. Ponavljanje	A 2.3.1	0.0307
3. Ponavljanje	A 3.3.1	0.0352
	PROSJEK:	0.0403

(Izvor: Giber, 2022.)



Slika 23. Dijagramski prikaz prosječnog gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 60°

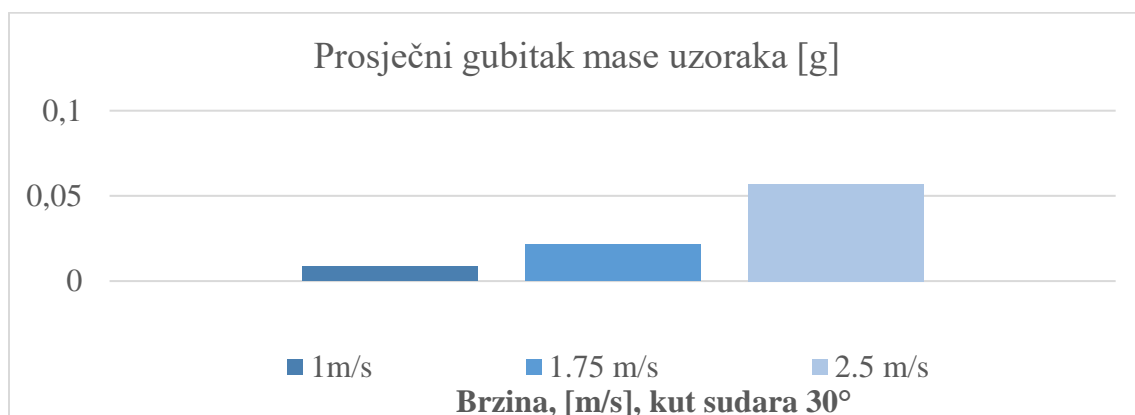
(Izvor: Giber,2022.)

Tablica 9. prikazuje prosječan gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom na podlozi od konstrukcijskog čelika oznake S325 pri ispitivanju trošenja u masi abraziva „FB105S“ nakon provedena tri ponavljanja. Brzine ispitnih uzoraka iznosile su 1, 1,75 i 2.5 m/s, pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 30°.

Tablica 9. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 30°

PONAVLJANJE	Brzina 1m/s, Kut 30°	Gubitak mase
1.Ponavljanje	A 1.1.2	0.0070
2.Ponavljanje	A 2.1.2	0.0086
3. Ponavljanje	A 3.1.2	0.0086
	PROSJEK:	0.0086
Brzina 1.75 m/s, Kut 30°		Gubitak mase
1.Ponavljanje	A 1.2.2	0.0200
2.Ponavljanje	A 2.2.2	0.0219
3.Ponavljanje	A 3.2.2	0.0230
	PROSJEK:	0.0216
Brzina 2.5 m/s, Kut 30°		Gubitak mase
1.Ponavljanje	A 1.3.2	0.0350
2.Ponavljanje	A 2.3.2	0.0508
3.Ponavljanje	A 3.3.2	0.0669
	PROSJEK:	0.0569

(Izvor: Giber, 2022.)



Slika 24. Dijagramski prikaz prosječnog gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 30°

(Izvor: Giber, 2022.)

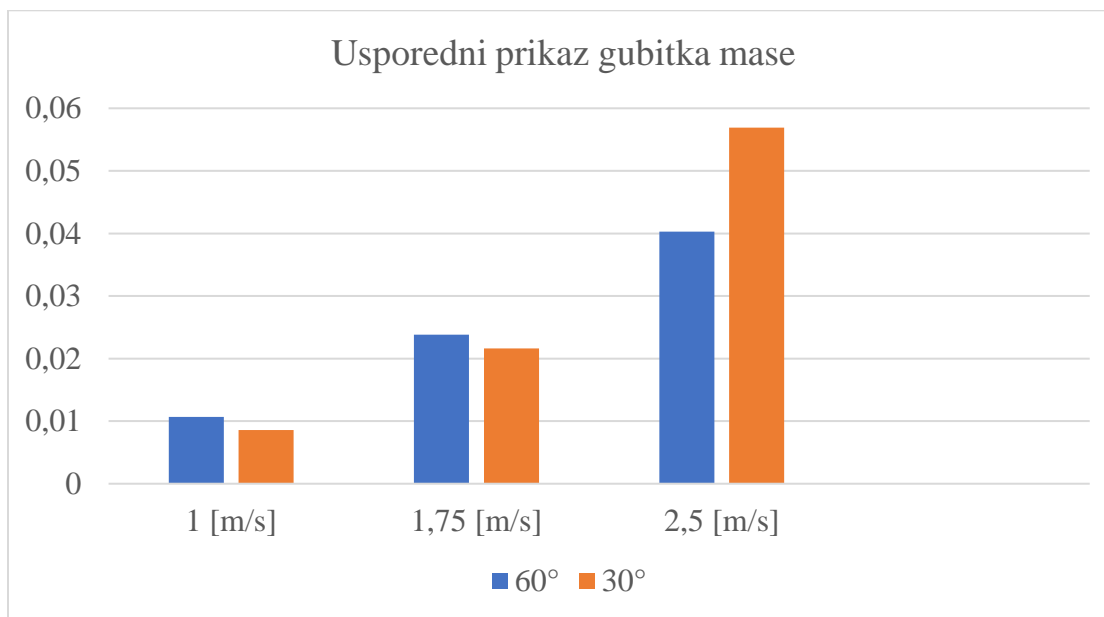
U tablici 10. dan je usporedni prikaz prosječnih gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva nakon 3 ponavljanja. Brzine gibanja ispitnih uzoraka sile su 1, 1,75 i 2.5m/s pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60° i 30°.

Tablica 10. Usporedni prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°.

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

(Izvor: Giber,2022.)

Na slici 25, dan je usporedni dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka s navarenom mekšom elektrodom pri različitim brzinama uzorka i pri kutu sudara abraziva i trošene površine od 60° i 30°.



Slika 25. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°

(Izvor: Giber, 2022.)

Tablica 11. prikazuje rezultate gubitka mase uzoraka s navarenom prevlakom od tvrde elektrode oznake Elgaloy HARD 100 na konstrukcijskom čeliku oznake S325 pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva „FB105S“ pri tri različite brzine i kutu sudara od 60°.

1. $v = 1$ m/s, kut sudara 60°
2. $v = 1,75$ m/s, kut sudara 60°
3. $v = 2.5$ m/s, kut sudara 60°

Tablica 11. Gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°

UZORAK	1. MJERENJE	2. MJERENJE	GUBITAK MASE
B 1.1.1	131,7045	131,6961	0,0084
B 1.2.1	130,7437	130,7049	0,0343
B 1.3.1	130,7031	130,6499	0,0532
B 2.1.1	135,9470	135,9321	0,0149
B 2.2.2	132,9972	132,9552	0,0420
B 2.3.1	131,9388	131,8880	0,0508
B 3.1.1	132,2865	132,2731	0,0134
B 3.2.1	125,0129	124,9834	0,0295
B 3.3.1	123,1016	123,0347	0,0669

(Izvor: Giber, 2022.)

Tablica 12. prikazuje rezultate gubitka mase uzoraka s navarenom prevlakom od tvrde elektrode oznake Elgaloy HARD 100 na konstrukcijskom čeliku oznake S325 pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva „FB105S“ pri tri različite brzine i kutu sudara od 30°.

1. $v = 1$ m/s, kut sudara 30°
2. $v = 1,75$ m/s, kut sudara 30°
3. $v = 2.5$ m/s, kut sudara 60°

Tablica 12. Gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°

UZORAK	1. MJERENJE	2. MJERENJE	GUBITAK MASE
B 1.1.2	132,0688	132,0525	0,0163
B 1.2.2	130,0511	130,0057	0,0454
B 1.3.2	109,5601	109,4667	0,0934
B 2.1.2	126,5582	126,5435	0,0147
B 2.2.2	129,5856	129,5316	0,0540
B 2.3.2	127,0059	126,9186	0,0873
B 3.1.2	139,1909	139,1709	0,0200
B 3.2.2	130,2668	130,2266	0,0402
B 3.3.2	130,1120	130,0203	0,0917

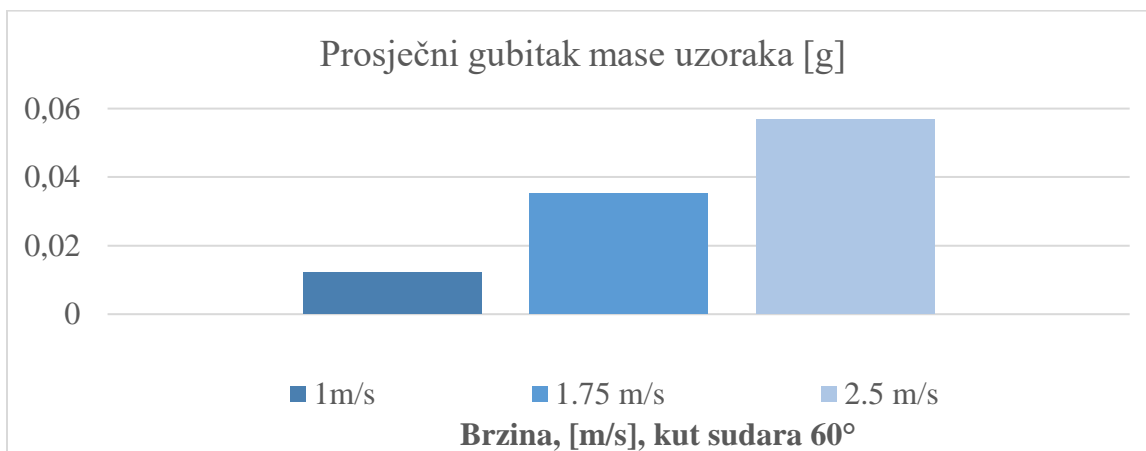
(Izvor: Giber,2022.)

Tablica 13. prikazuje prosječan gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom na podlozi od konstrukcijskog čelika oznake S325 pri ispitivanju trošenja u masi abraziva „FB105S“ nakon tri ponavljanja. Brzine gibanja ispitnih uzoraka iznose 1, 1,75 i 2.5 m/s, pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60°.

Tablica 13. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 60°

PONAVLJANJE	Brzina 1m/s, Kut 60°	Gubitak mase
1. Ponavljanje	B 1.1.1	0,0084
2. Ponavljanje	B 2.1.1	0,0149
3. Ponavljanje	B 3.1.1	0,0134
	PROSJEK:	0,0122
	Brzina 1.75 m/s, Kut 60°	Gubitak mase
1. Ponavljanje	B 1.2.1	0,0343
2. Ponavljanje	B 2.2.1	0,0420
3. Ponavljanje	B 3.2.1	0,0295
	PROSJEK:	0,0352
	Brzina 2.5 m/s, Kut 60°	Gubitak mase
1. Ponavljanje	B 1.3.1	0,0532
2. Ponavljanje	B 2.3.1	0,0508
3. Ponavljanje	B 3.3.1	0,0669
	PROSJEK:	0,0569

Tablica 13. (Izvor: Giber,2022.)



Slika 26. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 60°

(Izvor: Giber, 2022.)

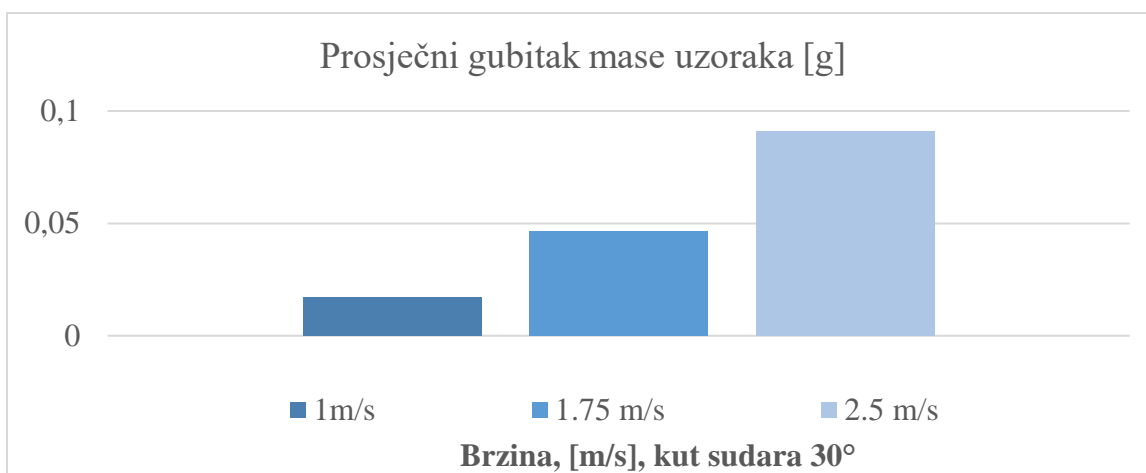
Tablica 14. prikazuje prosječan gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom na podlozi od konstrukcijskog čelika oznake S325 pri ispitivanju trošenja u masi abraziva „FB105S“ nakon

provedena tri ponavljanja. Brzine ispitnih uzoraka iznosile su 1, 1,75 i 2.5 m/s, pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 30°.

Tablica 14. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 30°

PONAVLJANJE	Brzina 1m/s, Kut 30°	Gubitak mase
1.Ponavljjanje	B 1.1.2	0,0163
2.Ponavljjanje	B 2.1.2	0,0147
3. Ponavljanje	B 3.1.2	0,0200
	PROSJEK:	0,0170
	Brzina 1.75 m/s, Kut 30°	Gubitak mase
1.Ponavljjanje	B 1.2.2	0,0454
2.Ponavljjanje	B 2.2.2	0,0540
3.Ponavljjanje	B 3.2.2	0,0402
	PROSJEK:	0,0465
	Brzina 2.5 m/s, Kut 30°	Gubitak mase
1.Ponavljjanje	B 1.3.2	0,0934
2.Ponavljjanje	B 2.3.2	0,0873
3.Ponavljjanje	B 3.3.2	0,0917
	PROSJEK:	0,0908

(Izvor: Giber, 2022.)



Slika 27. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 30°

(Izvor: Giber, 2022.)

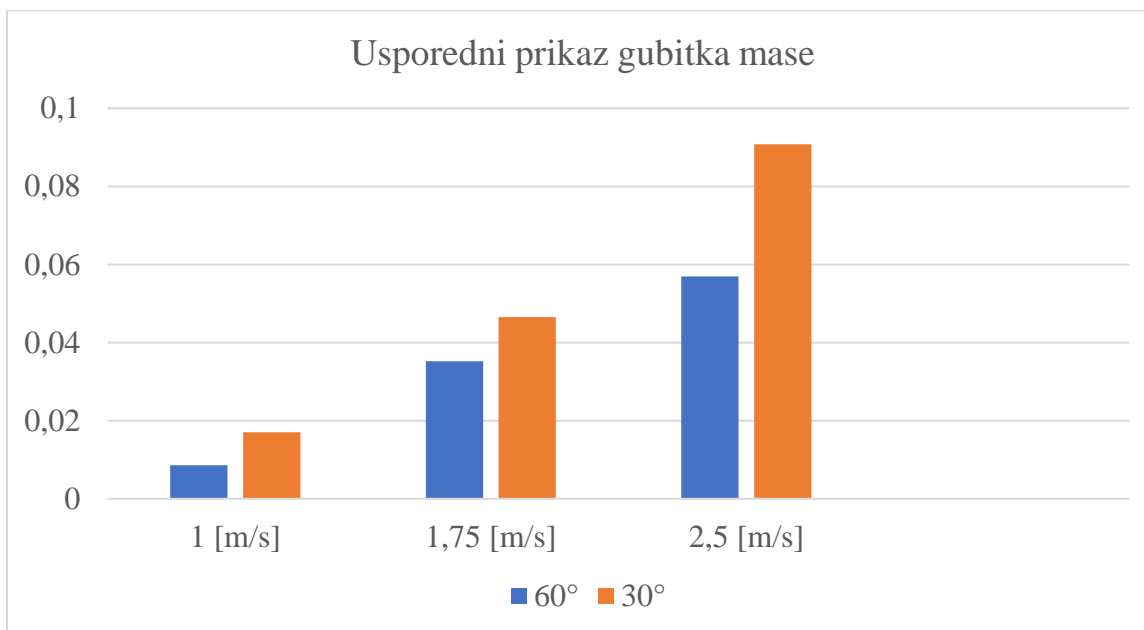
U tablici 15. dan je usporedni prikaz prosječnih gubitaka mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri ispitivanju trošenja gibanjem u masi abraziva nakon 3 ponavljanja. Brzine gibanja ispitnih uzoraka sile su 1, 1,75 i 2.5m/s pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60° i 30°.

Tablica 15. Usporedni prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°.

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

(Izvor: Giber,2022.)

Na slici 28, dan je usporedni dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka s navarenom tvrdom elektrodom pri različitim brzinama uzorka i pri kutu sudara abraziva i trošene površine od 60° i 30°.



Slika 28. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°

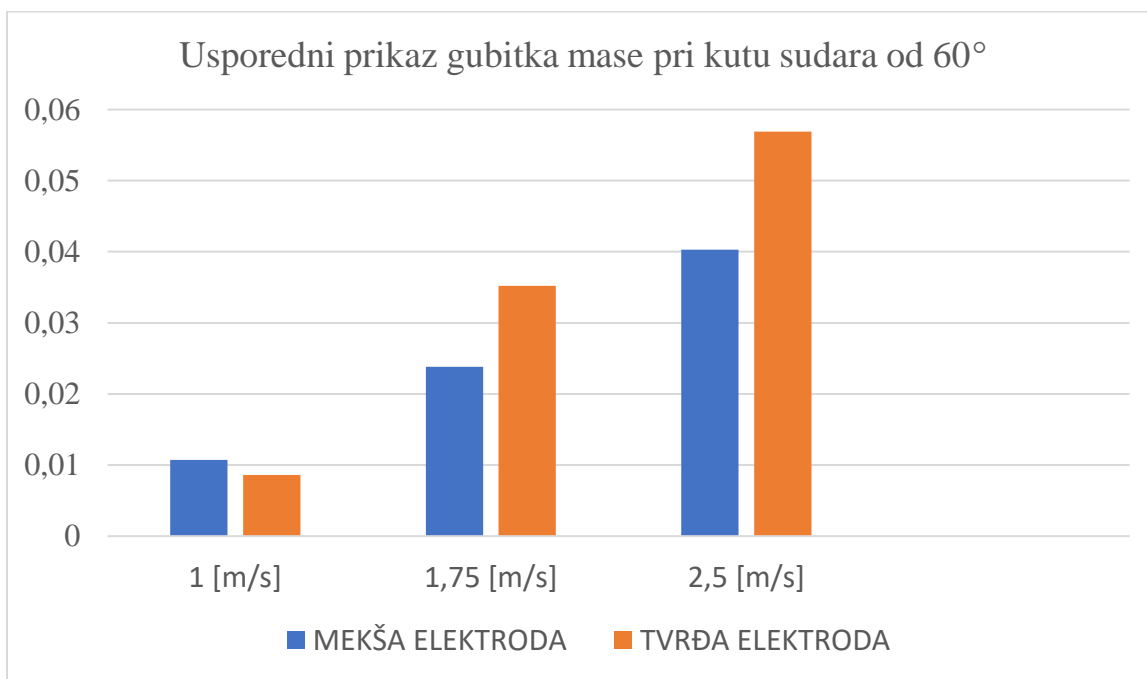
(Izvor: Giber, 2022.)

U tablici 16 usporedno je prikazan prosječni gubitak mase mekše i tvrđe navarene prevlake na podlozi od konstrukcijskog čelika S235 nakon provedena tri ponavljanja gibanjem u masi čestica abraziva. Brzine gibanja ispitnih uzoraka iznosile su 1, 1,75 i 2,5 m/s pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 60°.

Tablica 16. Usporedni prikaz prosječnog gubitka mase za mekšu i tvrđu elektrodu pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°

Uzorak	Brzina uzorka, [m/s]		
	1	1,75	2,5
	Prosječni gubitak mase, [g]		
MEKŠA ELEKTRODA	0,0107	0,0238	0,0403
TVRĐA ELEKTRODA	0,0086	0,0352	0,0569

(Izvor: Giber,2022.)



Slika 29. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom i tvrđom elektrodom pri različitim brzinama gibanja i kutu sudara od 60°

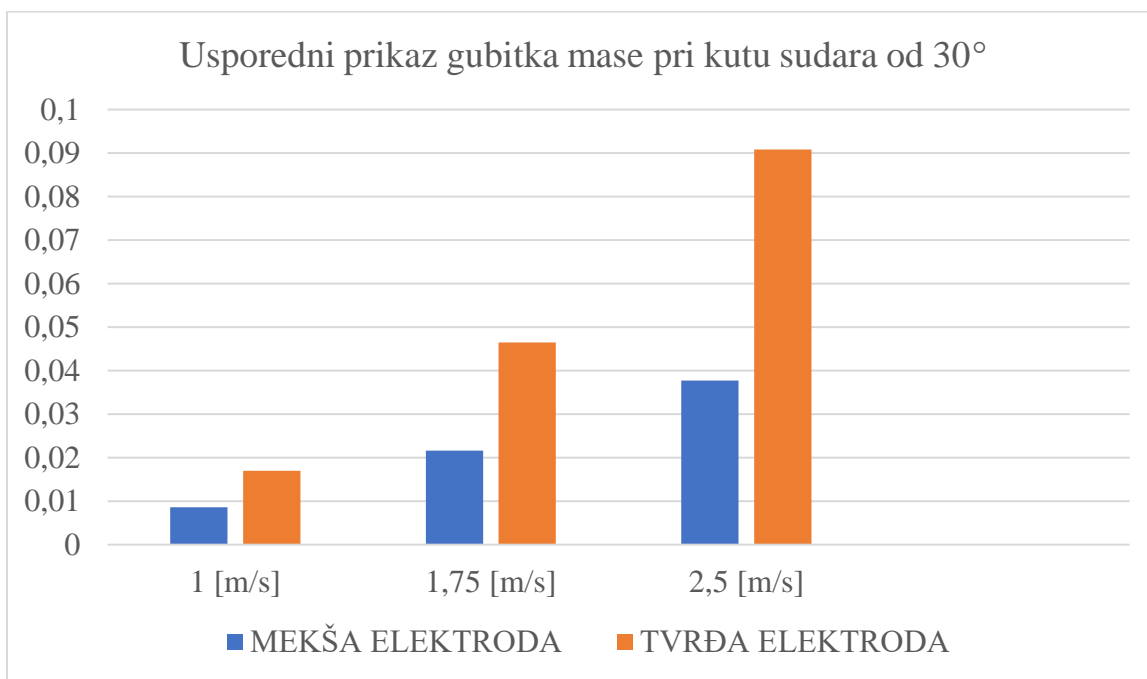
(Izvor: Giber, 2022.)

U tablici 17 usporedno je prikazan prosječni gubitak mase mekše i tvrđe navarene prevlake na podlozi od konstrukcijskog čelika S235 nakon provedena tri ponavljanja gibanjem u masi čestica abraziva. Brzine gibanja ispitnih uzoraka iznosile su 1, 1,75 i 2,5 m/s pri kutu sudara trošene površine i čestica abraziva od 30°.

Tablica 17. Usporedni prikaz prosječnog gubitka mase za mekšu i tvrđu elektrodu pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°

Uzorak	Brzina uzorka, [m/s]		
	1	1,75	2,5
MEKŠA ELEKTRODA	0,0086	0,0216	0,0377
TVRĐA ELEKTRODA	0,0170	0,0465	0,0908

(Izvor: Giber,2022.)



Slika 30. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom i tvrđom elektrodom pri različitim brzinama gibanja i kutu sudara od 30°

(Izvor: Giber, 2022.)

5. RASPRAVA

Zavarivanjem tvrdih prevlaka na konstrukcijski čelik oznake s235 postiglo se povećanje tvrdoće površinskog sloja materijala. 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. Tvrdo navarivanje je nanošenje tvrdog materijala otpornog na trošenje postupkom zavarivanja, procjenjuje se da od ukupnog neželjenog trošenja materijala na abraziju otpada 40 %, udarno trošenje 25 %, koroziju 5 %, visokotemperaturno trošenje 5 % i ostalo trošenje oko 5 %. Konstrukcijski čelik oznake s235 je čelik sa malim postotkom ugljika (0,6%) pa je prema tome dobar odabir za navarivanje tvrdih prevlaka. Navarene su dvije vrste elektrode različite tvrdoće, Elgaloy Hard 100 elektroda tvrdoće 60 – 64 HRC i Elgaloy Hard M 60 elektroda tvrdoće 55 – 60 HRC. Svakom od navedenih elektroda za potrebe istraživanja navareno je po 18 uzoraka. Uzorci su izrezani na dimenzije 40 x 25 x 15 mm što odgovara dimenzijama držača uzoraka za ispitivanje trošenja u masi abraziva. Postupak rezanja obavljen je uz obilno hlađenje kako ne bi došlo do promjene strukture uzoraka uslijed zagrijavanja prilikom rezanja. Kao tehnologija navarivanja korišten je postupak ručnog elektrodučnog zavarivanja (REL postupak).

Odzivna veličina u ispitivanju trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva bila je gubitak mase uzoraka. Ispitivanjem trošenja mekše elektrode (55 – 60 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 0.0107 g. 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 (60 – 64 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 (60 – 64 HRC) prilikom gibanja u masi abraziva brzinom od 1 m/s i pri kutu sudara od 30°, utvrđen je gubitak mase nakon pri 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 16 i 17 te dijagramskih prikaza danih na slikama 29 i 30 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.

6. ZAKLJUČAK

Ispitivanje otpornosti tvrdih navarenih prevlaka na podlozi od konstrukcijskog čelika oznake s235 gibanjem u masi abraziva provedeno je uspješno. Kako bi se utvrdio utjecaj brzine gibanja na gubitak mase uzoraka mijenjana je brzina gibanja uzoraka, koja je iznosila 1 m/s, 1,75 m/s te 2,5 m/s. Također, da bi se utvrdio utjecaj kuta sudara čestica abraziva i trošene površine uzoraka na gubitak mase, mijenjan je kut sudara te je iznosio 30°, odnosno 60°. U istraživanju su za navarivanje uzoraka primijenjene dvije elektrode različite tvrdoće, trgovački naziv elektroda je Elgaloy Hard 100 (tvrđa elektroda) i Elgaloy Hard M 60 (mekša elektroda). Iz rezultata je vidljivo kako je najmanji gubitak mase zabilježen pri brzini od 1 m/s i većem kutom sudara mase abraziva i tošene površine uzoraka koji je bio 60°. Najveći gubitak mase postignut je pri najvećoj brzini uzoraka u masi abraziva (2,5 m/s), te pri manjem kutu sudaranja (30°). Kako je ranije navedeno, takav rezultat je posljedica dužeg kontakta između čestica abraziva i trošene površine pri menjem kutu sudara.

Kod obje elektrode prilikom brzine kretanja u masi abraziva od 1 m/s, izmjeren je manji gubitak mase prilikom kuta sudara od 60°, nego što je to slučaj kod kuta 30°. Kod mekše elektrode prilikom brzine gibanja u masi abraziva od 1 m/s, te kutom sudara od 60° gubitak mase je veći za 24,42% u odnosu na tvrđu elektrodu. Pri brzini gibanja od 1,75 m/s, te kutom sudara od 60° gubitak mase tvrđe elektrode veći je u odnosu na mekšu elektrodu za 47,9%, pri brzini gibanja od 2,5 m/s gubitak mase tvrđe elektrode veći je u odnosu na mekšu elektrodu za 41,19%.

Prilikom gibanja uzoraka u masi abraziva kod brzine od 1 m/s te kutom sudara čestica mase abraziva i uzoraka pri kutu od 30° prosječan gubitak mase tvrđe elektrode je veći za 97,67% u odnosu na mekšu elektrodu. Pri brzini gibanja od 1,75 m/s, prosječan gubitak mase tvrđe elektrode veći je za 115,28% u odnosu na mekšu elektrodu. Pri brzini kretanja od 2,5 m/s, prosječan gubitak mase tvrđe elektrode veći je za 140,85% u odnosu na mekšu elektrodu. Kako je ranije navedeno, manji gubitak mase uzoraka navarenih mekšom elektrodom posljedica je boljeg apsorpiranja energije udara čestice abraziva o trošenu površinu.

7. POPIS LITERATURE

1. Bhushan, B. (2013). Introduction to tribology. Philadelphia: John Wiley & Sons.
2. Gabrić, I., Šitić S. (2015.): Materijali II. Skripta. Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split
3. Grilec, K., Jakovljević, S., Marić, G. (2017.): Tribologija u strojarstvu. Sveučilišni udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
4. Ivušić, V. (1998): Tribologija. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
5. Kema (2015.): Fuga sand. Tehnički list s podacima za kvareni pijesak, Baunit Crna Gora d.o.o., Podgorica, Crna Gora.
6. Klobučar M. Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja (2016)
7. Kostadin T. (2017.): Čelici i željezni ljevovi, Materijali II. Skripta, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac
8. Kovačević, V., Vrsaljko, D. (2011.): Tribologija. Nastavni materijali za kolegij Inženjerstvo površina, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb.
9. Kožuh, S. (2010.): Specijalni čelici. Skripta. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak.
10. Križan B. (2008): Osnove proračuna i oblikovanja konstrukcijskih elemenata
11. Miličević Radomir M. (2010.): Zavarivanje (Postupci, ispitivanje, zaštita)
12. Vidaković I. Statističko modeliranje i optimiranje trošenja tvrdih toplinski naštrecanih prevlaka u masi abraziva
13. Vorax.hr/Materijali-Za-Zavarivanja (29.08.2022.)
14. https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo_navarivanje (29.08.2022.)
15. <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/tpsi/tpsi/tps-320i> (30.08.2022.)
16. www.fronius.com (30.08.2022.)
17. <https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-100/> (30.08.2022.)
18. <https://elgawelding.com/product/elgaloy-hard-m60/> (30.08.2022.)
19. https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje(1.09.2022.)
20. <https://www.laser-ing.hr/blog/osobitosti-zastitnih-plinova-kod-tig-zavarivanja-nehrdajucih-celika/>(1.09.2022)
21. <https://www.zavarivanje.info/cd/119/zavarivanje-moderni-postupci-mig-mag-tig>(1.09.2022.)

8. SAŽETAK

Cilj ovog istraživačkog rada bio je ustanoviti otpornost tvrdih navarenih prevlaka u zaštiti od trošenja dijelova poljoprivrednih strojeva, zavarenih REL metodom zavarivanja na konstrukcijski čelik oznake S235. Otpornost na trošenje (18 uzoraka mekše i 18 uzoraka tvrde elektrode) ispitivana je gibanjem pri različitim brzinama u masi abraziva te pri različitim kutovima sudara čestica abraziva i trošene površine. Brzine gibanja iznosile su 1 m/s, 1,75 m/s te 2,5 m/s, dok su kutovi sudara iznosili 30° i 60°. Tvrdo navarivanje je metoda kojom se nanosi tvrdi materijal otporan na trošenje postupkom zavarivanja. Ispitivanje otpornosti tvrdih navarenih prevlaka provedeno je pomoću uređaja za ispitivanje trošenja uzoraka gibanjem u masi abraziva na Fakultetu Agrobiotehničkih znanosti u Osijeku. Najmanji gubitak mase zabilježen je pri najmanjim brzinama gibanja uzoraka koja je iznosila 1 m/s, te pri većem kutu sudara čestica abraziva i trošene površine koji je iznosio 60°. Najveći gubitak mase bilježimo pri najvećim brzinama gibanja uzoraka od 2,5 m/s te manjim kutom sudara od 30°.

Ključne riječi: tvrdo navarivanje, konstrukcijski čelik s235, ispitivanje trošenja materijala, otpornost tvrdih navarenih prevlaka

9. SUMMARY

The aim of this research work was to establish the resistance of hard welded coatings in protection against the wear of parts of agricultural machinery, welded by the REL welding method to the structural steel s235. Wear resistance (18 samples of the softer and 18 samples of the hardened electrode) were tested by motion at different speeds in the abrasive mass and with two collision angles with the particles of the abrasive mass. The speed of movement amounts to 1 m/s, 1,75 m/s, 2,5 m/s, while angles are 30° and 60°. Hard welding is a method by which a hard, wear – resistant material is applied by welding. The resistance test of hard welded coatings was carried out using a device for testing the wear of samples by motion in a mass of abrasives at the Faculty of Agrobiotechnical sciences in Osijek. The lowest mass loss was recorded at the lowest speed of movement, which was 1 m/s, and at the larger collision angle with the mass of the abrasive particles, which was 60°. The highest mass loss was recorded at the highest speed of movement of 2,5 m/s and a smaller collision angle of 30°.

Key words: Hardfacing, structural steel s235, electrodes, material wear test, resistance of hard welded coatings

10. POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike aparata za zavarivanje FRONIUS TPS 320i

Tablica 2. Kemijski sastav elektrode Elgaloy Hard 100, u postotcima

Tablica 3. Kemijski sastav elektrode Elgaloy Hard M60, u postotcima

Tablica 4. Fizikalno – mineraloški podaci kvarcnog pijeska

Tablica 5. Kemijski sastav kvarcnog pijeska

Tablica 6. Gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°

Tablica 7. Gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°

Tablica 8. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 60°

Tablica 9. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 30°

Tablica 10. Usporedni prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°

Tablica 11. Gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°

Tablica 12. Gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom trošenih pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°

Tablica 13. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 60°

Tablica 14. Prosječni gubitak mase uzoraka navarenih s tvrdom elektrodom pri različitim brzinama i kutu sudara abraziva i trošene površine pri 30°

Tablica 15. Usporedni prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°

Tablica 16. Usporedni prikaz prosječnog gubitka mase za mekšu i tvrđu elektrodu pri različitim brzinama i kutu sudara od 60°

Tablica 17. Usporedni prikaz prosječnog gubitka mase za mekšu i tvrđu elektrodu pri različitim brzinama i kutu sudara od 30°

11. POPIS SLIKA

Slika 1. Konstrukcijski čelik s235 koji smo koristili u istraživanju

Slika 2. Proces zavarivanja

Slika3. MIG/MAG metoda zavarivanja

Slika 4. REL metoda zavarivanja

Slika 5. REL metoda zavarivanja u praksi

Slika 6. Aparat za zavarivanje „FRONIUS TPS 320i“ koji je korišten u izradi rada

Slika 7. Shema gole elektrode, elektrode s jezgrom i obložene elektrode

Slika 8. Navarivanje tvrdog materijala na lemeš pluga

Slika 9. Shema jednostavnog tribosustava

Slika 10. Shematski prikaz tribološkog sustava

Slika 11. Ovisnost sile trenja o težini tijela

Slika 12. Aparat za zavarivanje „FRONIUS TPS 320i“

Slika 13. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva

Slika 14. Uređaj za ispitivanje trošenja gibanjem uzoraka u masi abraziva

Slika 15. Pogonski elektromotor WEG watt drive w21 s reduktorom

Slika 16. Upravljački dio uređaja za trošenje u masi abraziva

Slika 17. Trokraki nosač uzoraka

Slika 18. Prikaz držača uzoraka

Slika 19. Analitička vaga Adam PW 124

Slika 20. Sitena analiza kvarcnog pijeska „FB150S“

Slika 21. Prikaz kinematskih veličina pri ispitivanju trošenja u masi čestica abraziva

Slika 22. Prikaz načina određivanja kuta sudara trošene površine i čestica abraziva

Slika 23. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 60°

Slika 24. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 30°

Slika 25. Usporedni dijagramski prikaz gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°

Slika 26. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka navarenih s tvrđom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 60°

Slika 27. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase uzoraka navarenih s tvrđom elektrodom, pri različitim brzinama i kutom sudara od 30°

Slika 28. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s tvrđom elektrodom pri kutu sudara od 60° i 30°

Slika 29. Usporedni dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka navarenih s mekšom i tvrđom elektrodom pri različitim brzinama gibanja i kutu sudara od 60°

Slika 30. Usporedni dijagramski prikaz gubitaka mase uzoraka navarenih s mekšom i tvrđom elektrodom pri različitim brzinama gibanja i kutu sudara od 30°

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek
Sveučilišni diplomski studij, smjer Mehanizacija

Diplomski rad

Otpornost tvrdih navarenih prevlaka u zaštiti od trošenja dijelova poljoprivrednih strojeva

Tomislav Giber

Sažetak:

Cilj ovog istraživačkog rada bio je ustanoviti otpornost tvrdih navarenih prevlaka u zaštiti od trošenja dijelova poljoprivrednih strojeva, zavarenih REL metodom zavarivanja na konstrukcijski čelik oznake S235. Otpornost na trošenje (18 uzoraka mekše i 18 uzoraka tvrde elektrode) ispitivana je gibanjem pri različitim brzinama u masi abraziva te pri različitim kutovima sudara čestica abraziva i trošene površine. Brzine gibanja iznosile su 1 m/s, 1,75 m/s te 2,5 m/s, dok su kutovi sudara iznosili 30° i 60°. Tvrdo navarivanje je metoda kojom se nanosi tvrdi materijal otporan na trošenje postupkom zavarivanja. Ispitivanje otpornosti tvrdih navarenih prevlaka provedeno je pomoću uređaja za ispitivanje trošenja uzoraka gibanjem u masi abraziva na Fakultetu Agrobiotehničkih znanosti u Osijeku. Najmanji gubitak mase zabilježen je pri najmanjim brzinama gibanja uzoraka koja je iznosila 1 m/s, te pri većem kutu sudara čestica abraziva i trošene površine koji je iznosio 60°. Najveći gubitak mase bilježimo pri najvećim brzinama gibanja uzoraka od 2,5 m/s te manjim kutom sudara od 30°.

Rad je izrađen pri: Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Mentor: prof. dr. sc. Goran Heffer

Broj stranica: 51

Broj slika: 30

Broja tablica: 17

Broj literaturnih navoda: 21

Broj priloga: -

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: tvrdo navarivanje, konstrukcijski čelik s235, ispitivanje trošenja materijala, otpornost tvrdih navarenih prevlaka

Datum obrane:

Stručno povjerenstvo za obranu:

1. prof. dr. sc. Goran Heffer, predsjednik
2. dr. sc. Ivan Vidaković, mentor
3. izv. prof.dr.sc. Vjekoslav Tadić, član

Rad je pohranjen u: Knjižnica Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Vladimira Preloga 1.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek
University Graduate Studies, course Mechanization

Graduate thesis

Resistance of hard welded coatings in protection against wear of parts of agricultural machinery
Tomislav Giber

Abstract:

The aim of this research work was to establish the resistance of hard welded coatings in protection against the wear of parts of agricultural machinery, welded by the REL welding method to the structural steel s235. Wear resistance (18 samples of the softer and 18 samples of the hardened electrode) were tested by motion at different speeds in the abrasive mass and with two collision angles with the particles of the abrasive mass. The speed of movement amounts to 1 m/s, 1,75 m/s, 2,5 m/s, while angles are 30° and 60°. Hard welding is a method by which a hard, wear – resistant material is applied by welding. The resistance test of hard welded coatings was carried out using a device for testing the wear of samples by motion in a mass of abrasives at the Faculty of Agrobiotechnical sciences in Osijek. The lowest mass loss was recorded at the lowest speed of movement, which was 1 m/s, and at the larger collision angle with the mass of the abrasive particles, which was 60°. The highest mass loss was recorded at the highest speed of movement of 2,5 m/s and a smaller collision angle of 30°.

Thesis performed at: Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

Mentor: prof. dr. sc. Goran Heffer

Number of pages: 51

Number of figures: 30

Number of tables: 17

Number of references: 21

Number of appendices: -

Original in: Croatian

Key words: Hardfacing, structural steel s235, electrodes, material wear test, resistance of hard welded coatings

Thesis defended on date:

Reviewers:

1. prof. dr. sc. Goran Heffer, president
2. dr. sc. Ivan Vidaković, mentor
3. izv. prof.dr.sc. Vjekoslav Tadić, member

Thesis deposited at: Library, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Vladimira Preloga 1.