

# Ispitivanje triboloških svojstava električnih kontakata za mala opterećenja i niskonaponske instalacije u vozilu

---

**Mišković, Robert**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:698083>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-11**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Robert Mišković**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Robert Mišković

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na korisnim savjetima, pruženoj pomoći i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Veliko hvala tvrtki Yazaki Europe Limited, Glavna podružnica Zagreb, kao i svim zaposlenicima koji su mi omogućili da eksperimentalni dio provedem u njihovom laboratoriju.

Posebne zahvale gospodinu dipl. ing. stroj. Mariu Markovu, iz tvrtke Yazaki Europe Limited, na bezuvjetnoj pomoći, susretljivosti i podršci tijekom izrade cijelog rada.

Za kraj, najveću zahvalu dugujem svojoj obitelji na golemoj količini strpljenja, podrške, povjerenja i motivacije tijekom mog dosadašnjeg školovanja. Bez njih, ovo ne bi bilo moguće.

Robert Mišković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ROBERT MIŠKOVIĆ** Mat. br.: **0035201567**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje triboloških svojstava električnih kontakata za mala opterećenja i niskonaponske instalacije u vozilu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tribological properties of low power and low voltage electric contacts in vehicles**

Opis zadatka:

Razvojem automobilske industrije sve je veći upliv električnih i elektroničkih sustava u modernom vozilu. Zbog ograničenosti prostora kod vozila, razvojni inženjeri prisiljeni su raditi na smanjenju dimenzija električnih kontakata (terminala). Takvo smanjenje rezultira povećanim trošenjem materijala kontakata. Kontakt (terminal) u vozilu je spoj dvaju vodiča ostvaren mehaničkim putem između dviju metalnih spojnica proizvedenih tehnologijom štancanja.

U ovom je radu potrebno:

- 1) Dati pregled materijala koji se primjenjuju za izradu terminala.
- 2) Opisati vrste trošenja koje se javljaju kod spoja terminala.
- 3) Provesti tribološka ispitivanja na odabranim uzorcima.
- 4) Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

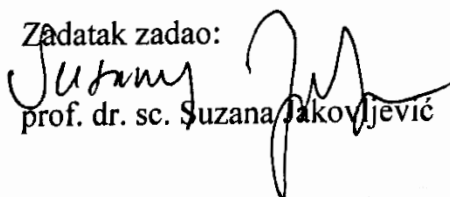
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:  
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:  
04. prosinca 2019.  
05. prosinca 2019.  
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

  
prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednica Povjerenstva:

  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	3
2. INSTALACIJE U VOZILU .....	5
3. ELEKTRIČNI KONTAKTI U VOZILIMA .....	8
4. KONEKTOR .....	11
4.1 Kućište .....	14
4.2 Terminali.....	15
5. FRETING KOROZIJA.....	22
5.1 Sprječavanje fretting korozije .....	24
5.2 Režimi fretting korozije .....	25
5.3 Sastavni mehanizmi frettinga.....	26
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	28
6.1 Uređaj za provođenje fretting ispitivanja .....	29
6.2 Materijali za ispitivanje .....	33
6.2.1 Kositar.....	34
6.2.2 Srebro.....	35
6.2.3 Zlato.....	36
6.3 Eksperimentalna ispitivanja .....	37
6.3.1 Sila spajanja/odspajanja.....	37
6.3.2 Mjerenje kontaktnog otpora .....	48
6.3.3 Analiza oštećenih dijelova .....	60
6.3.4 Pomak i sila .....	64
7. ZAKLJUČAK .....	67
LITERATURA: .....	68
Prilog 1	
Prilog 2	

## POPIS SLIKA

Slika 1. Blok shema obrade informacija u vozilu[2] .....	6
Slika 2. Dio ožičenja u vozilu[3] .....	7
Slika 3. Bohrov model atoma[4] .....	8
Slika 4. Prikaz gibanja električnog naboja[4] .....	9
Slika 5. Bentley Bentayga ožičenje[8] .....	10
Slika 6. Prikaz kućišta konektora[9] .....	11
Slika 7. Terminali[10] .....	12
Slika 8. 12V auto sustav napajanja [11] .....	13
Slika 9. Dijelovi kućišta konektora .....	15
Slika 10. Engl. Lances su označeni crvenom bojom .....	15
Slika 11. Prikaz terminala od CuNiSi legure[10] .....	16
Slika 12. Presjek spoja muškog i ženskog terminala[10] .....	17
Slika 13 3D model ženskog terminala iz dva dijela[10] .....	17
Slika 14. Otvoreni ženski terminal iz jednog dijela .....	18
Slika 15. Prikaz primarnog i sekundarnog prihvata[10].....	19
Slika 16. Simulacija koncentracije naprezanja u terminalu[10] .....	19
Slika 17. Ženski terminal sa zlatnom prevlakom .....	20
Slika 18. Muški terminal sa zlatnom prevlakom .....	20
Slika 19. Oštećena kontaktna površina uslijed djelovanja fretting korozije[12] .....	21
Slika 20. Prije i poslije dvadeset spajanja i odspajanja .....	21
Slika 21. Prikaz djelovanja fretting korozije na tankom kontaktnom području[13] .....	23
Slika 22. Stanica za fretting ispitivanje .....	28
Slika 23. Shematski prikaz puta ekscentra .....	29
Slika 24. Senzor pomaka .....	30
Slika 25. Prikaz idealnog pomaka prema specifikaciji .....	30
Slika 26. Senzor sile .....	31
Slika 27. Sučelje programskog alata.....	31
Slika 28. Sučelje programskog alata za praćenje sile i pomaka .....	32
Slika 29. 3D model prihvata terminala na jednoj strani.....	32
Slika 30 Prikaz muškog i ženskog terminala s kositrenom prevlakom .....	35
Slika 31 Prikaz muškog i ženskog terminala sa srebrnom prevlakom .....	36
Slika 32. Prikaz muškog i ženskog terminala sa srebrnom prevlakom .....	37
Slika 33. Zwick/Roell Z0.5 [25].....	38
Slika 34. Priprema za ispitivanje sile spajana i odspajanja na kidalici.....	38
Slika 35. Priprema uzoraka spojenih u seriju .....	48
Slika 36. Uzorci za vrijeme ispitivanja .....	48
Slika 37. Prikaz temperaturnih mjernih točaka .....	49
Slika 38. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 12, prevlaka na bazi zlata (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1) .....	50
Slika 39. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 12, prevlaka na bazi srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1) .....	51
Slika 40. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 12, prevlaka na bazi kositra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1) .....	52

Slika 41. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 8, prevlaka na bazi zlata (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1).....	53
Slika 42. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 8, prevlaka na bazi srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1).....	54
Slika 43. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 8, prevlaka na bazi kositra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1).....	55
Slika 44. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi zlata (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1).....	56
Slika 45. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1).....	57
Slika 46. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 3, prevlaka na bazi kositra srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1).....	58
Slika 47. Au - uzorak 11 nakon 5 000 ciklusa.....	61
Slika 48. Au - uzorak 7 nakon 50 000 ciklusa.....	61
Slika 49. Au - uzorak 1 nakon 100 000 ciklusa.....	61
Slika 50. Ag - uzorak 11 nakon 5 000 ciklusa.....	62
Slika 51. Ag - uzorak 5 nakon 50 000 ciklusa.....	62
Slika 52. Ag - uzorak 1 nakon 100 000 ciklusa.....	62
Slika 53. Sn - uzorak 9 nakon 5 000 ciklusa.....	63
Slika 54. Sn - uzorak 8 nakon 50 000 ciklusa.....	63
Slika 55. Sn - uzorak 1 nakon 100 000 ciklusa.....	63
Slika 56. Cikliranje uzoraka s prevlakom na bazi zlata.....	66
Slika 57. Cikliranje uzoraka s prevlakom na bazi srebra.....	66
Slika 58. Cikliranje uzoraka s prevlakom na bazi kositra.....	66
Slika 68 Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 9, prevlaka na bazi zlata.....	71



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci konstrukcije terminala iz jednog ili dva komada[10] .....	18
Tablica 2. Režimi fretting korozije[15].....	26
Tablica 3. Kemijski sastav CuNiSi legure [23].....	33
Tablica 4. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 0 ciklusa (početno stanje) ..	40
Tablica 5. Prikaz $F_{Smax}$ , $\overline{F_{Smax}}$ , $F_{Omax}$ i $\overline{F_{Omax}}$ nakon 0 ciklusa .....	41
Tablica 6. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 5 000 ciklusa .....	42
Tablica 7. Prikaz $F_{Smax}$ , $\overline{F_{Smax}}$ , $F_{Omax}$ i $\overline{F_{Omax}}$ nakon 5 000 ciklusa.....	43
Tablica 8. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 50 000 ciklusa .....	44
Tablica 9. Prikaz $F_{Smax}$ , $\overline{F_{Smax}}$ , $F_{Omax}$ i $\overline{F_{Omax}}$ nakon 50 000 ciklusa.....	45
Tablica 10. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 100 000 ciklusa .....	46
Tablica 11. Prikaz $F_{Smax}$ , $\overline{F_{Smax}}$ , $F_{Omax}$ i $\overline{F_{Omax}}$ nakon 100 000 ciklusa.....	47
Tablica 12. Promjena sile spajanja u % .....	47
Tablica 13. Promjena sile odspajanja u % .....	47
Tablica 14. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi zlata.....	50
Tablica 15. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi srebra .....	51
Tablica 16. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi kositra .....	52
Tablica 17. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi zlata.....	53
Tablica 18. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi srebra .....	54
Tablica 19. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi kositra .....	55
Tablica 20. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi zlata.....	56
Tablica 21. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi srebra .....	57
Tablica 22. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi kositra .....	58
Tablica 23. Prikaz $R_M$ , $R_m$ , $s$ i $R$ za srednju vrijednost otpora pojedinih prevlaka .....	59
Tablica 24. Prikaz $R_M$ , $R_m$ , $s$ i $R$ za srednju vrijednost otpora pojedinih prevlaka .....	59
Tablica 25. Prikaz $R_M$ , $R_m$ , $s$ i $R$ za srednju vrijednost otpora pojedinih prevlaka .....	60

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$f$	Hz	Frekvencija
$F$	N	Sila
$R$	$\Omega$	Električni otpor
$R_M$	$\Omega$	Maksimalna vrijednost električnog otpora
$R_m$	$\Omega$	Minimalna vrijednost električnog otpora
$\bar{R}$	$\Omega$	Prosječna vrijednost električnog otpora
$s$		Standardna devijacija

## SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada dan je pregled osnovnih pojmova vezanih uz fretting koroziju u električnim kontaktima. Opisan je konektor čija je namjena značajna u autoindustriji jer predstavlja sastavni element svih električnih mreža modernog vozila. Sastavni dijelovi konektora su metalni terminali i polimerno kućište. Konektor može biti različitih broja polova i imati razne zahtjeve u primjeni kao npr. otpornost na visoke temperature, vodonepropusnost, otpornost na vibracije itd. U pokusu je provedeno ispitivanje terminala na podložnost fretting koroziji. Ispitivanje je provedeno na jednakim terminalima s prevlakama od zlata (0,8  $\mu\text{m}$  -1,3  $\mu\text{m}$ ), srebra (1  $\mu\text{m}$  -2  $\mu\text{m}$ ) i kositra debljine (1  $\mu\text{m}$  -3  $\mu\text{m}$ ). Nakon ispitivanja i detaljno provedene analize rezultata, dan je zaključak.

Ključne riječi: autoindustrija, konektor, terminal, fretting korozija

## **SUMMARY**

The theoretical part gives an overview of the basic concepts related to fretting corrosion in electrical contacts. A connector, whose has significant purpose in automotive industry, is described as integral part of harness in modern vehicles. Connector is made in two parts, metal terminal and polymer housing. Connector might has a different number of pole and different requirements like high temperature resistance, waterproofness, vibration resistance etc. In test, terminals were tested on susceptibility on fretting corrosion. The test was performed at equal terminals with different coatings – gold (0,8  $\mu\text{m}$  -1,3  $\mu\text{m}$ ), silver (1  $\mu\text{m}$  -2  $\mu\text{m}$ ) and tin (1  $\mu\text{m}$  -3  $\mu\text{m}$ ). Conclusion are given after examining and analyzing.

Key words: automotive, conncecor, terminal, fretting corrosion

## 1. UVOD

Tehnologije su, kroz povijest, imale značajan utjecaj na ljude, njihovo ponašanje te aktivnosti. Počevši od razvoja prvih agrikulturalnih tehnologija, preko razvoja kotača pa sve do relativno nedavne industrijske revolucije, tehnologije su uvelike promijenile čovjekov način života.

Naglasak ovoga rada stavljen je na autoindustriju, jednu od najvećih i najprofitabilnijih industrija u svijetu. Automobil je savršeni primjer mnogo jednostavnih tehnologija povezanih u jednu veliku, kompleksnu tehnologiju. To je tehnologija koja osigurava mobilnost pojedinaca. Autoindustrija je jedna od temeljnih grana industrije, koja pokreće gospodarstvo i ekonomski razvoj zemalja u kojima se nalazi. Međutim, zbog sve većih i sve strožih zahtjeva i kriterija, kako tržišta, tako i zakonske regulative, koji su postavljeni pred proizvođače automobila, autoindustrija će morati pronaći nova rješenja kako bi ih sve ispunila, a da pritom proizvodnja automobila ne postane neisplativa.

Električne i elektroničke instalacije u vozilima danas imaju sve veću ulogu nego prije.

Kontakt u elektrotehici označava stanje koje nastaje dodiranjem dvaju vodiča. Kontakt mora pouzdano i brzo zatvoriti strujni krug uz što manji kontaktni otpor i što manje iskrenje te na isti način brzo prekinuti strujni krug uz što manje iskrenja, a u kojem cilju se odabiru odgovarajuća konstrukcijska rješenja i elektrotehnički materijali. Kontaktni otpor dvaju vodiča veći je od otpora homogenog vodiča istog presjeka zbog nesavršenosti kontaktnih površina i zbog kemijskih promjena na površini materijala. Ovaj povećani otpor uzrokuje zagrijavanje kontaktnih mjesta, a povišena temperatura oštećuje kontaktne elemente i mijenja im svojstva. Izborom materijala treba postići optimalna rješenja koja nisu za sve slučajeve ista. Površina kontakata treba biti fino obrađena i tvrda te materijal treba imati veliku električnu vodljivost i otpornost na koroziju. Također treba imati i neka posebna svojstva kao što su otpornost na električni luk, iskrenje i starenje. To znači da materijali za kontakte moraju zadovoljavati određena električna, mehanička, kemijska i toplinska svojstva. Ta svojstva im trebaju osigurati što veću električnu vodljivost, veliku tvrdoću i otpornost na trošenje te otpornost prema oksidiranju i oštećivanju zbog električne iskre i luka.[1]

Usljed vibracijskih i temperaturnih djelovanja, na kontaktima se odvijaju različite faze trošenja. S obzirom da se radi o mikro pomacima, najopasnija je pojava fretting korozije (izjedanje).

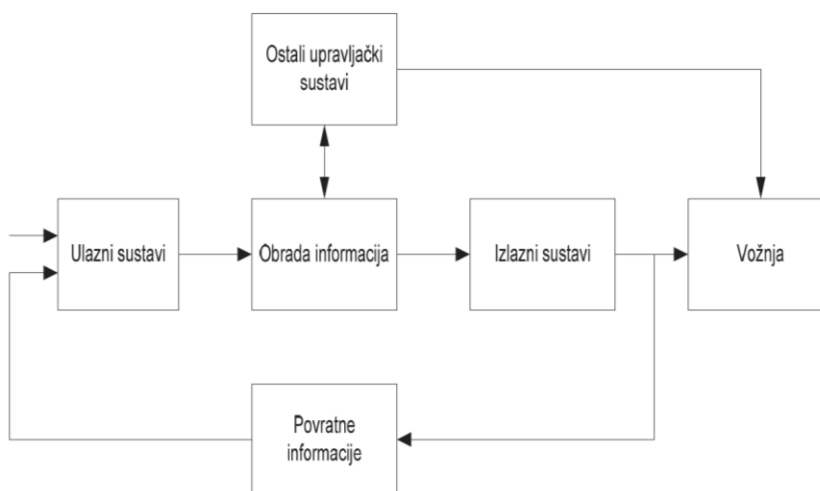
## 2. INSTALACIJE U VOZILU

Na svom početku razvoja vozila su bila sastavljena samo od mehaničkih dijelova. Prvi električni dijelovi koji su se upotrebljavali u vozilima bili su niskonaponsko magnetsko paljenje, visokonaponsko magnetsko paljenje te svjećice za paljenje. Nakon toga dolazi do razvoja elektroničkih dijelova: akumulatora, razdjelnika, startera, svjetala, trube, autoradija, pokazivača smjera i dr. Danas je u vozilima više elektroničkih dijelova nego mehaničkih, npr. senzori (senzor brzine vrtnje, senzori temperature i dr.), klima uređaj, upravljačka jedinica (ECU – engl. *Engine Control Unit*), podizači stakala, alarm itd. Svakim danom tehnologija ide sve dalje i sve se više koriste složeniji sklopovi. Već odavno postoje tzv. „pametna“ vozila koji pripremaju vozača i putnike na moguću nesreću i donose odluke u kritičnim situacijama. Razvoj osobnih vozila prošao je više faza, od mehaničkih sustava preko mehaničko-elektroničkih do današnjih elektroničkih sustava nadzora i upravljanja vozilom.[2]

Zadnja četiri desetljeća je obilježio nagli porast broja i složenosti elektroničkih sustava u osobnim vozilima. Udio elektronike u današnjim osobnim vozilima čini čak 23% ukupne proizvodne cijene. Analitičari procjenjuju da više od 80% inovacija u automobilske industriji je temeljeno na elektroničkim sustavima. Sa porastom broja elektroničkih sustava u vozilima rastu i zahtjevi na strukturnu izgradnju jer se u prosječnom vozilu nalazi više od četiri kilometara raznih vodova dok je taj broj 1955. godine iznosio samo 45 metara.[2]

Kao što se LAN-om (engl. *local area network*) povezuju računala tako kontrolne mreže povezuju elektroničku opremu u vozilu. Tim mrežama se izmjenjuju podaci između raznih elektroničkih sustava i aplikacija koje se u njima pokreću. U prošlosti su se komponente međusobno spajale žicama što je postao problem kako je broj komponenata rastao. Glavni problem je u povećanju mase vozila, smanjenju pouzdanosti i zauzimanju sve više prostora. Tako je ožičenje postalo najsloženija i najskuplja komponenta u vozila. Današnje kontrolne i komunikacijske mreže se temelje na serijskim protokolima čime se uklonio problem složenog ožičenja. Tako je 1998. godine Motorola razvila cjelokupnu kontrolnu i informacijsku mrežu vozila temeljenu na LAN tehnologiji čijom je ugradnjom u tada novu klasu BMW-a, smanjila težinu ukupnog ožičenja za 15 kilograma i povećala učinkovitost.[2]

Općenito se automobil kao sustav može prikazati kao na slici 1. Ulazni sustav služi za prikupljanje informacija bitnih za rad automobila (npr. položaj bregaste osovine, radilice, stanje spremnika za gorivo, ispravnost senzora), koje se zatim obrađuju u središnjoj mikroprocesorskoj jedinici za upravljanje (ECU). Ta središnja jedinica je povezana s drugim upravljačkim jedinicama, ako ih vozilo posjeduje.[2]



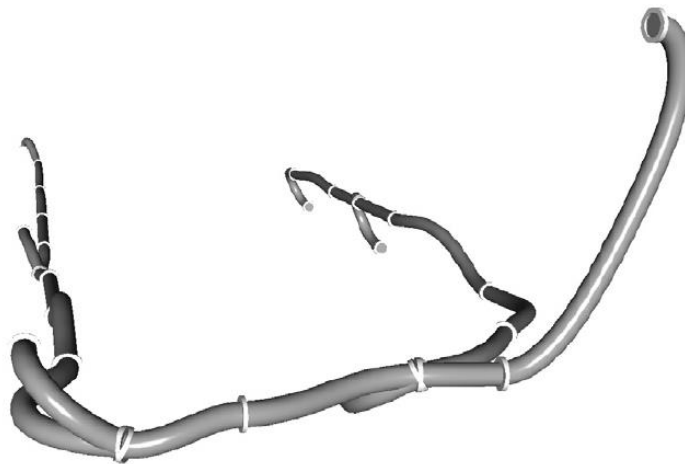
**Slika 1. Blok shema obrade informacija u vozilu[2]**

Elektronička industrija jedan je od najdinamičnijih sektora svjetske ekonomije. U SAD-u ta je industrija rasla po tri puta većoj stopi nego cjelokupna ekonomija devedesetih te države. Brz rast elektroničke industrije potaknuo je dramatičan napredak u proizvodnji električnih i elektronskih komponenata te sustava koji se prodaju. Novi dijelovi i materijali se neprestano uvode, a kao cilj postavlja se ušteda energije i materijala. Optimiziranjem u procesu razvoja novih proizvoda teži se životni vijek proizvoda napraviti točno takvim da maksimalno zadovolji svoju svrhu do izlaska novog, unaprijeđenog proizvoda, koji će ga zamijeniti.[5]

Današnja automobilska industrija usmjerena je na nova elektrificirana i hibridna rješenja. Studije u automobilskoj industriji pokazuju da su problemi s ožičenjem i zadacima koje ono obavlja, jedan od kritičnijih problema u vozilu. Na primjer, montaža električnih kabela i pojaseva ožičenja su osjetljivi zbog skrivenih putanja, višestrukih točaka grananja i neugodnih ergonomskih položaja. Stoga se segment montaže mora razmotriti početkom prototipnog dizajniranja s obzirom na izvedivost i ergonomiju. Učinkoviti algoritmi automatskog planiranja puta za kruta tijela uspješno je implementiran i danas su sastavni dio mnogih virtualnih alata. Alati za virtualno sklapanje



komponentata, za trening, koristili bi simulaciju fleksibilnih dijelova kako bi se dodatno smanjila vremena sklapanja i montaže. Automatsko planiranje staza za deformabilne objekte općenito je prepoznato kao izazovno istraživačko područje. To uključuje i učinkovitu simulaciju elastičnih materijala, brzu provjeru sudara između krutih objekata i planiranje. Pod pretpostavkom da se kabelskim snopom može upravljati pomicanjem skupa ručki, zadatak koji se razmatra je pronaći manipulaciju, tako da kabelski svežanj završava u željenoj ciljnoj konfiguraciji na način bez sudara s krutim dijelom vozila.[3]



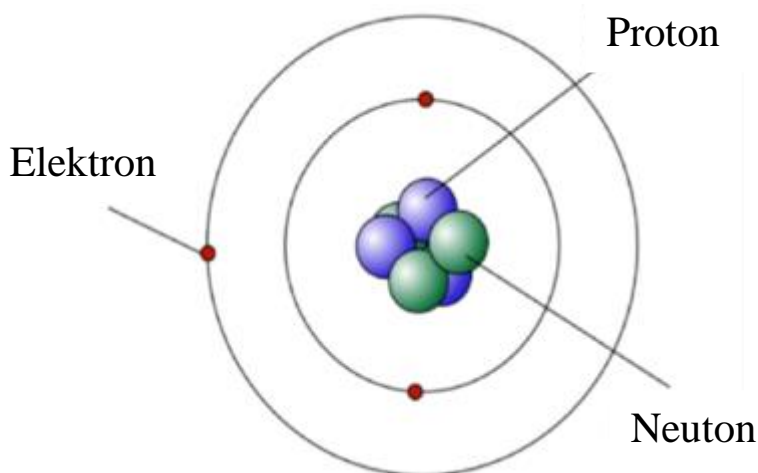
**Slika 2. Dio ožičenja u vozilu[3]**

### 3. ELEKTRIČNI KONTAKTI U VOZILIMA

Električna energija je jedan od oblika energije koji u odnosu na druge oblike (npr. toplinsku, svjetlosnu, mehaničku i kemijsku energiju) ima nekoliko prednosti:[4]

- velike količine električne energije vodovima mogu se prenositi na velike udaljenosti,
- laka pretvorba u ostale oblike energije, npr. u toplinu u žarnim nitima, svjetlo u žaruljama, mehaničku energiju u elektromotorima, kemijsku energiju pri punjenju akumulatora,
- pretvorba energije u ostale oblike ekološki je vrlo prihvatljiva.

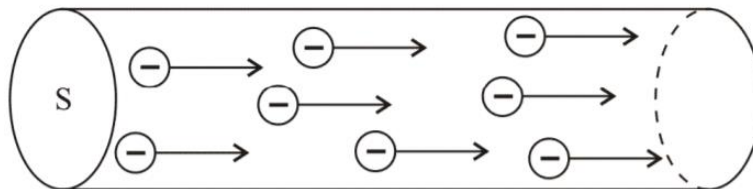
Temelj za razumijevanje elektroničkih procesa je Bohrov model atoma, slika 3. Atom je osnovna građevna jedinica tvari, tj. najsitnija je čestica nekog kemijskog elementa i ne može se kemijski rastaviti u sitnije tvari (grč. atomos – nedjeljiv). Sastoji se od jezgre i elektronskog omotača. Atomsku jezgru čine protoni i neutroni.[4]



Slika 3. Bohrov model atoma[4]

Slobodni naboji u metalima su slobodni elektroni, u elektrolitima pozitivni i negativni ioni, poluvodičima elektroni i šupljine, a u plinovima elektroni i ioni. Elektroni se mogu gibati samo u zatvorenom strujnom krugu. Elementarni strujni krug čine izvor napona, trošilo i vodiči. Prekidačem se strujni krug zatvara ili otvara. Gibanje elektrona pojavljuje se u svim električnim vodičima, metalima i njihovim legurama s metalnom vezom. Metalni atomi daju elektrone. Ovi slobodni elektroni gibaju se između nepomičnih metalnih atoma u kristalnim rešetkama.

Zatvaranjem strujnog kruga i djelovanjem električnog polja, istodobno se sve slobodne elektrone vodiča i trošila sili na usmjereno gibanje iz čega nastaje električna struja.[4]



**Slika 4. Prikaz gibanja električnog naboja[4]**

U električne uređaje vozila ubrajaju se izvori električne energije i električna trošila. Zadatak izvora je opskrba vozila električnom energijom, a zadatak trošila je raznovrstan, kao npr. osigurati stabilnost, udobnost i sigurnost vozila, kao i besprijekoran rad svih ostalih neelektričnih sustava. Kod zaustavljenog vozila izvor energije je baterija, dok je kod pokrenutog motora izvor energije generator koji usputno puni i bateriju. Motorna vozila za svoj rad neophodno trebaju el. struju za napajanje različitih trošila. Zbog neprestanog kretanja električna struja se mora proizvesti na samom vozilu. Napajanje strujom mora biti stalno i stabilno s dovoljnom snagom za sva trošila. Indirektno proizvodnja struje povećava potrošnju goriva (oko 7%).[6]

Sva električna trošila na motornim vozilima trebaju biti usklađena kako bi radila na istoj električnoj instalaciji. Zbog akumulatora instalacija vozila upotrebljava istosmjernu struju koja treba imati stalnu vrijednost napona. Takvi su naponi standardizirani u cijelom svijetu te se svugdje upotrebljavaju isti rezervni dijelovi.[4]

Električni kontakt je mjesto prijelaza struje iz jednog u drugi element provodnog sistema na mjestu njihovog dodira. Istovremeno, kontakt električnog sklopnog aparata (konektora) predstavlja konstrukcijski sklop, u kojem se električni kontakti između pojedinih provodnih elemenata ostvaruju putem pritiskanja jednog na drugi element pomoću kontaktnih opruga ili vijaka, spojnih dijelova s navojem ili na bilo koji drugi način. Električni kontakti su osnovne komponente električnih sustava. Primjenjuju se u različitim uvjetima, što značajno utječe na njihov životni vijek. Fretting korozija jedan je od glavnih mehanizama starenja električnih kontakata. Kako bi se utjecaj frettinga minimizirao, na kontaktne površine moguće je nanjeti metalne prevlake koje usporavaju proces trošenja. Dva odlučujuća faktora za životni vijek električnih kontakata su broj ciklusa pomaka i vrijeme potrebno da se stvori oksidni sloj.[7]

Električni kontakti koriste se za povezivanje ogranaka automobilskeg ožičenja. Da bi se osigurala pouzdanost sustava, električni kontakti trebaju raditi na siguran način. U tu svrhu prevlake se nanose na osnovne materijale kako bi zaštitile električne kontakte od korozije. Općenito, materijali prevlaka dijele se u dvije skupine: prevlake plemenitih i neplemenitih metala. Prevlaka na bazi kositra tipična je neplemenita prevlaka te je široko rasprostranjena u industriji zbog niske cijene. Prevlake također oksidiraju i stoga su i one podložne fretting koroziji. Posljedično trošenje metalne prevlake u električnim kontaktima usko je povezan s pojavom oksidacije.[7]



**Slika 5. Bentley Bentayga ožičenje[8]**

## 4. KONEKTOR

Konektor je elektromehanički uređaj koji se koristi za spajanje dvaju ili više vodiča. Konektorski par sačinjavaju nasuprotno uparivi zasebni konektori koje se uobičajeno naziva ženski i muški konektor. Veza između konektorskog para najčešće je rastavljiva.[9]

Konektori su cjeline koje se sastoje od dva glavna dijela. Vanjski i zaštitni dio, kućište, najčešće napravljen od polimera koji ima zadaću zaštititi mjesto kontakta od vanjskih utjecaja i omogućiti mu mehaničku stabilnost. Kućišta mogu biti različitih veličina. Drugi dio konektora je terminal. To je dio koji ostvaruje kontakt i zatvara strujni krug. Konektor se najčešće opisuje brojem polova, pa razlikujemo, jednopolni, dvopolni, tropolni, itd. konektor. Tako je npr. konektor kroz koji prolazi 10 terminala, 10 polni konektor. Poprečni presjek žice i veličina terminala na konektoru ne mora nužno biti samo jedne vrste. Moguće su kombinacije žica različitih poprečnih presjeka kao i terminala raznih veličina. U tom slučaju, radi se o hibridnim konektorima. Na slici 6. je prikazano kućište hibridnog konektora.[9]



**Slika 6. Prikaz kućišta konektora[9]**

Osim što štiti od vanjskih utjecaja, konektor također ima konstrukcijska rješenja koja pružaju terminalima mogućnost dodatnog zaključavanja (engl. *Locking lance*) kako bi bili fiksni te nebi

stvarali prekide u strujnom krugu. Prekidom strujnog kruga smatra se pojava povećanja kontaktnog otpora iznad  $7 \Omega$ , duže od  $1 \mu s$ . To je ujedno i glavna zadaća konektora. Terminal u konektoru je drugi nužni dio konektora. On je poveznica između dvije žice. Kako postoji muška i ženska strana konektora, tako postoji i muški i ženski terminal. Terminali i konektori mogu biti vodonepropusni. Npr. tvrtka Yazaki, isporučuje terminale u veličini od 0,5 mm do 9,5 mm. Moguće su i različite vrste prevlake terminala, od kositra, zlata i srebra. Navedeni terminali krimpaju se na žice presjeka od  $0,13 \text{ mm}^2$  do  $16 \text{ mm}^2$ . Njihova konstrukcija uvjetovana je specifikacijom koju mora zadovoljiti. Specifikacija definira uvjete opterećenja konektora i terminala, a ispitivanjem se želi simulirati njihova višegodišnja eksploatacija (15 godina ili 300.000 km).[9]



**Slika 7. Terminali[10]**

Kontaktna sila između ženskog i muškog terminala definira se kao normalna sila u kontaktnoj točki, a uz faktor trenja direktno utječe na veličinu sile spajanja, koja je obrnuto proporcionalna kontaktnom otporu. Upravo je dimenzioniranje odnosa između sile spajanja i kontaktnog otpora ključan faktor u razvoju terminalskog para. Prevelika normalna sila u spoju dovodi do prijevremene dotrajalosti materijala, dok premala dovodi do višeg kontaktnog otpora i mogućeg pregrijavanja kontaktnog para. Učestala je pojava da tijekom prvih 10-20 spajanja i odspajanja kontaktnog para, ovisno o prevlaci, sila spajanja raste, a u kasnijim ciklusima ( $>20$ ) počinje padati. Ovaj fenomen povezan je sa činjenicom da tijekom prvih 10-20 ciklusa spajanja i odspajanja dolazi do nakupljanja materijala prevlake u zoni nekoliko milimetara od kontaktne točke, što rezultira povećanjem debljine muškog kontakta i smanjenjem otvora ženskog te samim time do povećanja sile spajanja i odspajanja. Kada broj spomenutih ciklusa postane  $>20$  sile počinju opadati uslijed loma nakupljene prevlake i oslobađanja barijere stvorene nakupljanjem materijala.[11]

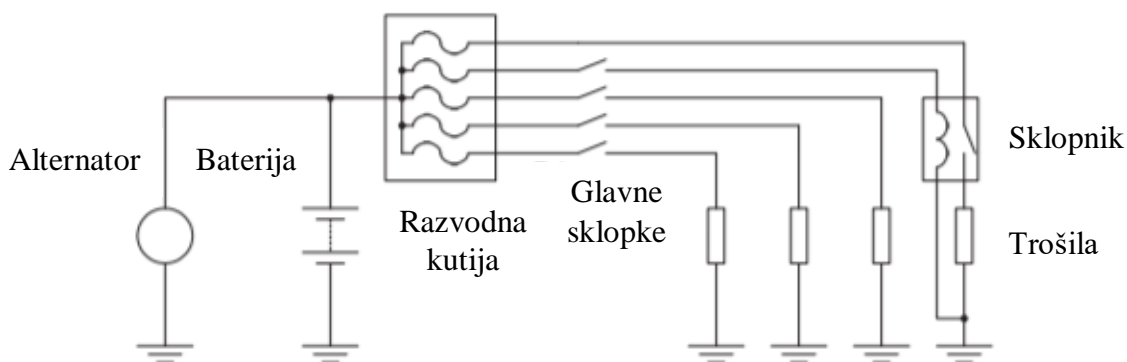
Tisuće konfiguracija priključaka izrađuje se za napajanje, prijenos podataka i audio-vizualne aplikacije. Električni priključci mogu se podijeliti u četiri osnovne kategorije, različito prema njihovim funkcijama[16]:

- linijski ili kabelski konektori trajno pričvršćeni na kabel, koji omogućuju njegovo priključenje na drugi terminal,
- konektori na PCB (engl. *printed circuit board*) koji su trajno pričvršćeni na dio opreme lemljenjem, omogućujući korisnicima da povežu kabel na stacionarni uređaj,
- spojnice koji trajno spajaju dvije duljine žice ili kabela.

Većina konektora ima tzv. mehaničko kodiranje čiji je cilj spriječiti nehотиčno pogrešno spajanje.[11]

Današnja vozila mogu imati preko 200 pojedinačnih električnih opterećenja s prosječnim zahtjevima snage iznad 800 W. To uključuje funkcije kao što su prednja svjetla, stražnja svjetla, svjetiljke u kabini, starter, pumpa za gorivo, brisači, ventilator, mlaznice za gorivo, grijač sjedala, upravljačka jedinica motora, radio, paljenje iskre, start/stop sustav, zračni jastuk, 12 V punjač i sl.[11]

Da bi se opterećenja u navedenim dijelovima vozila napajala, današnja vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem (engl. *Internal combustion engine – ICE*) koriste električni elektroenergetski sustav sličan sustavu prikazanom na slici 8.[11]



Slika 8. 12V auto sustav napajanja [11]

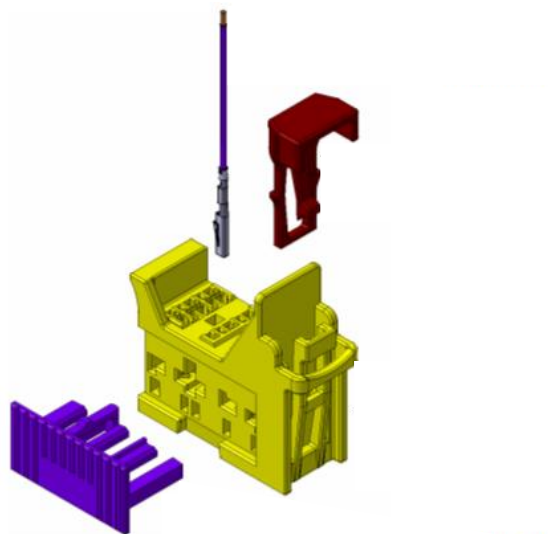
Snagu generira motor alternator-generator izmjenične struje. Izmjenični napon ovog stroja se ispravlja, dok se istosmjerni izlaz regulira na vrijednosti 14 V pomoću elektronskog regulatora koji kontrolira struju polja u stroju. Alternator puni 12 V-nu bateriju koja snabdjeva potrošače. Baterija pruža potrebnu snagu takvim potrošačima kao što je starter te napaja ostale uređaje kad motor ne radi ili kada je potražnja za električnom energijom veća od izlazne snage alternatora. Baterija također djeluje i kao veliki kondenzator te održava konstantnim napon sustava. Osigurači, smješteni u jednoj ili više kutija, štite uređaje i vodiče od preopterećenja. Većinom trošila upravlja se izravno ručnim pokretanjem mehaničke sklopke. Te se sklopke nalaze u područjima koja su lako dostupna vozaču ili putnicima, kao npr. nadzorna ploča, vrata i strop. Teška opterećenja kao što je starter (elektropokretač) prelaze preko elektromehaničkih sklopnika.[11]

Svako povećanje električnog otpora od propisane vrijednosti očituje se kroz propterećenje, odnosno porast pada napona na pojedinom potrošaču. Jedan od mogućih uzroka može biti loša izvedba kućišta ili terminala. Do oštećenja materijala može doći i zbog izbora krivog materijala za konektor, polimernog za kućište ili metalnog za terminal. Uzrok preopterećenja može biti trajno oštećeni terminal. Trošenju između ostalog pogoduje i fretting korozija ili oštećenje prevlake koja stvara nepoželjne produkte u obliku nečistoća. Nečistoće se kasnije mogu pojaviti u obliku abrazivnih čestica koje dovode do oštećenja površine.

#### **4.1 Kućište**

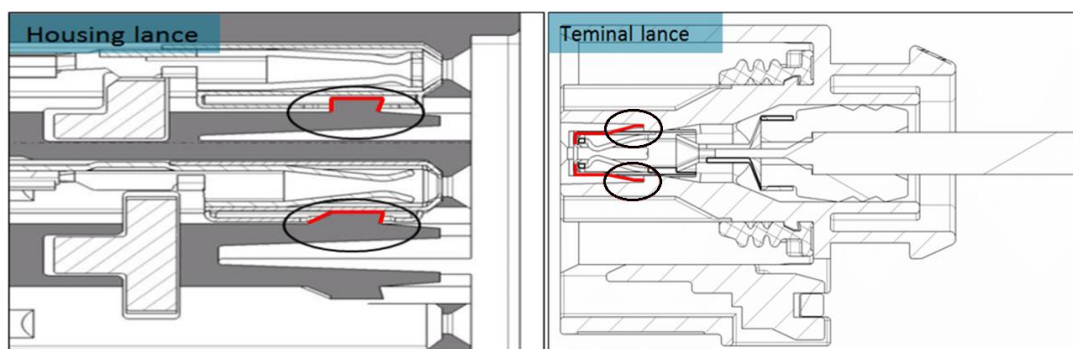
Kućište je nevodljivi dio konektora koje je konstruiran da pozicionira, zaštiti i izloira terminale jedne od drugih ili od vanjskih utjecaja. U svrhu lakšeg označavanja i rukovanja, kućišta su podjeljena na muška i ženska. U muška kućišta ulaze muški terminali, dok u ženska kućišta ulaze ženski terminali. Kućišta kao i terminali mogu biti vodonepropusni. Materijal od kojeg je kućište napravljeno najčešće je PBT (polibutelin tetrafilat) koji može biti, ovisno o zahtjevima, ojačan staklenim vlaknima od 0-30%. Kućišta se proizvode u kalupima tehnologijom injekcijskog prešanje.





**Slika 9. Dijelovi kućišta konektora**

Kućišta može biti monolitno ili sastavljeno od više dijelova kao što je prikazano na slici 9. Najčešće se kućišta opremaju engl. *secondary lockingom*, (engl. *terminal position assurance feature, connector position assurance feature*). Jedan od dijela koji je radovito sastavni dio unutrašnje geometrije kućišta je engl. *locking lance* prikazan na slici 10. u poprečnom presjeku kućišta.[10]



**Slika 10. Engl. Lances su označeni crvenom bojom[10]**

## 4.2 Terminali

Prvi terminali, nakon Faston terminala, bili su Timer terminali koji su se koristili za funkciju automatskog prekidača kod perilica rublja. Nakon perilica rublja, šezdesetih godina prošlog stoljeća terminali su se počeli koristiti u autoindustriji. Porastom temperaturnih i vibracijskih zahtjeva kontaktni dio terminala ojačan je dodatkom od nehrđajućeg čelika koji doprinosi krutosti spoja i ujedno služi kao zaštita od vanjskih utjecaja. Zbog povećanih temperaturnih i vibracijskih

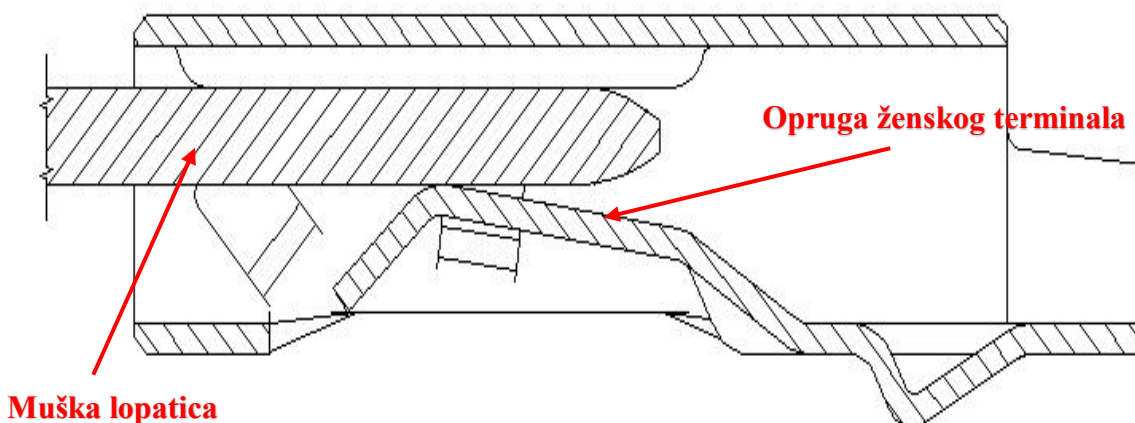
zahtjeva, zaštitni oklop od nehrđajućeg čelika je dodan oko kontakta . Glavni razlog bila je potpora bakrenom kontaktu jer u to vrijeme bakrene legure nisu bile još dovoljno istražene i razvijene.[10]

Devedesetih godina na tržištu pojavila se CuNiSi legura boljih značajki vezanih uz prijenos električne energije i signala. Slika 11. prikazuje terminal od CuNiSi legure, poznate kao Stol76.



**Slika 11. Prikaz terminala od CuNiSi legure[10]**

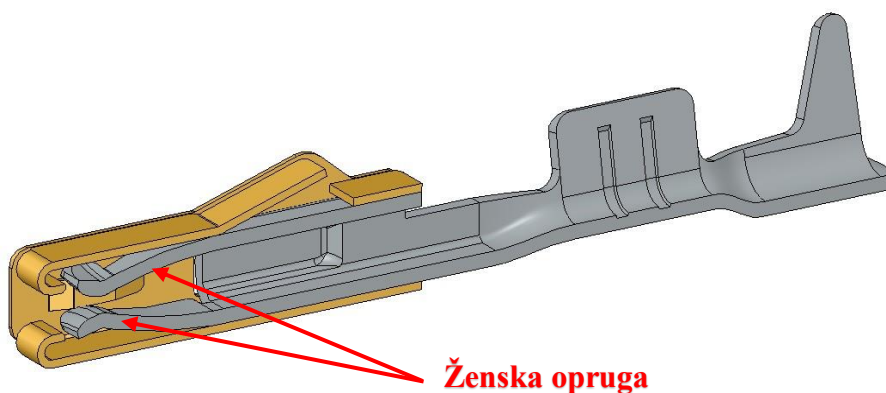
Legura CuNiSi ima puno bolja mehanička i električka svojstva. S novom legurom se smanjila potreba za zaštitom od nehrđajućeg čelika za standardnu primjenu, ali ne i za ekstremne vibracijske i temperaturne uvjete. CuNiSi legura je, zasad, najbolje rješenje za materijal terminala u autoindustriji.



Slika 12. Presjek spoja muškog i ženskog terminala[10]

Normalna sila (kontaktna sila) u konstrukciji terminala definirana je kao opterećenje koje opruga u ženskom terminalu obavlja na mjestu muške lopatice.

Na slici 13. prikazana je dvostruka opruga u ženskom terminalu, koja ostvaruje kontakt s muškom dodirnom površinom. Na mjestu dodira kontaktnog para razvija se točkasti ili linijski trag. Opruga može biti jedna, dvije ili četiri, a kontaktnih točaka i preko nekoliko. Opruga i štiti mogu biti izrađeni u jednom komadu ili u dva komada kako je prikazano na slici.



Slika 13 3D model ženskog terminala iz dva dijela[10]

Kod muških terminala, geometrija je značajno pojednostavljena pa se on općenito sastoji samo iz jednog komada. Slika 14. prikazuje rastvoreni ženski terminal od bakrene legure, konstruiran iz jednog komada, proizvedenog tehnologijom štancanja.



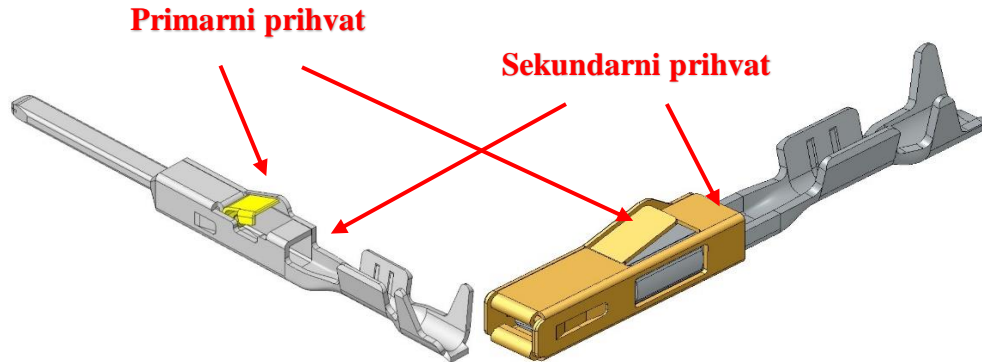
Slika 14. Otvoreni ženski terminal iz jednog dijela

U tablici 1. prikazane su prednosti i mane konstrukcije ženskog terminala u jednom ili dva komada.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci konstrukcije terminala iz jednog ili dva komada[10]

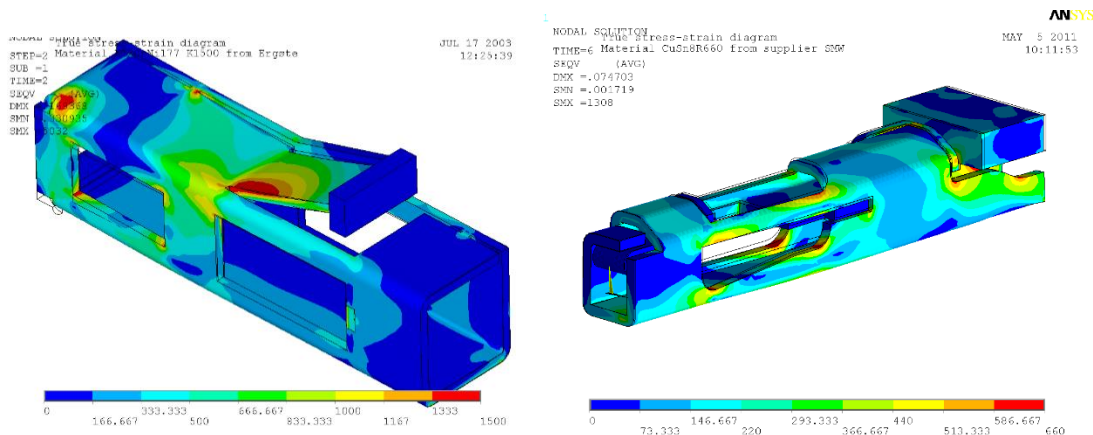
	Prednosti	Nedostaci
Konstrukcija u jednom komadu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jedan alat (manji troškovi)</li> <li>• Direktni električni kontakt muškog i ženskog terminala (manji ukupni kontaktni otpor)</li> <li>• Manje vanjske dimenzije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompliciranija proizvodnja (izrada)</li> </ul>
Konstrukcija u dva komadu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jednostavnija proizvodnja (izrada)</li> <li>• Ovisi o lance-u terminala, moguće je ostvariti veće sile kidanja iz kučišta (konektora)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dva alata (veći troškovi)</li> <li>• Veće vanjske dimenzije</li> </ul>

Budući da kontakt mora biti osiguran u potpunosti, teži se spoju s visokim postotkom sigurnosti. Zbog toga je terminal u konektoru osiguran na dva načina, primarnim i sekundarnim prihvatom (engl. *primary i sedondary lock*).[12]



Slika 15. Prikaz primarnog i skundarnog prihvata[10]

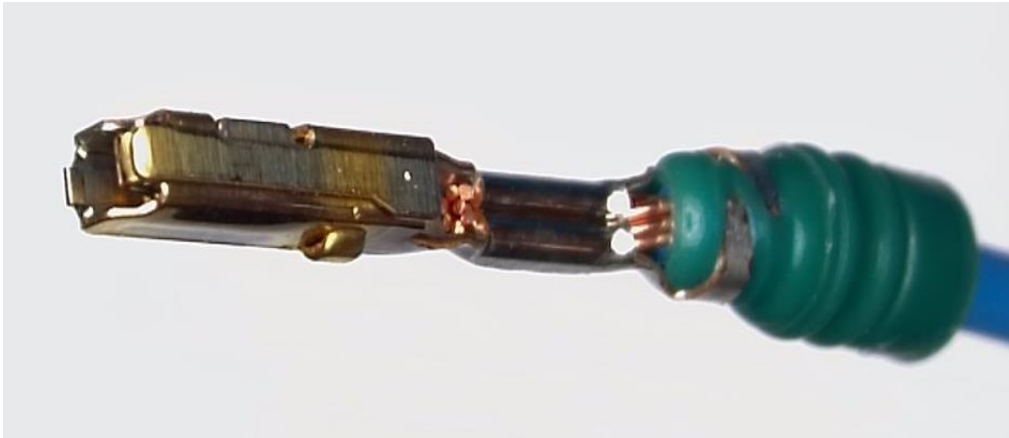
Kod spajanja, primarni priхват osigurava pozicioniranje terminala u konektoru u spoju sa engl. *locking lanceom*, dok sekundarni priхват ima zadaću dodatno štiti terminal od neželjenog pomaka uvjetovanog vanjskim podražajima. To se odnosi na opterećenja koja su moguća djelovanjem na žice prilikom montiranja ili popravka.



Slika 16. Simulacija koncentracije naprezanja u terminalu[10]

Nanašanjem prevlaka na kontaktno područje, tribološka svojstva se mijenjaju. Stoga se na terminale od brakrenih legura počele nanose razne prevlake od kositra, srebra i zlata, koje imaju veću otpornost na abraziju, adheziju ili umor materijala.[12]

Na slikama 17. i 18. su prikazani muški i ženski terminal sa zlatnom prevlakom.

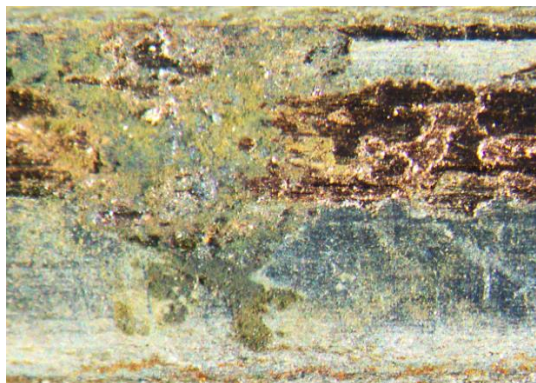


**Slika 17. Ženski terminal sa zlatnom prevlakom**



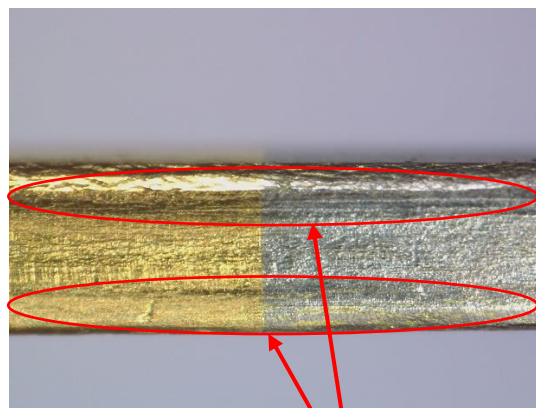
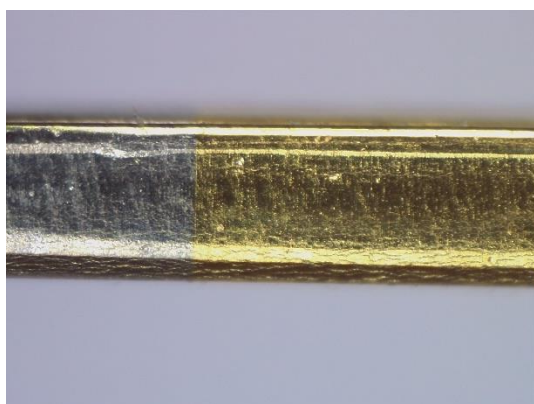
**Slika 18. Muški terminal sa zlatnom prevlakom**

Kod frettinga su amplituda kretanja i faktor trošenja obrnuto proporcionalni. Pri manjim amplitudama kretanja dolazi do povećanja trošenja koja nakon određenog broja ciklusa pomaka terminala, dovodi do dotrajalosti i izbacivanja tribopara iz funkcije je došlo do trajnog oštećenja. Na slici 19. prikazana je površina muškog terminala nakon 100 000 ciklusa kliznog gibanja (amplitude pomaka) od 50  $\mu\text{m}$ .



**Slika 19. Oštećena kontaktna površina uslijed djelovanja fretting korozije[12]**

Zbog djelovanja sile i malih amplituda kliznog gibanja već nakon nekoliko spajanja i odspajanja pojavljuju se tragovi adhezijskog i abrazijskog trošenja.



**Slika 20. Prije i poslije dvadeset spajanja i odspajanja**

**Tragovi opruge nakon  
dvadeset odspajanja**

## 5. FRETTING KOROZIJA

Izjedanje (enlg. *fretting*) proces je trošenja koji nastaje između dviju, prividno čvrsto spojenih, površina zbog relativnog gibanja s mikrometarskim amplitudama. To je osobito izraženo kod površina (npr. utori, spojke) gdje se gibanje prenosi s jednog dijela na drugi preko kontaktne površine. Takvi se primjeri trošenja pojavljuju u strojevima, spojkama, izmjenjivačima topline, oprugama, valjkastim i kuglastim ležajevima, kao i električnim kontaktima.[13]

Pojava fretting korozije nastaje pri klizanju dvije dodirne površine gdje dolazi do trošenja i pucanja površine. Kod frettinga, amplituda pomaka je vrlo mala, od jedan pa do par stotina mikrometara. Pojava je okarakterizirana ostacima čestica prevlake ili površine. Tragovi su često finih rubova i površine, ali to ovisi i o samom kontaktu. Zbog frettinga može doći do havarija iznimo velikih razmjera.

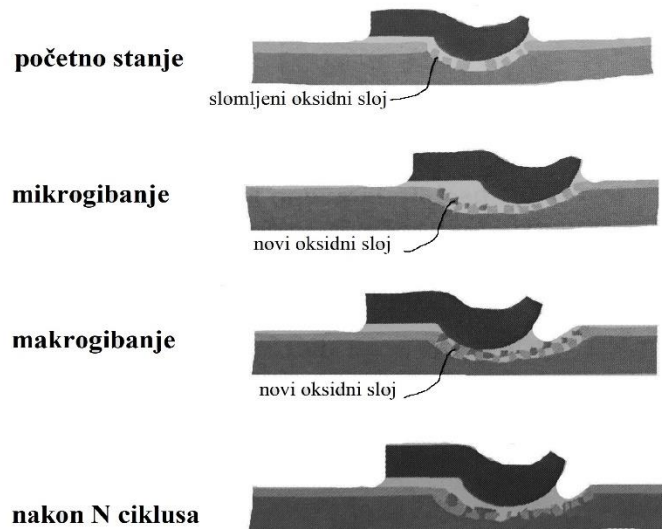
Proces frettinga može se podijeliti u sljedeće faze[13]:

1. vibracija i klizanje,
2. adhezijsko trošenje i nastanak (pojava) čestica trošenja,
3. oksidacija čestica trošenja, koje ostaju zarobljene u malim kontaktnim površinama,
4. abrazijsko djelovanje čestica trošenja, povećanje faktora trošenja i nastanak novih čestica trošenja,
5. rezultat je značajna lokalna šteta i mogućnost lokalnog zastoja.

Za kontakte presvučene plemenitim metalima, korozija ne može početi dok se materijal ispod plemenitog metala (srebra i zlata) ne potroši. Neplemeniti metali, poput kositra, uvijek su podložniji trošenju i stvarnju produkata, više nego plemeniti usred mikrokretanja.

Korozija pri izjedanju (tribokorozija) pojavljuje se kao oksidni sloj oko kontaktne površine (npr. karakteristične crne boje kada se radi o bakru). Izjedanje urokuje i oštećenja poput pojave rupičanja (enlg. *pittinga*), mikrozatvaranja i umora materijala.





**Slika 21. Prikaz djelovanja fretting korozije na tankom kontaktnom području[13]**

Na slici 21. shematski je prikazano djelovanje tribokorozije na kontaktnom području. Oksidni sloj nastao na površini kontaktnog područja puca pri kontaktnom gibanju omogućavajući stvaranje novog oksidnog sloja na „otvorenim“ područjima. Ciklus stvaranja i pucanja oksidnog sloja ponavlja se N puta uzrokujući izjedanje površine materijala.[13]

## 5.1 Sprječavanje fretting korozije

Elektronički produkti koji se izlažu vibracijama, temperaturnim šokovima ili elektrodinamičkim naprezanjima moraju imati primjerenu zaštitu od pojave frettinga. U nastavku su navedeni neki od mehanizama sprječavanja frettinga.[14]

1. Konstrukcija proizvoda nebi smijela biti podložna trenju i malim amplitudnim pomacima. Neovisno o konstrukciji (izvedbi), normalnoj sili, kontaktnoj geometriji, osnovnom materijalu ili prevlaci, pojedini kontakti su više ili manje podložni frettingu. Osjetljivost kontakta ovisit će o eksploatacijskim uvjetima.
2. Primjena maziva smanjuje trenje i otežava trošenje. Ono štiti metal od oksidacije tako da otežava dovod kisika na površinu. Učinkovitost lubrikanta da zaštiti površinu ovisi o njegovoj viskoznosti, sastavu, održivosti i potrošnji na površini. Iz tog razloga učinkovitost podmazivanja je ograničena i nije održivo rješenje.
3. Osigurati kontaktu dovoljnu masivnost kako bi se mogla postići sila određene jakosti i hrapavost koja bi osigurala čvrsti spoj.
4. Na osnovni materijal nanjeti prevlaku plemenitog metala kao npr. legure zlata ili platine koje bi mogle pomoći u nekim primjenama.
5. Dopustiti da kontakti „lebde zajedno“, tako da kada se dogodi kretanje ono bude prenešeno na kontakt kao cjelinu, a ne na samo jedan segment tog spoja. Drugim riječima, segmenti kontakta se kreću u fazama i tako eliminiraju međusobno trošenje.
6. Vrlo mala normalna sila može osigurati kontaktu gibanje bez trošenja površine. Međutim, čak i iznimno mali dodatak normalne sile u kontakt može dovesti do gubitaka drugog tipa. Stoga je ova metoda „balansirajućeg tipa“ gdje inače veća normalna sila potpomaže trošenju, dok manja normalna sila ruši performanse kontakta.

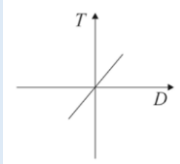
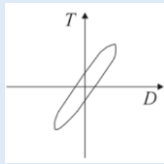
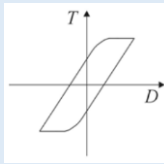
Najbolja i najdjelotvornija metoda sprječavanja frettinga je izbjegavanje relativnog gibanja u dodirnim površinama koje se ostvaruje posebnom konstrukcijom kontakta.

## 5.2 Režimi fretting korozije

Kada na spoj djeluje sila zbog dovoda topline, vibracija ili drugih pobuda, normalna kontaktna sila mora biti dovoljna da u kombinaciji s trenjem spriječi pomicanje kontaktnog spoja, a time i njegovo trošenje. Konstrukcija muške i ženske strane konektora mora biti usklađena na način da se spriječi pojava frettinga. Ali na primjer, muška komponenta spoja kao što je ranije navedeno, može „lebdjeti“ u ženskoj komponenti i time se stvara zračnost između kontakta koja kasnije uvjetuje trošenje. U literaturi se često pronalazi termin „lebdjenje“ što bi se moglo usporediti s labavim dosjedom. Kontaktne opruge koje bi djelovale na kontakt kao komponente normalne sile u dodiru, mogu se konstruirati tako da budu vrlo fleksibilne.[14]

U tablici 2. prikazana su i objašnjena tri režima nastajanja fretting korozije. Prvi je engl. *stick* režim gdje su površine dovoljno hrapave da potpuno eliminiraju fretting. Tangencijalna sila je proporcionalna pomaku. Drugi režim je mješani tzv. engl. *stick-slip* režim kod kojeg dolazi do laganog proklizavanja površina tribopara i pojava prvih pukotina. Zadnji režim je engl. *gross stick* gdje je među kontaktnim površinama veća količina krhotina nastalih abrazivnim trošenjem i umorom površina.[15]

Tablica 2. Režimi fretting korozije[15]

	„stick“ režim	„stick-slip“ režim	„gross stick“ režim
<b>Odnos tangencijalne sile T i pomaka D</b>			
<b>Topografija kontaktnog područja</b>	Višestruki kontakt zbog hrapavosti površina	Hrapavost prestaje utjecati na spoj, dolazi do prvih proklizavanja	Klizni trošenje i nastup fretting korozije
<b>Posljedice</b>	Male ili nikakve količine pukotina ili krhotina	Prve pojave pukotina i krhotina	Ekstremna pojava pukotina i krhotina

### 5.3 Sastavni mehanizmi frettinga

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela zbog dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili čestica.[17]

Premda postoji veliki broj primjera trošenja, tribolozi su suglasni samo sa četiri osnovna mehanizma trošenja[18]:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija.

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trpšene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina.[13]

*Abrazija* je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja.[13]

*Adhezijsko trošenje ili zavarivanje* specifično je trošenje u kojemu dolazi do naljepljivanja jedne klizne plohe na drugu pri određenom gibanju. Zbog gibanja dolazi do kidanja sitnih čestica koje se kasnije nalijepe na jednu kliznu ravninu. Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno “nalijepljene” odnosno navarene na drugu kliznu površinu.[13]

*Umor površine* je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Jedinični događaj možemo podijeliti u tri faze:

- Stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine,
- Napredovanje mikropukotine,
- Ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka.

*Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje* je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Važno je da se čestice trošenja kod tribokorozije stvaraju unutar vanjskog površinskog sloja. Budući da se radi o vrlo tankim slojevima, tribokorozija je redovito slabo intenzivan mehanizam trošenja. Premda se tribokorozija ubraja u osnovne mehanizme trošenja to je ipak kombinacija između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od prethodno opisanih osnovnih mehanizama trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine.[13]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu korišten je sustav za ispitivanje fretting korozije kontakata razvijenog u firmi Yazaki Europe Limtied, Glavna podružnica Zagreb, Slavonska avenija 26/6, dalje u tekstu YEL-Z. Na navedenom sustavu ispitani su istovrsni terminalski sustavi 1,2 mm prevučenih različitim prevlakama – zlato, srebro i kositar, na osnovnom materijalu od bakrene legure. Terminali su namjenjeni za niske napone i mala opterećenja. U radu su provedena sljedeća ispitivanja:

- Konstantno praćenje kontaktnog otpora
- Mjerenje sile spajanja
- Mjerenje sile odspajanja

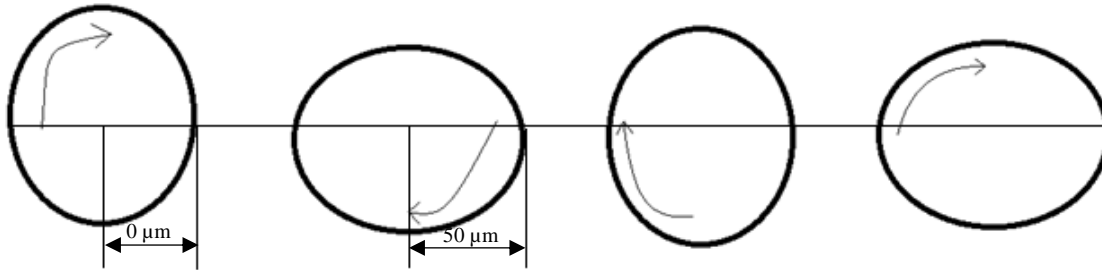
Ispitivanja su provedena prema [26] u kojoj je definirano amplitudno gibanje (pomak) od  $50\mu\text{m}$ , frekvencijom od  $f=1$  Hz u trajanju 100 000 ciklusa. Ispitini uzorci su analizirani u početnom stanju te nakon 5 000, 50 000 i 100 000 ciklusa. Za svaku prevlaku ispitano je 12 uzoraka. Eksperiment je proveden tako da su se četiri uzorka za svaku prevlaku odvajala nakon 5 000 ciklusa pa četiri uzorka nakon 50 000 i četiri uzorka nakon 100 000 ciklusa. Na svakom su se uzorku nakon provedenog ciklusa ispitivanja izmjerile sila spajanja i odspajanja te se analizirala kontaktna površina. Tijekom ispitivanja konstantno se mjerio kontaktni otpor četverožičanom metodom uz struju od 10 mA, uzorkovanjem u frekvenciji od 4 Hz ili 250 ms.



Slika 22. Stanica za fretting ispitivanje

## 6.1 Uređaj za provođenje fretting ispitivanja

Elektromotor pokreće ekscentričnu tarenicu koja ostvaruje linearni pomak sinusoidalnog oblika, amplitude  $50\mu\text{m}$ . Upravljačkim engl. *software-om* se kontroliraju i prate zadani parametri ispitivanja.



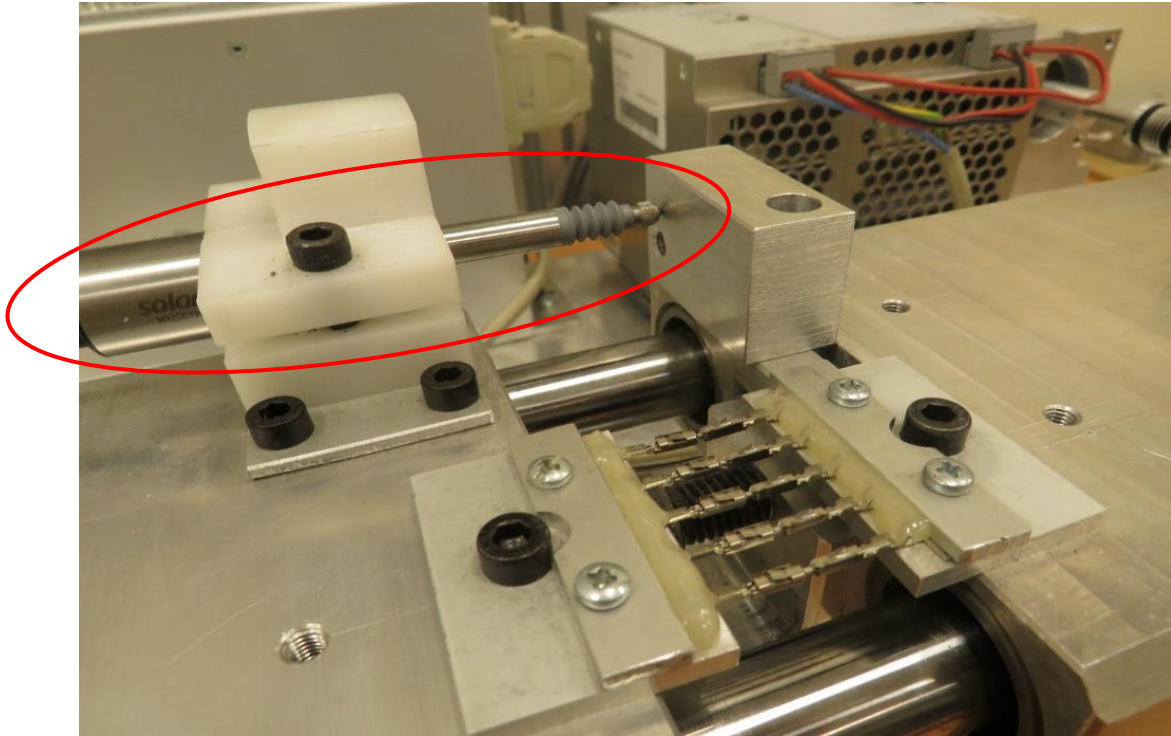
Slika 23. Shematski prikaz puta ekscentra

Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje, složen je elektromehanički stroj. Svaka komponenta, u ovom slučaju uređaj za kontrolu rada motora, električni motor, senzor sile i senzor pomaka, ima svoje posebno napajanje i povezana je s računalom.

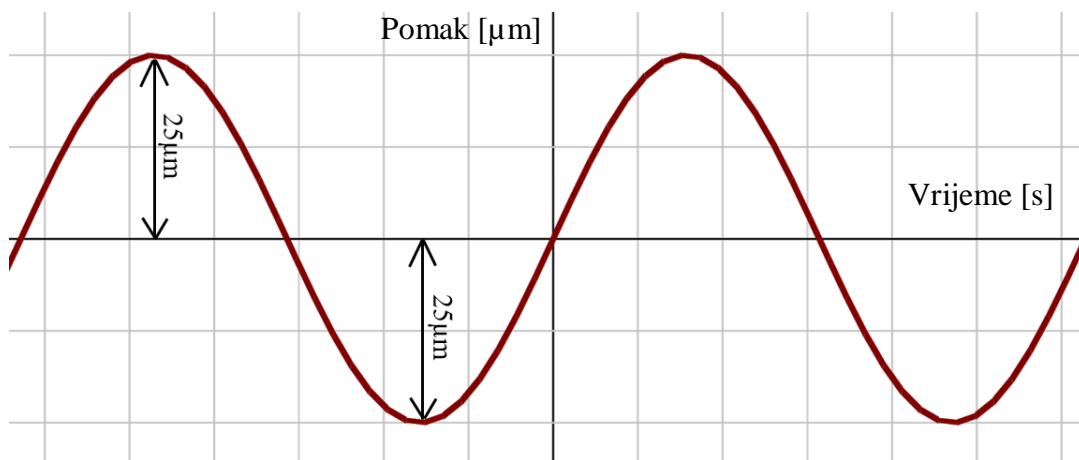
Komponente koje omogućuju provođenje ispitivanja su redom :

1. Uređaj za kontrolu rada motora
2. Električni motor
3. Napajanje 230VAC-48VDC-5A
4. Napajanje 230VAC-24VDC-5A
5. Senzor sile
6. Senzor pomaka
7. Napajanje senzora sile
8. Napajanje senzora pomaka
9. Račnalo

Specifikacija definira amplitudno gibanje (pomak) od  $50\mu\text{m}$ . Mjerač amplitudnog gibanja (pomaka) smješten je na fiksnom dijelu uređaja, a preko ticala je u kontaktu sa pomičnim dijelom uređaja te tako prati pomak tijekom svakog radnog ciklusa.



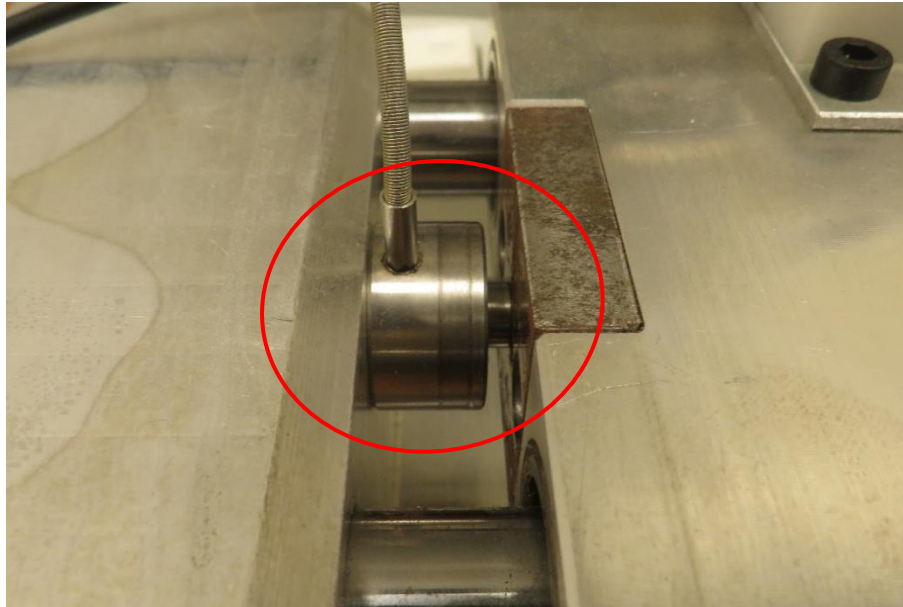
Slika 24. Senzor pomaka



Slika 25. Prikaz idealnog pomaka prema specifikaciji

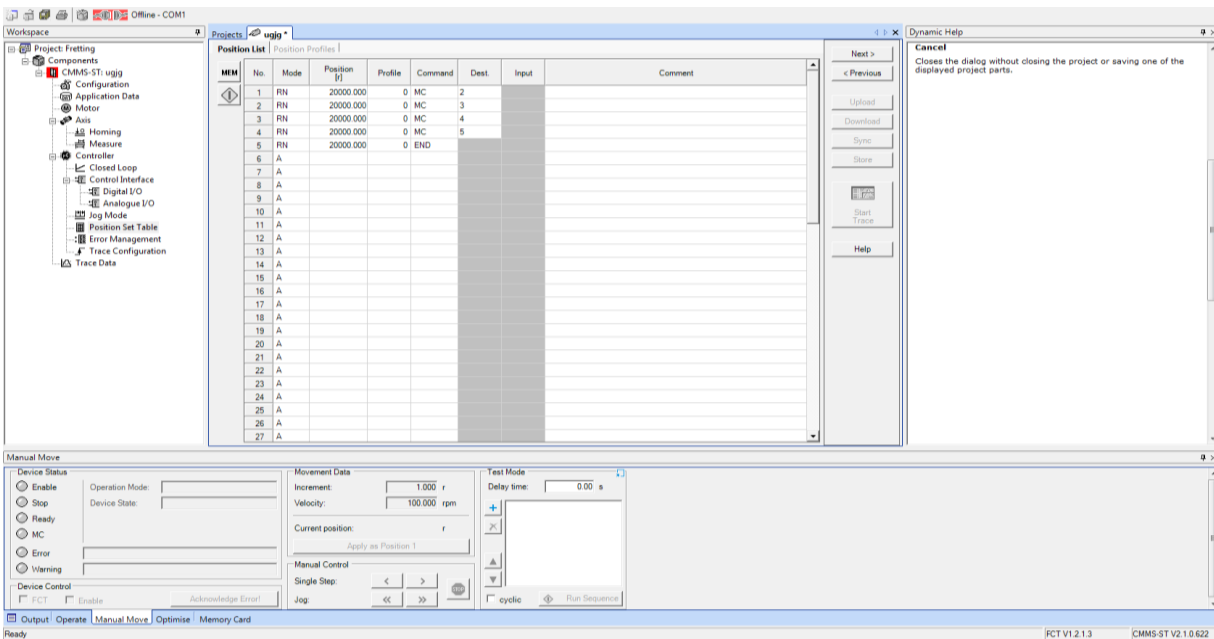
Preko senzora sile (slika 26.) omogućuje se praćenje histereze sile čijom se nepravilnošću može otkriti eventualni početak fretting korozije.





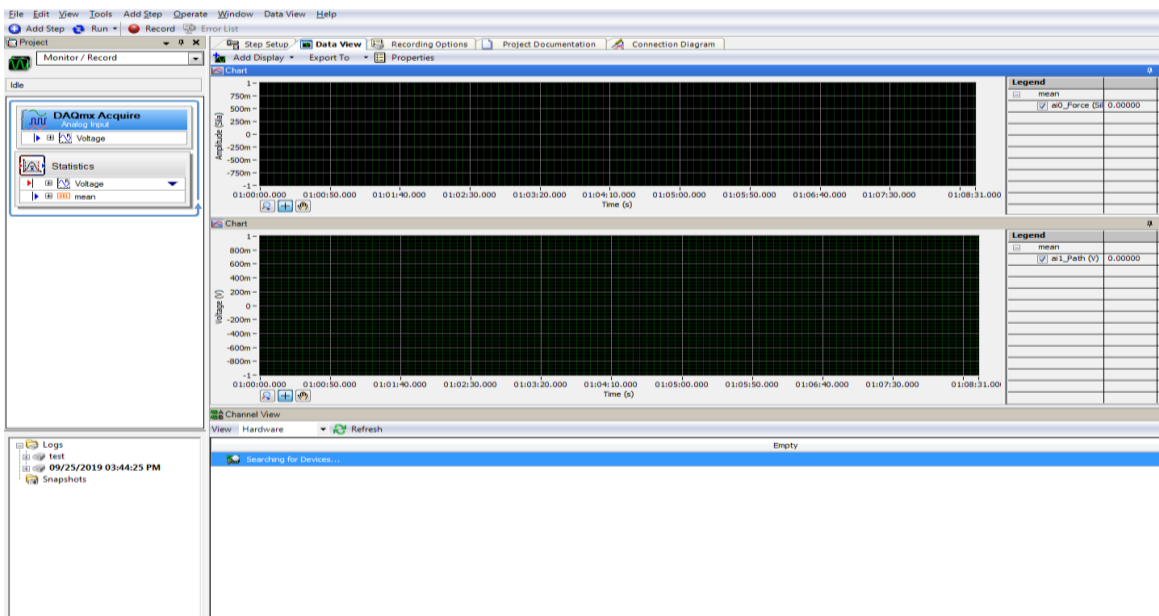
Slika 26. Senzor sile

Na slici 27. prikazano je sučelje programskog alata [19] koji upravlja sklopom uređaja za fretting ispitivanje.



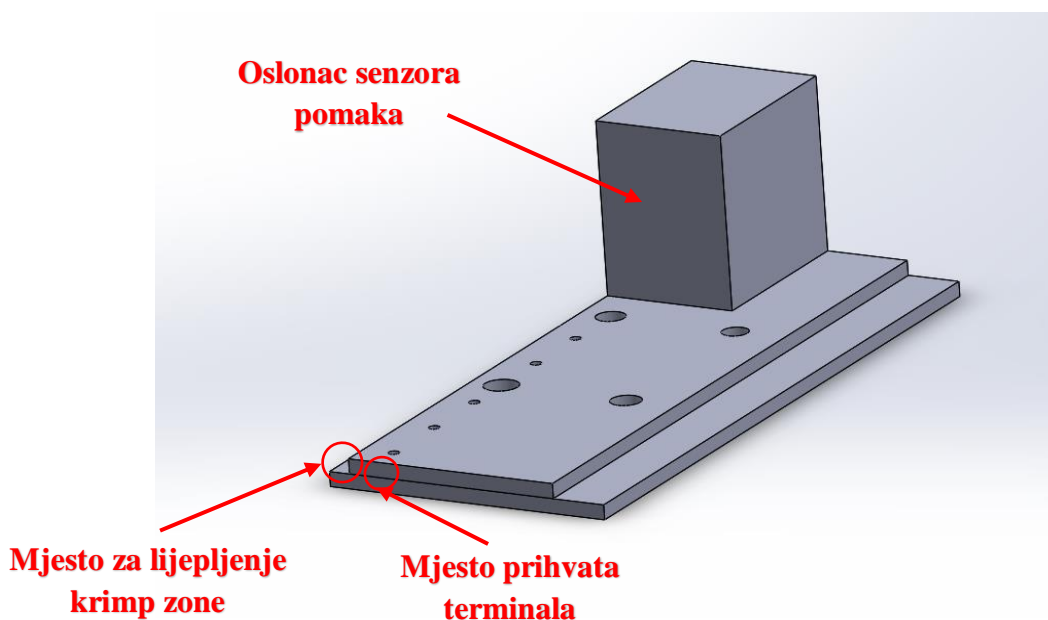
Slika 27. Sučelje programskog alata

Na slici 28. prikazano je sučelje programskog alata koji omogućuje praćenje senzora sile i senzora pomaka. Dobiveni podaci ispitivanja obrađeni su u Microsoft Excel zbog jednostavnije nalize.



Slika 28. Sučelje programskog alata za praćenje sile i pomaka

Terminali imaju specifičnu geometriju pa je u Solidworks-u konstruiran 3D model prihвата koji će osiguravati čvrstoću i krutost kontakta. Uzorci se učvršćuju u polimernim držačima (koji su i izolator) koji se nalaze na rubovima pomičnog i stacionarnog dijela naprave kako bi se mogao mjeriti kontaktni otpor.



Slika 29. 3D model prihвата terminala na jednoj strani

## 6.2 Materijali za ispitivanje

Kod odabira materijala za tribološke primjene potrebno je identificirati prevladavajući mehanizam trošenja s ciljem izbora materijala koji zadovoljavaju sve operativne uvjete. Ponekad zahtjevi nove konstrukcije zahtjevaju od materijala i neka proturječna svojstva kao što su visoka tvrdoća s visokom žilavosti, itd.[21]

Svojstva materijala koje je potrebno kontrolirati s ciljem odgovarajućeg odabira i primjene materijala u tribološkim uvjetima unutar operativnih zahtjeva su čvrstoća, tvrdoća, istezljivost i žilavost. Definiranje svojstava materijala za specifične potrebe i ponekad ekstremne uvjete, kao što su visoka temperatura, velika brzina, teško opterećenje moguće je promjenom strukture (npr. umreživanjem i sl.) ili dodacima (npr. nanopunila), uz poboljšanje međudjelovanja na međupovršini i dr.[21]

U ovom ispitivanju, svi ispitni uzorci će biti od istog osnovnog materijala, CuNiSi legure (komercijalni naziv STOL® 76). Legura se primjenjuje u električnom ožičenju u vozilima te se zbog boljih mehaničkih, triboloških i električnih svojstava te prevlači zlatom (Au), srebrom (Ag) i kositrom (Sn). Prevlake su debljine – zlato (0,8  $\mu\text{m}$  -1,3  $\mu\text{m}$ ), srebro (1  $\mu\text{m}$  -2  $\mu\text{m}$ ) i kositar (1  $\mu\text{m}$  -3  $\mu\text{m}$ ).

Legura CuNiSi može se očvrnuti hladnim oblikovanjem i precipitacijskim izlučivanjem NiSi faza tijekom toplinske obrade. Ima izvrsnu žilavost, svojstva toplog i hladnog oblikovanja, visoku čvrstoću i dobru otpornost na koroziju. Zbog izlučivanja precipitata NiSi, legura zadržava svoja svojstva sve do 150°C. Električna i toplinska vodljivost je dobra kao i svojstvo zavarivanja i lemljenja.[23]

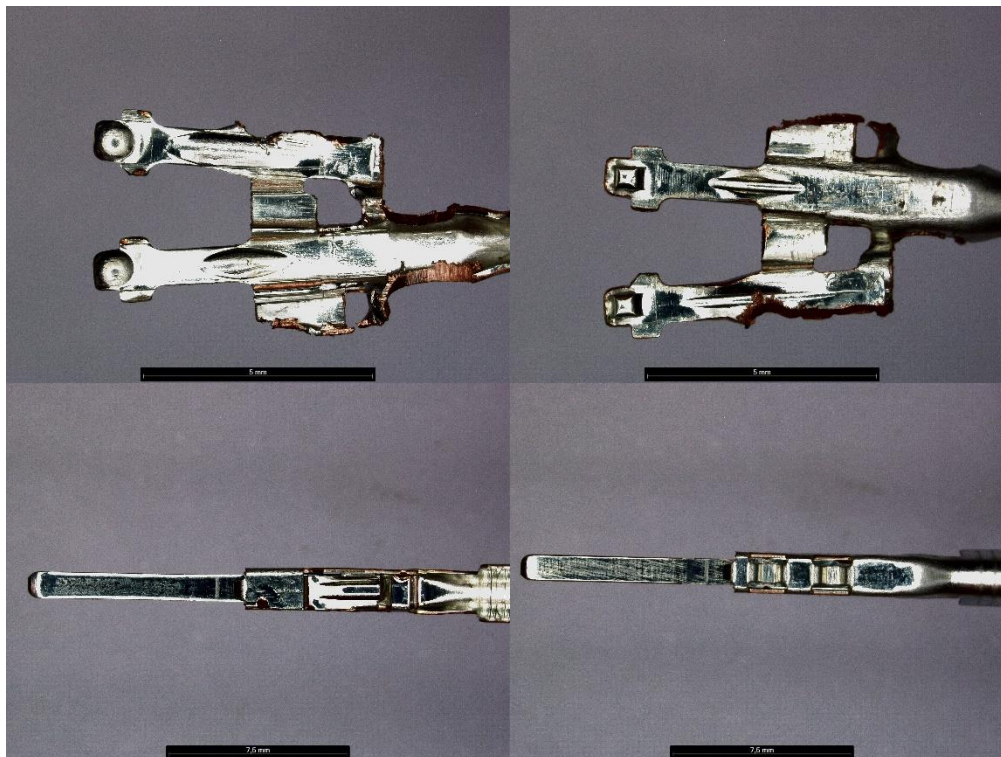
**Tablica 3. Kemijski sastav CuNiSi legure [23]**

Kemijski sastav	
Element	Maseni udio
Bakar	Ostalo
Nikal	0,8-1,8%
Silicij	0,15-0,35%
Ostalo	$\leq 0,8\%$

### 6.2.1 Kositar

Otporan je prema atmosferskoj koroziji, čak otporniji od cinka, kamdija i bakra. Ne korodira ni u slatkoj ni u slanoj vodi. Ako je visoke čistoće, u morskoj vodi može doći do pittinga. Otporan je prema destiliranoj vodi pa se primjenjuje za izradu destilacijskih uređaja. Visok mu je prenapon vodika pa sporo korodira u kiselinama bez oksidativnih svojstava. U vojnoj se tehnici primjenjuje za izradu kapisla, detonatora, oblaganje željeznih rezervoara za skladištenje naftnih derivata itd. Za izradu kapisla primjenjuje se u obliku folija, jedino njega ne nagrizaju komponente inicijalnog punjenja i nakon dugog stajanja. Kao katoda prema željezu predmeti s kositrenim prevlakama podnose jaku lokalnu koroziju ako dođe do oštećenja prevlake ili poroznosti. Otporan je prema organskim kiselinama, nije otrovan, pa se upotrebljava za izradu ambalaže živežnih namirnica.[22]

Kositar korodira u dušičnoj kiselini i u slabo lužnatim otopinama, a kositrene soli (npr.  $\text{SnCl}_2$ ) djeluju inhibitorno na njegovu koroziju. Pri niskim temperaturama kositar podliježe razaranju koje je nazvano kositrenom kugom. Na temperaturama iznad  $-13^\circ\text{C}$  kositar je stabilan u svojoj bijeloj kristalnoj modifikaciji. Ispod te temperature stabilna je siva kristalna modifikacija, a prelazi iz bijele u sivu praćen je povećanjem volumena i tada se kositar raspada u prah. Sav kositar neprolazi u praškastu formu ispod  $-13^\circ\text{C}$ , ali padom temperature taj je prijelaz vjerojatniji, tako da pri  $-50^\circ\text{C}$  doseže najveću vjerojatnost prelaska. Do prijelaza u sivu modifikaciju dolazi naročito kositar koji se nalazi u blizini takve modifikacije jer kristali ove modifikacije služe kao novi centri kristalizacije pa se ovo razaranje kositra širi u obliku zaraze. Vojna oprema koja se nalazi zimi uskladištena na hladnim mjestima podliježe kositrenoj kugi. Da se takvo razaranje spriječi, kositar se legira s kadmijem i olovom, a s bizmutom i antimonom te je ta pojava potpuno spriječena. Antimon kao legirajuća komponenta smanjuje sklonost lokalnoj koroziji.[22]



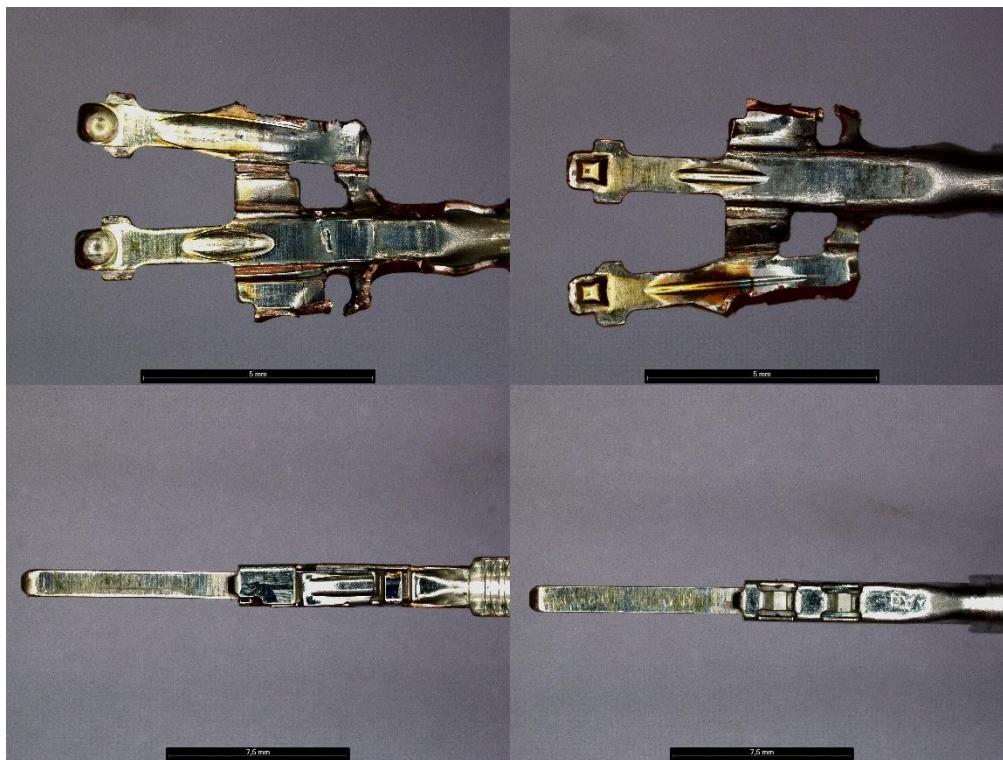
**Slika 30 Prikaz muškog i ženskog terminala s kositrenom prevlakom**

### 6.2.2 Srebro

Pripada skupini plemenitih metala. Veoma je otporan prema koroziji. U nekim otopinama (HCl) stvara se oksidni film koji ga štiti od daljnje korozije, ali u atmosferskoj koroziji zaštita zbog oksidnog filma nije toliko značajna kao npr. kod kroma ili aluminija. Kao mehanički slab materijal primjenjuje se za platiniranje čelika: korozijska svojstva daje srebro, a mehanička čelik. Otporan je prema toplim i hladnim kiselinama. Aeracija (dovođenje zraka) ubrzava koroziju. Naglo korodira u nitratnoj i toploj sulfatnoj kiselini. Otporan je jedino prema lužinama neovisno o temperaturi, a korodira jedino u amonijevom hidroksidu. U natrijevim i kalijevim cijanidnim otopinama korodira uz razvijanje kisika koji dalje pospešuje koroziju. Otporan je na urin pa se upotrebljava za izradu aparata za ispiranje mokraćnih putova.[22]

Ako u atmosferi ima sulfida, srebro površinski korodira. Nastali  $\text{Ag}_2\text{S}$  smeđe je ili crne boje, a s vremenom smanjuje koroziju. Donedavna se srebro primjenjivalo za ukrasne predmete te pribor za jelo. U novije vrijeme sve se više primjenjuje u industriji, elektronici, a mnoge zemlje primjenjuju ga za izradu kovanog novca.[22]

Dodatkom kadmija, cinka, kositra i antimona smanjuje se sulfidna korozija. Živa ga vrlo brzo razara. Potpuno je inertan prema prirodnim vodama i otopinama soli.

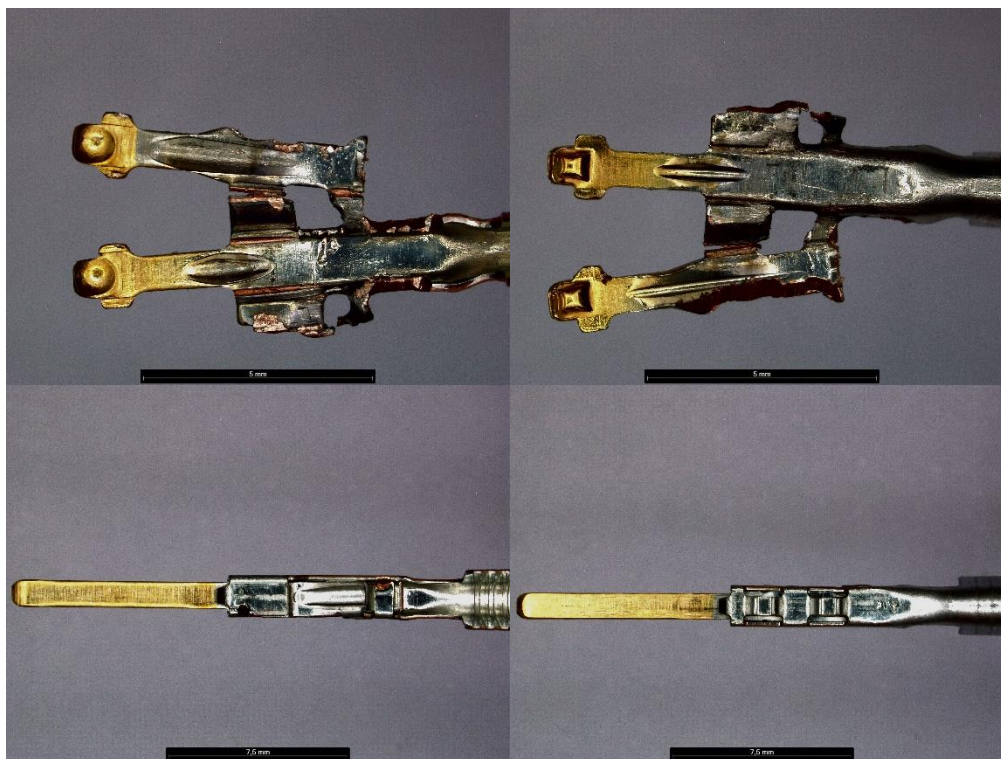


**Slika 31 Prikaz muškog i ženskog terminala sa srebrnom prevlakom**

### 6.2.3 Zlato

Zlato je korozijski izvanredno otporno zbog slabog kemijskog afiniteta prema većini metala. U elektrolizi se anoda od zlata pasivizira. Zlato je otporno prema kiselinama, luližinama i solima. Otapa ga jedino zlatotopka (carska vodica, smjesa  $\text{HNO}_3$  i  $\text{HCl}$  u omjeru 1:3) a nagrizaju ga kloridi, bromidi, jodidi i cijanidi. U kontaktu sa živom veoma se brzo amalgamira.

Zbog mekoće i niskog tališta rijetko se upotrebljava kao čisti metal, jedino u kemijskoj industriji. Tanke prevlake zlata su uglavnom poroznije nego kod drugih metala. Nekada se čisti metal upotrebljavao za nakit, ukrasne predmete i novac; za vanjsku i unutrašnju dekoraciju krovova statua, vrata i stropova, obzirom da se može izvlačiti u vrlo malim debljinama. U kemijskoj industriji zamjenjuje platinu, legiran s njom ili paladijem. Najbolje su ternarne legure. Legiran sa srebrom ima veoma slabe mehaničke osobine pa se koristi kao nakit.



Slika 32. Prikaz muškog i ženskog terminala sa srebrnom prevlakom

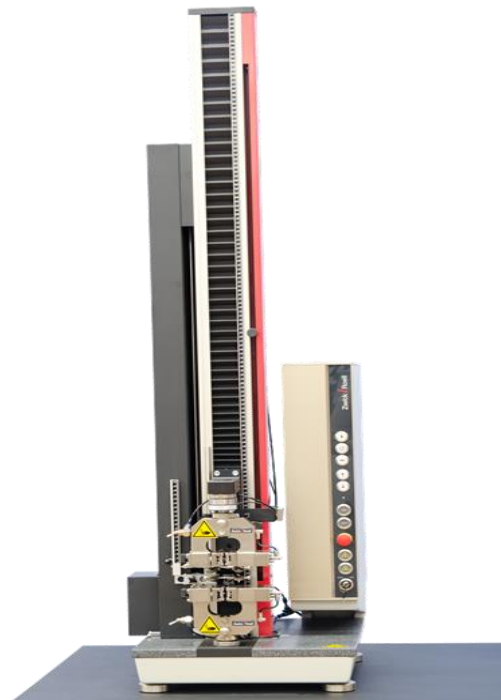
### 6.3 Eksperimentalna ispitivanja

Ispitivanja obuhvaćaju područja električnih, mehaničkih i triboloških ispitivanja. Za svaku prevlaku ispitana su četiri uzorka po seriji. Serija je definirana brojem ciklusa pomaka terminala.

#### 6.3.1 Sila spajanja/odspajanja

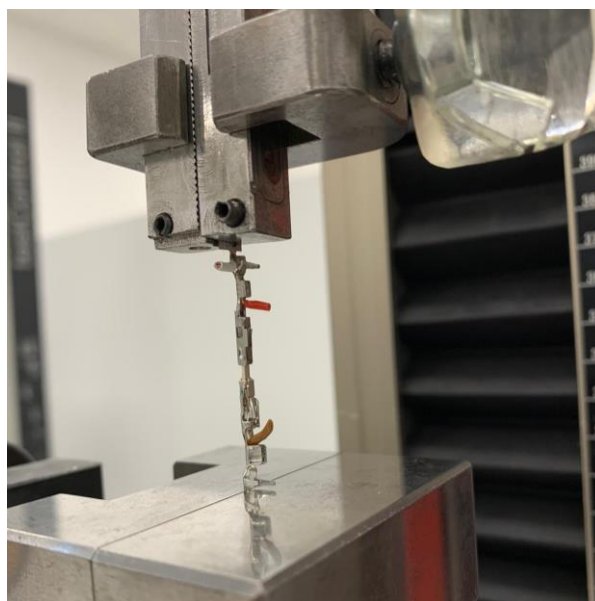
Statičko vlačno ispitivanje jedno je od osnovnih ispitivanja za određivanje mehaničkih svojstava metalni i nemetalnih materijala. Ispitivanje se odvija primjenom jednoosnog vlačnog naprezanja uz relativno male brzine (do 50 mm/min) u YEL-Z. Kidalica je opremljena senzorom maksimalne vrijednosti ispitivanja od 500 N. Parametri ispitivanja metalnih materijala regulirani su normom HRN EN ISO 6892-1:2016 za ispitivanja pri sobnoj temperaturi.[24]

Sila spajanja i odspajanja važan je i mjerodavan podatak o stanju prevlake i samog terminala nakon ispitivanja. Sve tri prevlake su različite tvrdoće (zlato 200HB[27], srebro 220HB[27] i kositar 60HB[27]) te zbog toga imaju različite sile spajanja i odspajanja.



**Slika 33. Zwick/Roell Z0.5 [25]**

Na slici 34. prikazana je priprema i način izvođenja ispitivanja na kidalici.



**Slika 34. Priprema za ispitivanje sile spajana i odspajanja na kidalici**

Ispitivanje sile spajanja i odspajanja provedeno je u svrhu praćenja promjena na opruzi u ženskom terminalu. Promatrani ženski terminal ima dvije opruge. U tablici 4., 5. i 6. prikazani su dijagrami rezultata nakon 0 (početno stanje), 5 000, 50 000 i 100 000 ciklusa, sile spajanja i odspajanja,

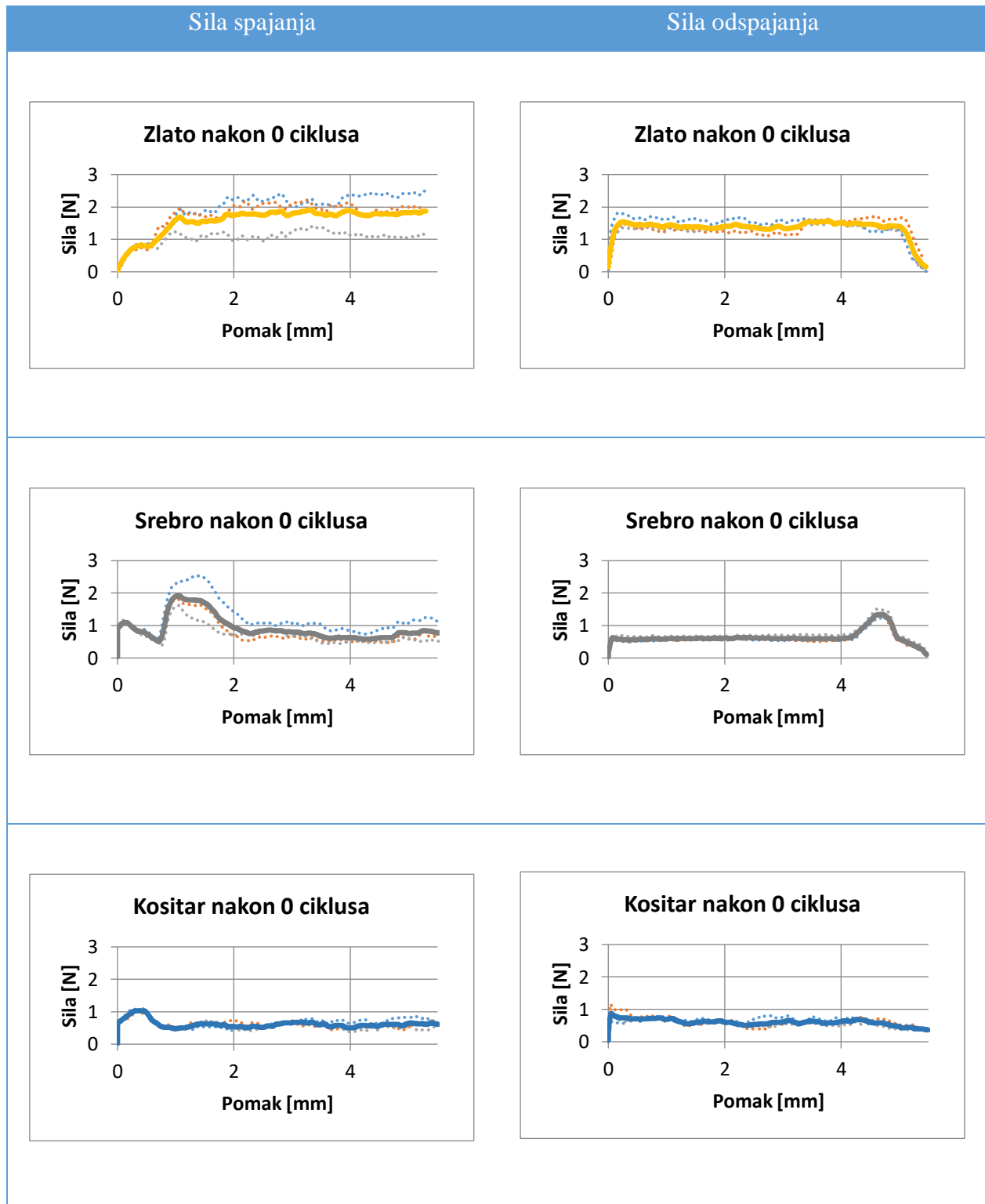


posebno za svaku prevlaku (po tri uzorka/prevlaka). Podebljana linija na dijagramu predstavlja silu prosječnih vrijednosti.

U tablicama 5., 7. i 9. izračunata je maksimalna vrijednost i prosječna maksimalna vrijednost sile spajanja/odspjanja svake prevlake kako bi se vrijednost otpora, utjecaj normalne sile opruge i pojava fretting korozije, nakon svakog ciklusa ispitanih uzoraka, mogla usporediti.

Mjerenja nakon 0 ciklusa (početno stanje)

Tablica 4. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 0 ciklusa (početno stanje)



Iz dijagrama u tablici 4. je vidljivo da svaka prevlaka ima svoj karakteristični oblik koji uvjetuje debljina, tvrdoća prevlake i geometrija para. Važno je naglasiti da su sile svih triju prevlaka u granicama definirane specifikacijom.

Prevlaka zlata kod sila odspajanja/spajanja ima kontinuiran rast sile tijekom gibanja (cjelokupnog pomaka). Krivulje kod srebrene prevlake na grafičkim prikazima imaju izražene pikove. Kod sila spajanja pikovi su naglašeni na početnom dijelu spajanja – u intervalu od 0-3 mm. A kod sila odspajanja na u završnom intervalu od 4-5 mm. Sila spajanja kod kositra imaju blago povećanje na početku rada, ali nakon početnog uhodavanja sila je kontinuirana duž cijelog puta kao i kod sila odspajanja.

Sile spajanja/odspajanja kod kositrene prevlake i sile odspajanja srebrene i zlatne prevlake ne pokazuju velika rasipanja vrijednosti.

**Tablica 5. Prikaz  $F_{Smax}$ ,  $\overline{F_{Smax}}$ ,  $F_{Omax}$  i  $\overline{F_{Omax}}$  nakon 0 ciklusa**

	Zlato	Srebro	Kositar
$F_{Smax}$ [N]	2,51	2,54	1,10
$\overline{F_{Smax}}$ [N]	2,04	2,00	1,07
$F_{Omax}$ [N]	1,83	1,51	1,17
$\overline{F_{Omax}}$ [N]	1,67	1,36	0,96

Gdje je:

$F_{Smax}$  – maksimalna vrijednost sile odspajanja po grupi ispitivanja (vrsta revlake), N

$\overline{F_{Smax}}$  – srednja vrijednost maksimalnih vrijednosti sile odspajanja po grupi ispitivanja (vrsta prevlake), N

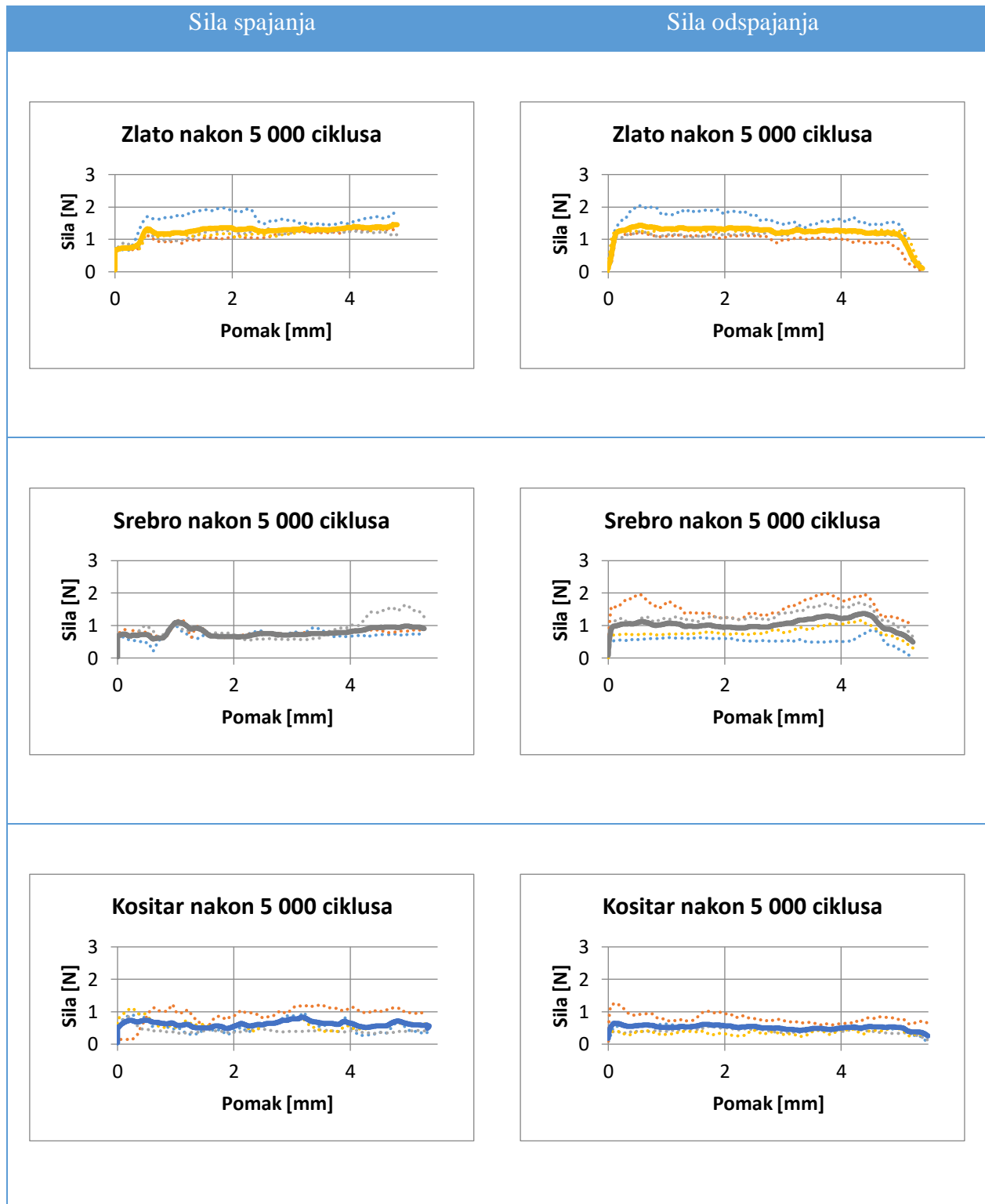
$F_{Omax}$  – maksimalna vrijednost sile odspajanja po grupi ispitivanja (vrsta revlake), N

$\overline{F_{Omax}}$  – srednja vrijednost maksimalnih vrijednosti sile odspajanja po grupi ispitivanja (vrsta prevlake), N

Zlato i srebro imaju više vrijednosti tvrdoće od kositara pa su maksimalne vrijednosti sila više.

## Mjerenja nakon 5 000 ciklusa

Tablica 6. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 5 000 ciklusa



**Tablica 7. Prikaz  $F_{Smax}$ ,  $\overline{F_{Smax}}$ ,  $F_{Omax}$  i  $\overline{F_{Omax}}$  nakon 5 000 ciklusa**

	Zlato	Srebro	Kositar
$F_{Smax}$ [N]	1,97	1,63	1,23
$\overline{F_{Smax}}$ [N]	1,54	1,31	1,04
$F_{Omax}$ [N]	2,04	2,00	1,26
$\overline{F_{Omax}}$ [N]	1,50	1,43	0,74

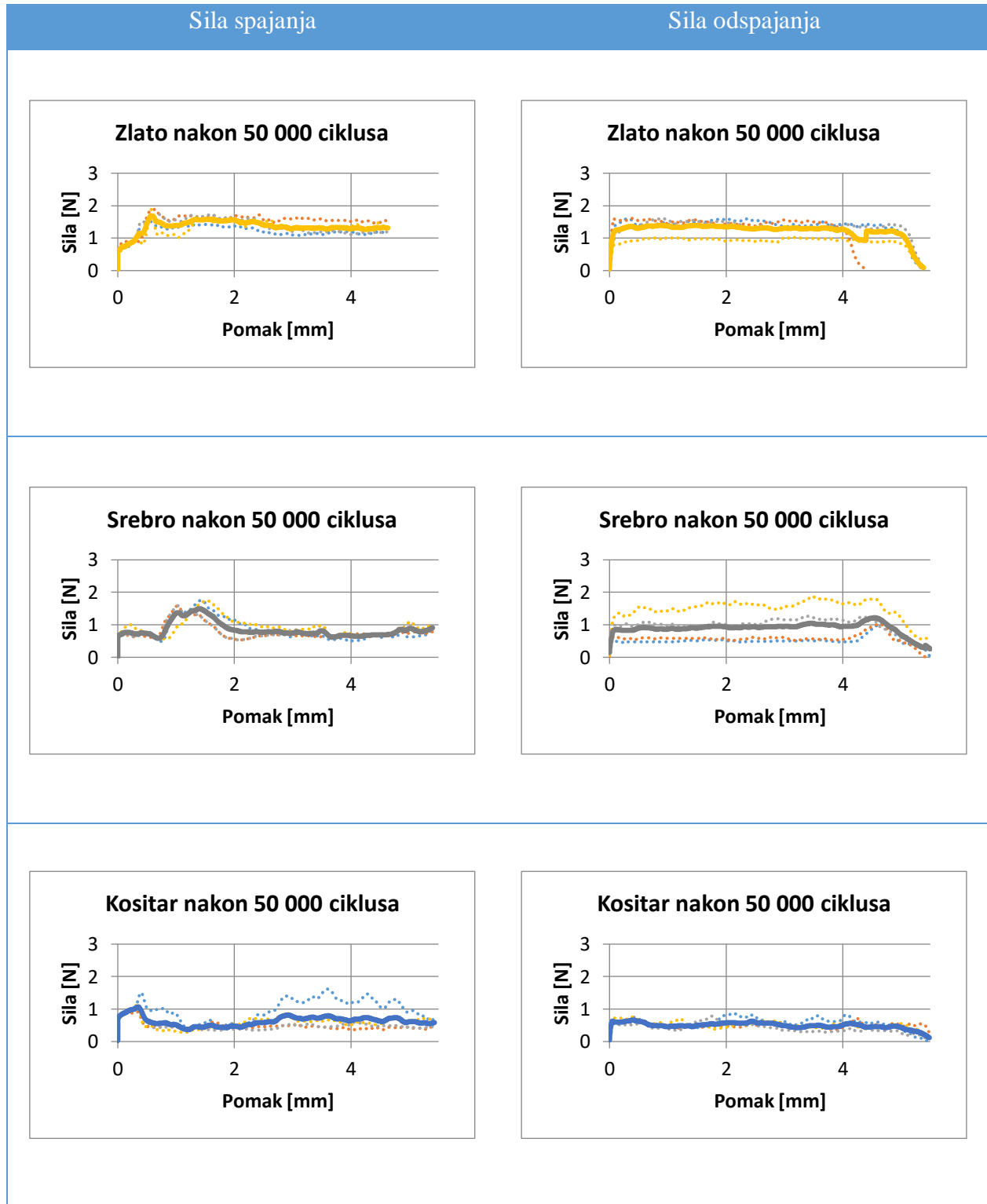
Iz tablice je vidljivo da su sile spajanja u odnosu na početna mjerenja različita, što dokazuje da se faktor trenja ili normalna sila opruge promijenila. Došlo je do oštećenja prevlake (vidljivo kasnije na slikama) i time promjene u faktoru trenja. Budući da je sila spajanja/odspajanja umnožak faktora trenja prevlake i normalne sile opruge, sigurno je da je došlo do oštećenja jednog od ta dva faktora.

Raspianje vrijednosti sila spajanja/odspajanja na dijagramima u tablici 5. je veće nego na dijagramima u tablici 4. pa je za pretpostaviti da je došlo do prvih znakova oštećenja prevlake.

Različita tvrdoća prevlaka utječe na razliku između vrijednosti sila spajanja/odspajanja odgovarajućih triboparova.

## Mjerenja nakon 50 000 ciklusa

Tablica 8. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 50 000 ciklusa



**Tablica 9. Prikaz  $F_{Smax}$ ,  $\overline{F_{Smax}}$ ,  $F_{Omax}$  i  $\overline{F_{Omax}}$  nakon 50 000 ciklusa**

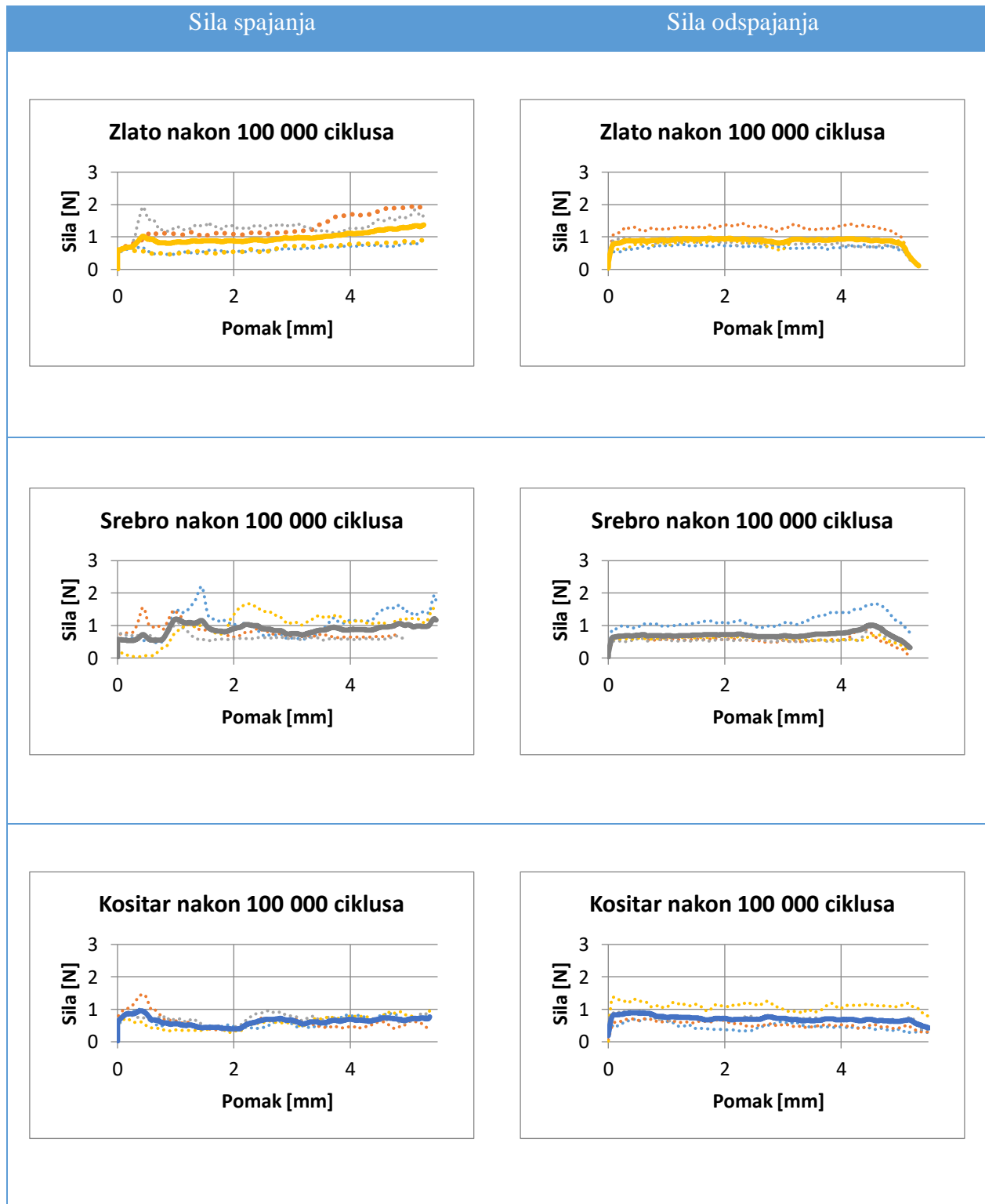
	Zlato	Srebro	Kositar
$F_{Smax}$ [N]	1,89	1,76	1,61
$\overline{F_{Smax}}$ [N]	1,75	1,67	1,17
$F_{Omax}$ [N]	1,61	1,98	0,88
$\overline{F_{Omax}}$ [N]	1,46	1,30	0,78

Razlika u vrijednostima spajanja kod ciklusa od 5 000 i 50 000 nije se značajno promijenila na temelju čega se može donijeti zaključak da su promjene u spoju terminala nastupile već u prvoj sekvenci cikliranja do 5 000 ponavljanja.

Dijagrami sila spajanja i odspajanja nakon 5 000 i 50 000 ciklusa vrlo su slični. Što ukazuje da su značajnije promjene kod vrijednosti sila spajanja/odspajanja nastupile u prvoj sekvenci od 5 000 ciklusa. Vrijednosti maksimalnih sila i izgled dijagrama kod ciklusa od 50 000 nema značajniju promjenu od vrijednosti koje su dobivene nakon vrijednosti od 5 000 ciklusa. Kod sile odspajanja, slično kao i kod sile spajanja, nema značajne promjene te se može zaključiti da nema značajnije promjene u vrijednosti sile.

## Mjerenja nakon 100 000 ciklusa

Tablica 10. Prikaz vrijednosti sila spajanja i odspajanja nakon 100 000 ciklusa





Tablica 11. Prikaz  $F_{Smax}$ ,  $\overline{F_{Smax}}$ ,  $F_{Omax}$  i  $\overline{F_{Omax}}$  nakon 100 000 ciklusa

	Zlato	Srebro	Kositar
$F_{Smax}$ [N]	2,05	2,21	1,47
$\overline{F_{Smax}}$ [N]	1,45	1,63	1,12
$F_{Omax}$ [N]	1,42	1,68	1,38
$\overline{F_{Omax}}$ [N]	1,04	1,05	0,97

Iz dijagrama u tablici 10. vidljivo je da je došlo do blagog rasta sile spajanja u odnosu na uzorke ispitivane 50 000 ciklusa. Za pretpostaviti je da je površina više oštećena te se faktor trenja promijenio.

Radi jednostavnije analize rezultata sile spajanja/odspajanja u svakoj tablici određene sekvence, uz maksimalnu ostvarenu silu koju je ostvario pojedini uzorak, prikazana je i srednja vrijednost maksimalnih sila svih uzoraka za pripadajuću sekvencu. Time se dobiva mjerodavniji rezultat za daljnje praćenje elektromehaničkih promjena. U tablici 12. i 13. dane su srednje vrijednosti maksimalnih sila te njihov odnos prema istima u ranijem ciklusu.

Tablica 12. Promjena sile spajanja u %

Ciklusi	Zlato		Srebro		Kositar	
	$F_{Smax}$ [N]	$\Delta\overline{F_{Smax}}$ [%]	$F_{Smax}$ [N]	$\Delta\overline{F_{Smax}}$ [%]	$F_{Smax}$ [N]	$\Delta\overline{F_{Smax}}$ [%]
0	2,04	/	2,00	/	1,07	/
5 000	1,54	<b>-24,5</b>	1,31	<b>-34,5</b>	1,04	<b>-2,8</b>
50 000	1,75	<b>+13,6</b>	1,67	<b>+27,5</b>	1,17	<b>+12,5</b>
100 000	1,45	<b>-17,1</b>	1,63	<b>-2,4</b>	1,12	<b>-4,3</b>

Tablica 13. Promjena sile odspajanja u %

Ciklusi	Zlato		Srebro		Kositar	
	$F_{Omax}$ [N]	$\Delta\overline{F_{Omax}}$ [%]	$F_{Omax}$ [N]	$\Delta\overline{F_{Omax}}$ [%]	$F_{Omax}$ [N]	$\Delta\overline{F_{Omax}}$ [%]
0	1,67	/	1,36	/	0,96	/
5 000	1,50	<b>-10,1</b>	1,43	<b>+5,1</b>	0,74	<b>-22,9</b>
50 000	1,46	<b>+2,7</b>	1,30	<b>-9,1</b>	0,78	<b>+5,4</b>
100 000	1,04	<b>-28,8</b>	1,05	<b>-19,2</b>	0,97	<b>+24,4</b>

### 6.3.2 Mjerenje kontaktnog otpora

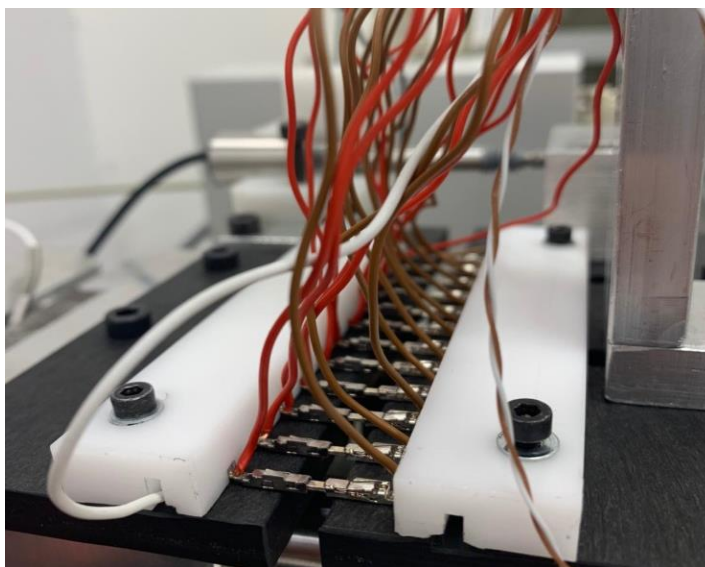
Zbog bolje kontrole i praćenja ispitivanja, u svakom spoju terminala mjeri se električni otpor. Prema specifikaciji, definirana mjerna struja kroz spoj terminala je 10 mA, a očitavanje otpora je u intervalu 4 Hz ili 250 ms.

Terminali prije krimpovanja, radi lakšeg rukovanja, dolaze pakirani na trake. Trake se koriste kao spojnice između kontakata te je na taj način dobiven serijski spoj kojim je osigurana konstantna struja na svakom terminalskom paru. Između svakog spoja muškog i ženskog terminala mjereni su padovi napona. Na slici 35. su prikazani terminali s mjernim žicama.



**Slika 35. Priprema uzoraka spojenih u seriju**

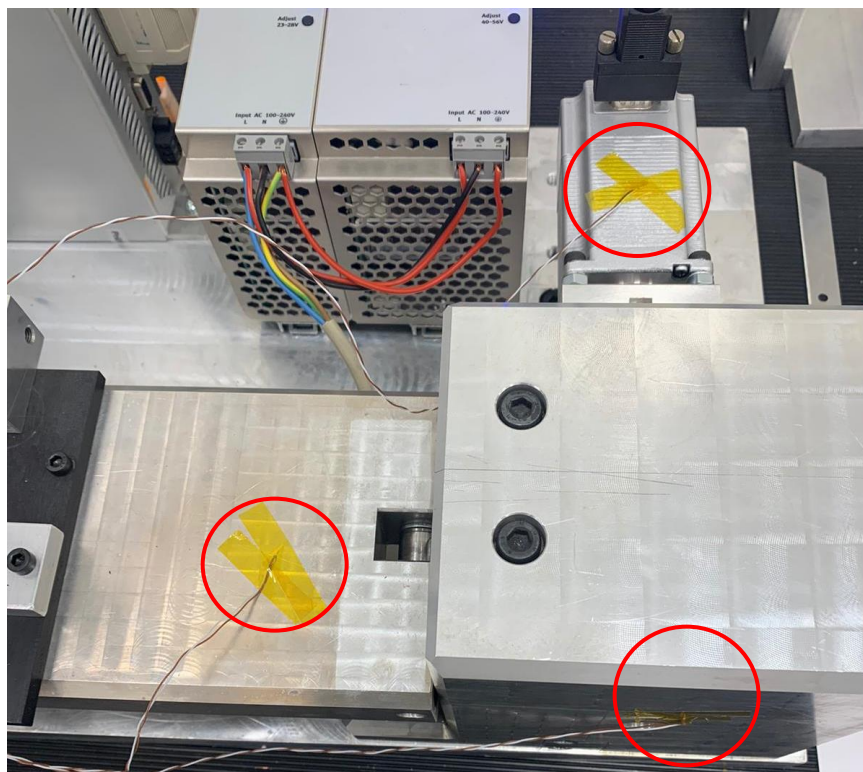
Praćenje otpora odvija se četverožičnom metodom, mjernim žicama zalemljenim u žičanoj krimp zoni. Kako bi se utjecaj napetosti mjernih žica na rezultate minimizirano, na pomični dio naprave ugrađen je prihvat za mjerne žice. Na slici 36. prikazani su uzorci u prihvatu spremni za ispitivanje.



**Slika 36. Uzorci za vrijeme ispitivanja**

Bijelo-smeđe mjerne žice, na slici 36. su termoparovi (T-tip) kojima je praćena temperatura okoline, pomičnog dijela naprave, kućišta ekscentra i motora. Temperatura motora, pomičnog dijela i kućišta ekscentra kontrolirana je zbog mogućih nedostataka naprave i nije predmetom ovog diplomskog rada. Tijekom ispitivanja konstantno je kontrolirana temperatura okoline zbog osiguravanja laboratorijskih uvjeta.

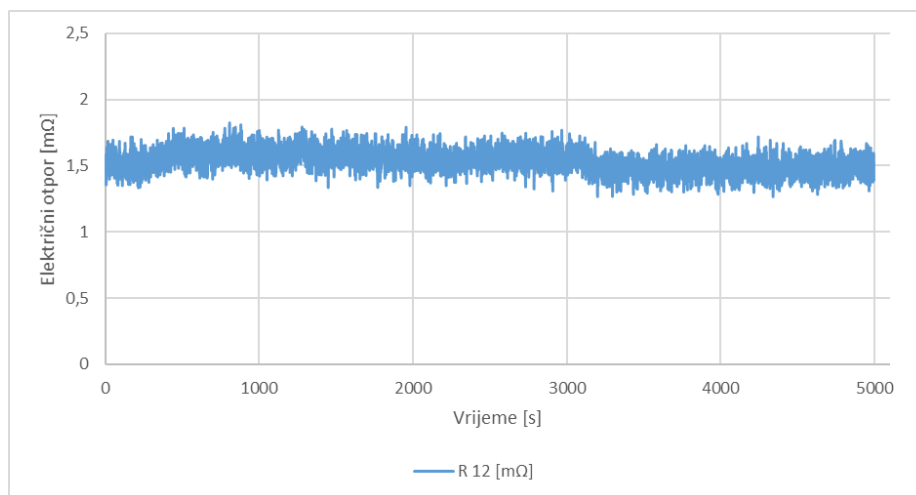
Na slici 37. označene su mjerne točke za kontrolu navedenih temperatura.



**Slika 37. Prikaz temperaturnih mjernih točaka**

Na slikama 38. – 58. prikazani su dijagrami otpora. U svakom dijelu po četiri uzorka za svaku prevlaku, u tri sekvence (5 000, 50 000 i 100 000 ciklusa). U tablicama 14. – 22. prikazane su karakteristične vrijednosti otpora ( $R_M$ ,  $R_m$ ,  $s$ ,  $\bar{R}$ )

## 5 000 ciklusa – prevlaka na bazi zlata



Slika 38. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 12, prevlaka na bazi zlata (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 14. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi zlata

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_{12}$ [mΩ]	1,82	1,27	0,08	1,53
$R_{11}$ [mΩ]	1,55	1,09	0,07	1,31
$R_{10}$ [mΩ]	1,60	1,12	0,08	1,37
$R_9$ [mΩ]	1,53	1,08	0,08	1,31
$R_{Au12,11,10,9}$ [mΩ]	<b>1,63</b>	<b>1,14</b>	<b>0,08</b>	<b>1,38</b>

Gdje je:

$R_M$  – maksimalna vrijednost otpora, mΩ

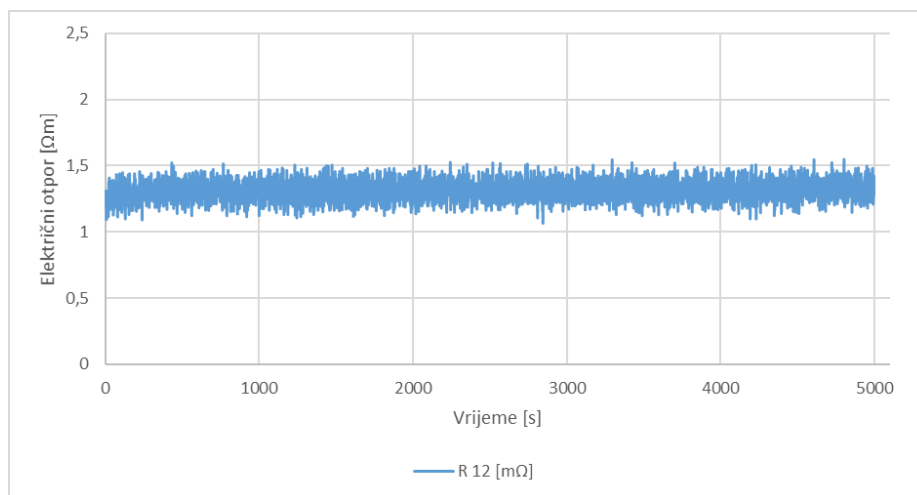
$R_m$  – minimalna vrijednost otpora, mΩ

$s$  – standardna devijacija

$\bar{R}$  – prosječna vrijednost otpora, mΩ

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 5 000 ciklusa – prevlaka na bazi srebra



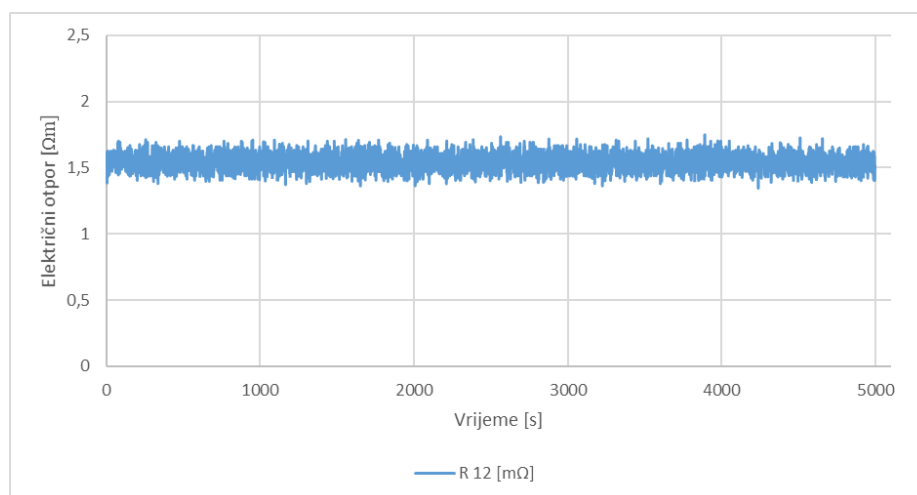
Slika 39. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 12, prevlaka na bazi srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 15. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi srebra

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_{12}$ [mΩ]	1,55	1,07	0,07	1,31
$R_{11}$ [mΩ]	1,34	0,89	0,07	1,12
$R_{10}$ [mΩ]	1,56	1,08	0,07	1,33
$R_9$ [mΩ]	1,41	0,95	0,07	1,20
$R_{Ag12,11,10,9}$ [mΩ]	<b>1,47</b>	<b>1,00</b>	<b>0,07</b>	<b>1,24</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 5 000 ciklusa – prevlaka na bazi kositra



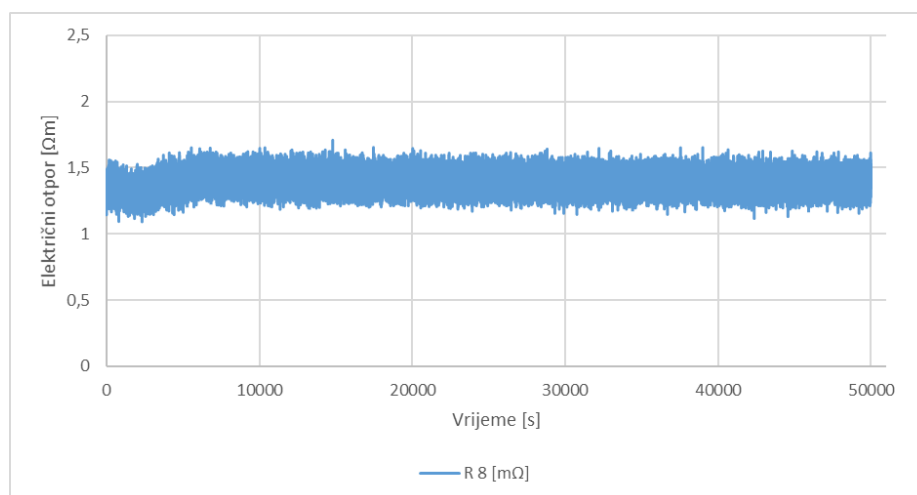
Slika 40. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 12, prevlaka na bazi kositra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 16. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi kositra

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_{12}$ [mΩ]	1,74	1,35	0,06	1,54
$R_{11}$ [mΩ]	1,82	1,39	0,06	1,62
$R_{10}$ [mΩ]	1,77	1,39	0,06	1,58
$R_9$ [mΩ]	1,77	1,33	0,06	1,52
$R_{Sn12,11,10,9}$ [mΩ]	<b>1,78</b>	<b>1,37</b>	<b>0,06</b>	<b>1,57</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 50 000 ciklusa – prevlaka na bazi zlata



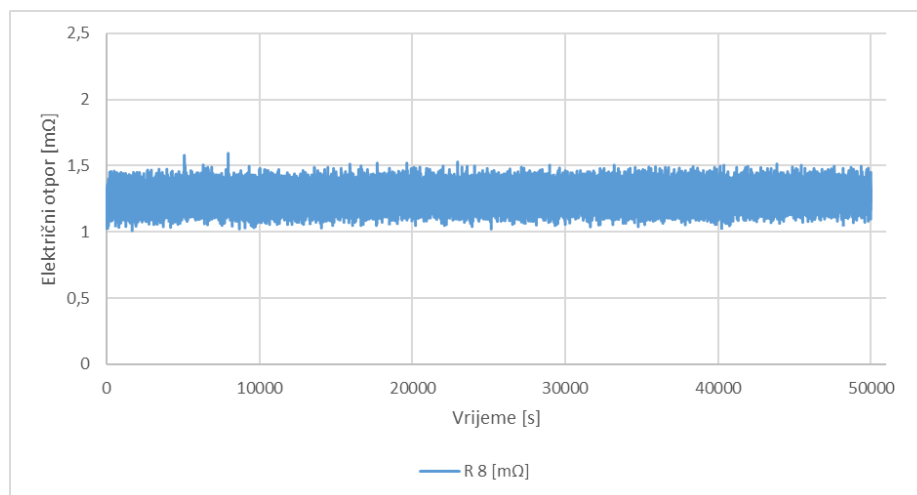
Slika 41. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 8, prevlaka na bazi zlata (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 17. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi zlata

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_8$ [mΩ]	1,71	1,01	0,08	1,40
$R_7$ [mΩ]	1,75	1,10	0,09	1,41
$R_6$ [mΩ]	1,66	0,99	0,08	1,31
$R_5$ [mΩ]	1,63	1,02	0,08	1,33
$R_{Au8,7,6,5}$ [mΩ]	<b>1,69</b>	<b>1,03</b>	<b>0,08</b>	<b>1,36</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 50 000 ciklusa – prevlaka na bazi srebra



Slika 42. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 8, prevlaka na bazi srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

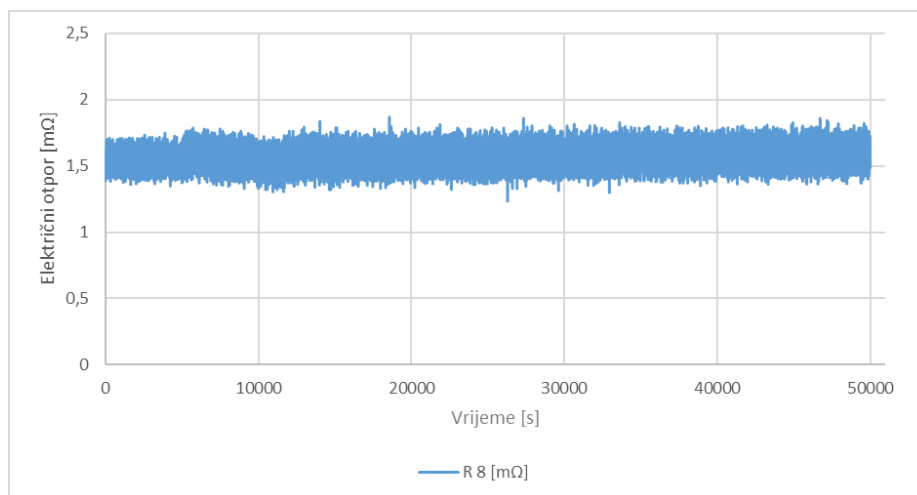
Tablica 18. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi srebra

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_8$ [mΩ]	1,59	1,00	0,07	1,27
$R_7$ [mΩ]	1,47	0,89	0,08	1,18
$R_6$ [mΩ]	1,72	1,13	0,07	1,41
$R_5$ [mΩ]	1,62	0,95	0,07	1,30
$R_{Ag8,7,6,5}$ [mΩ]	<b>1,60</b>	<b>0,99</b>	<b>0,07</b>	<b>1,29</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.



## 50 000 ciklusa – prevlaka na bazi kositra



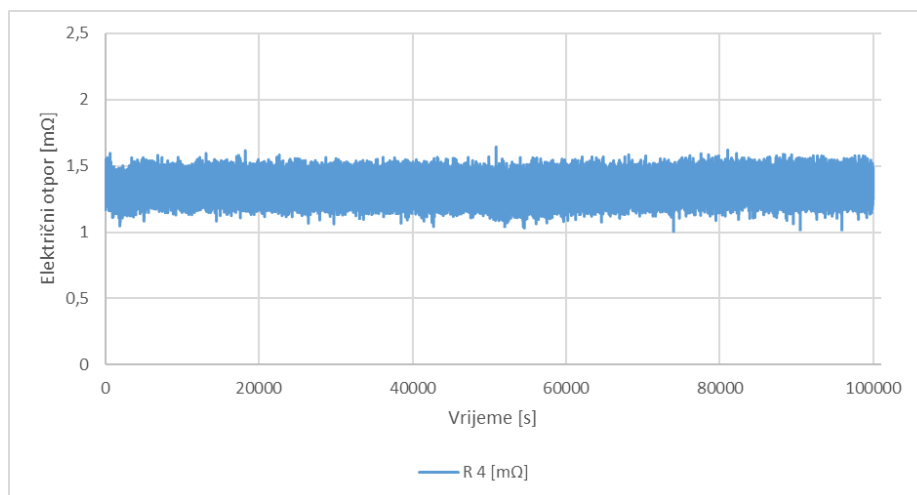
Slika 43. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 8, prevlaka na bazi kositra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 19. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi kositra

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_8$ [mΩ]	1,87	1,24	0,07	1,57
$R_7$ [mΩ]	1,94	1,29	0,07	1,64
$R_6$ [mΩ]	1,88	1,27	0,07	1,59
$R_5$ [mΩ]	1,78	1,24	0,07	1,52
$R_{Sn8,7,6,5}$ [mΩ]	<b>1,67</b>	<b>1,26</b>	<b>0,07</b>	<b>1,58</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 100 000 ciklusa – prevlaka na bazi zlata



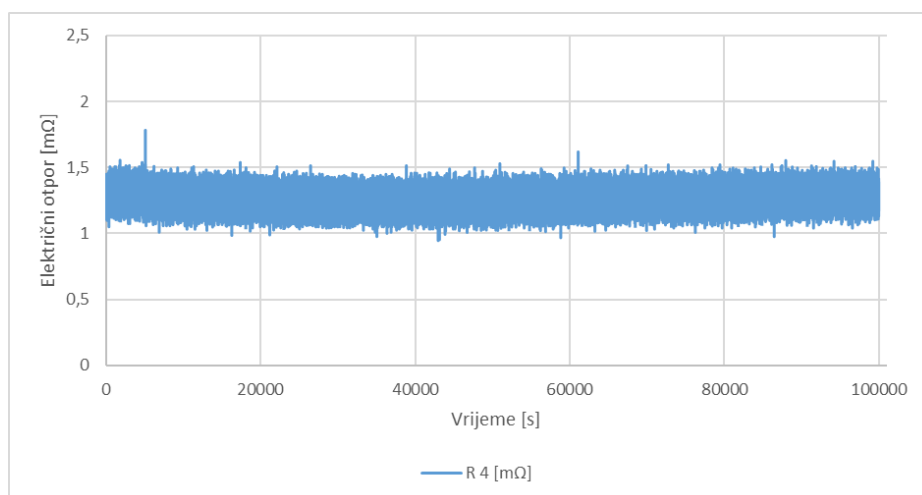
Slika 44. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi zlata (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 20. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi zlata

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_4$ [mΩ]	1,64	1,01	0,07	1,35
$R_3$ [mΩ]	1,63	0,99	0,09	1,29
$R_2$ [mΩ]	1,72	1,07	0,08	1,40
$R_1$ [mΩ]	1,63	0,93	0,08	1,30
$R_{Au4,3,2,1}$ [mΩ]	<b>1,66</b>	<b>1,00</b>	<b>0,08</b>	<b>1,34</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 100 000 ciklusa – prevlaka na bazi srebra



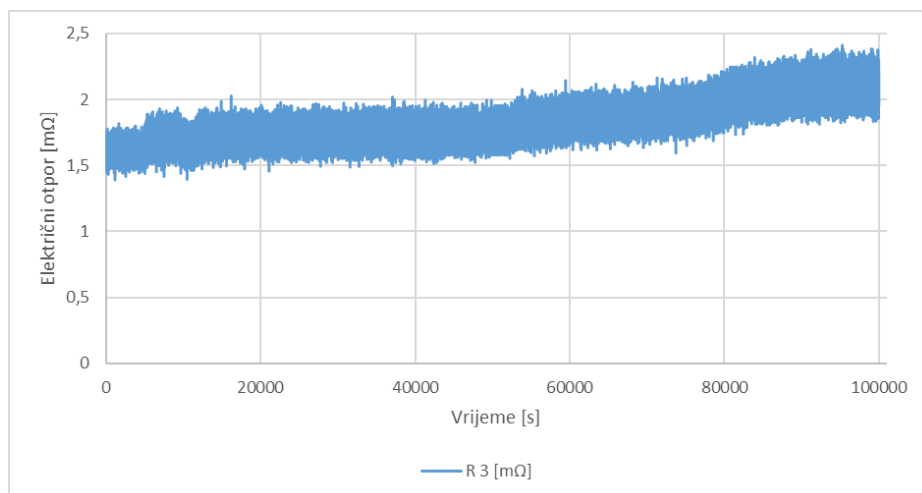
Slika 45. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 21. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi srebra

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_4$ [mΩ]	1,78	0,95	0,08	1,26
$R_3$ [mΩ]	1,65	0,89	0,10	1,32
$R_2$ [mΩ]	1,72	0,98	0,09	1,32
$R_1$ [mΩ]	1,46	0,88	0,08	1,16
$R_{Ag4,3,2,1}$ [mΩ]	<b>1,65</b>	<b>0,92</b>	<b>0,09</b>	<b>1,27</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

## 100 000 ciklusa – prevlaka na bazi kositra



Slika 46. Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 3, prevlaka na bazi kositra srebra (ostali dijagrami dani su u Prilogu 1)

Tablica 22. Vrijednosti otpora uzoraka s prevlakom na bazi kositra

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_4$ [mΩ]	1,82	1,19	0,08	1,50
$R_3$ [mΩ]	2,41	1,39	0,16	1,84
$R_2$ [mΩ]	2,23	1,26	0,12	1,84
$R_1$ [mΩ]	2,02	1,20	0,10	1,62
$R_{Sn4,3,2,1}$ [mΩ]	<b>2,12</b>	<b>1,26</b>	<b>1,12</b>	<b>1,70</b>

Iz analize rezultata vidljiv je blagi porast kontaktnog otpora, ali još uvijek nedovoljan da bi se okarakterizirao kao pojava fretting korozije. Specifikacija [26] definira porast od 300 mΩ kao granicu prihvatljivosti.

Radi jednostavnije usporedbe rezultata otpora, za svaku skupinu uzoraka, napravljena je tablica sa maksimalnom i minimalnom vrijednosti, standardnom devijacijom te prosječnom vrijednosti u svrhu bolje analize podataka. U tablici 23. prikazane su prosječne vrijednosti otpora nakon 5 000 ciklusa.

**Tablica 23. Prikaz  $R_M$ ,  $R_m$ ,  $s$  i  $\bar{R}$  za srednju vrijednost otpora pojedinih prevlaka**

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_{Au12,11,10,9}$	1,63	1,14	0,08	1,38
$R_{Ag12,11,10,9}$	1,47	1,00	0,07	1,24
$R_{Sn12,11,10,9}$	1,78	1,37	0,06	1,57

Prema tablici 23. vidljivo je da uzorci s kositrenom prevlakom imaju 17 % veći otpor od prevlaka s plemenitim metalima. Povećanje otpora neznatno utječe na svojstva samog spoja.

U tablici 24. prikazane su iste vrijednosti kao i ranije, ali za drugu sekvencu tj. za uzorke ispitane 50 000 ciklusa.

**Tablica 24. Prikaz  $R_M$ ,  $R_m$ ,  $s$  i  $\bar{R}$  za srednju vrijednost otpora pojedinih prevlaka**

	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_{Au8,7,6,5}$	1,69	1,03	0,08	1,36
$R_{Ag8,7,6,5}$	1,60	1,00	0,07	1,29
$R_{Sn8,7,6,5}$	1,78	1,26	0,07	1,58

Kod uzoraka ispitanih 5 000 i 50 000 tisuća ciklusa parametri u tablici se nisu znatno promijenili.

**Tablica 25. Prikaz  $R_M$ ,  $R_m$ ,  $s$  i  $\bar{R}$  srednju vrijednost otpora pojedinih prevlaka**

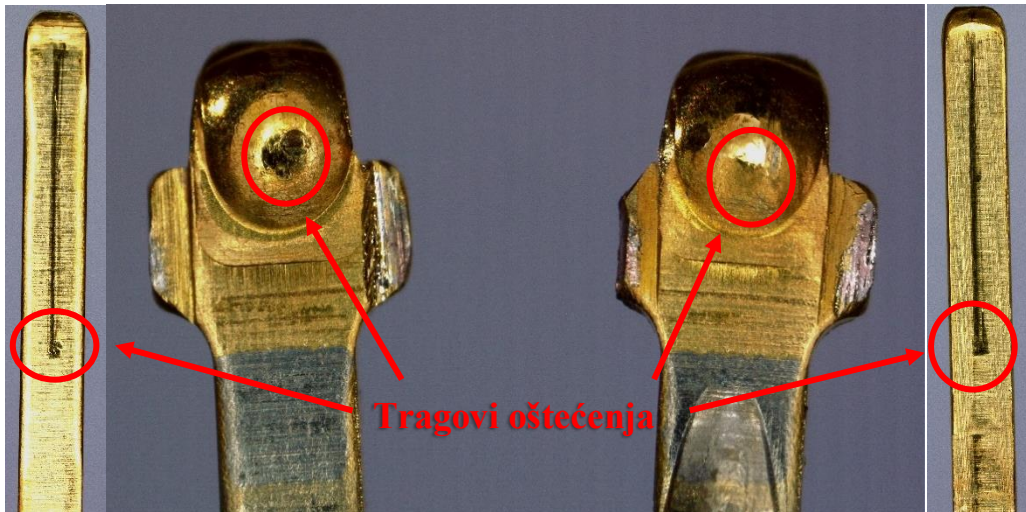
	$R_M$	$R_m$	$s$	$\bar{R}$
$R_{Au4,3,2,1}$	1,66	1,00	0,08	1,34
$R_{Ag4,3,2,1}$	1,65	0,92	0,08	1,27
$R_{Sn4,3,2,1}$	2,12	1,26	0,12	1,70

Iz tablice 25. vidljivo je kako su vrijednosti otpora na uzorcima s prevlakom na bazi kositra narasle. Ova pojava uz promjenu sile spajanja i odspajanja upućuje na sklonost kositra oštećenjima uslijed fretting korozije. Ipak granica prihvatljivosti od 300 mΩ nije postignuta te se može zaključiti da prema [26] fretting korozija nije oštetila kontaktnu površinu u mjeri da kontakt ne bi bio primjenjiv u eksploataciji.

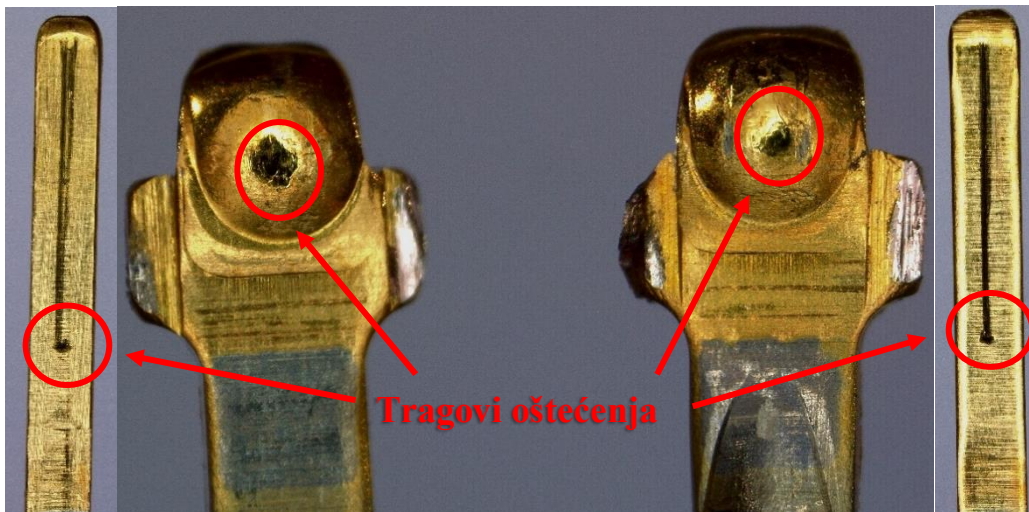
### 6.3.3 Analiza oštećenih dijelova

Analiza oštećenih dijelova dodirnih površina provedena je na svjetlosnom mikroskopu u tvrtci Yazaki Europe Limited.

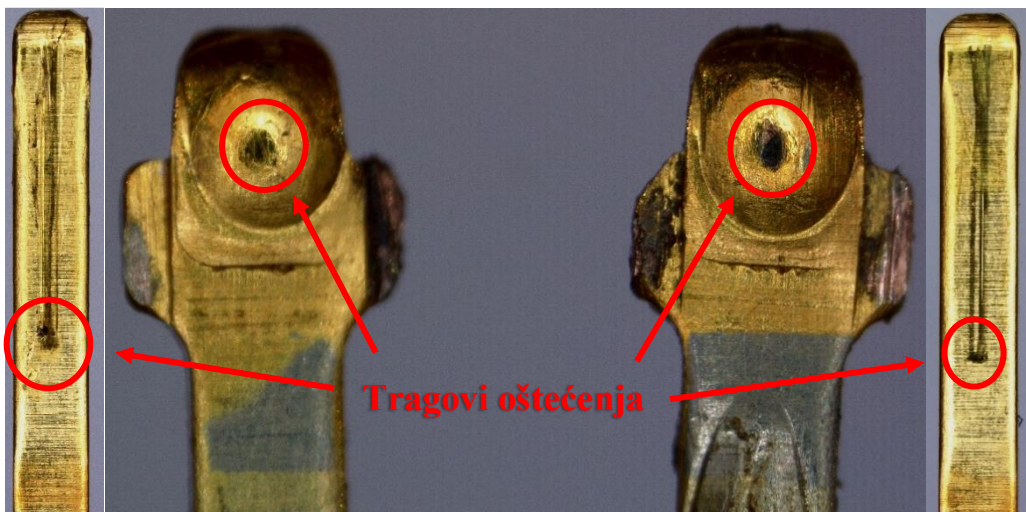
Na slikama od 47. do 55. crveno su označena oštećenja nastala uslijed ispitivanja.



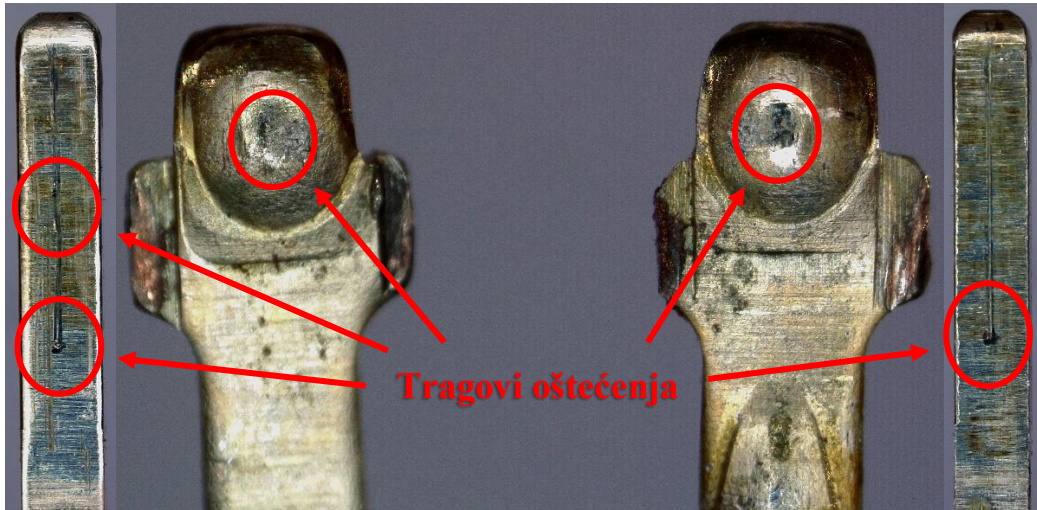
Slika 47. Au - uzorak 11 nakon 5 000 ciklusa



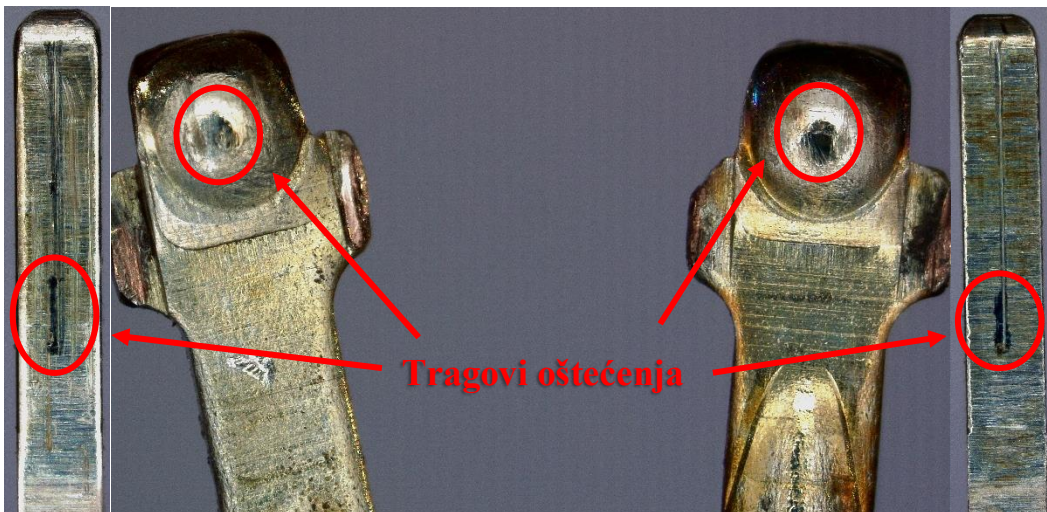
Slika 48. Au - uzorak 7 nakon 50 000 ciklusa



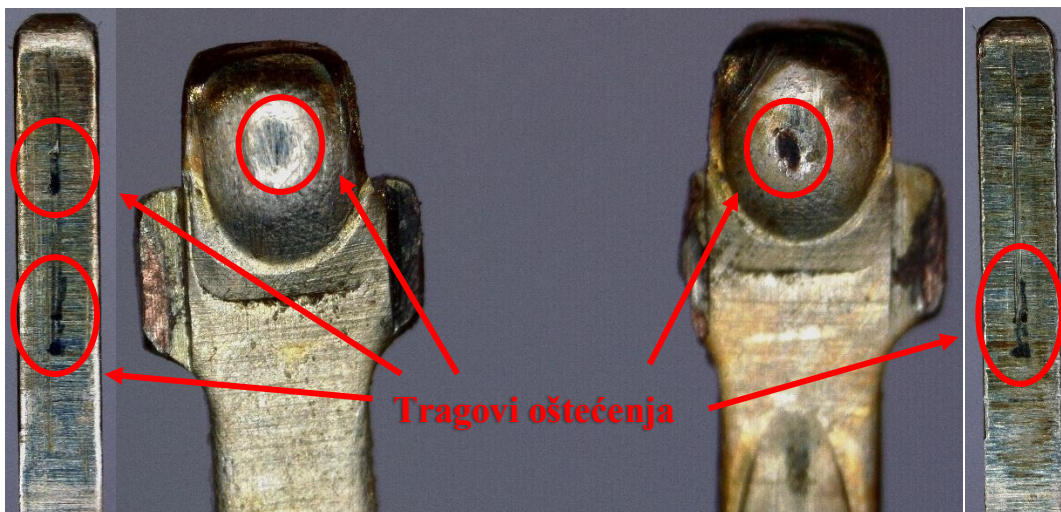
Slika 49. Au - uzorak 1 nakon 100 000 ciklusa



Slika 50. Ag - uzorak 11 nakon 5 000 ciklusa

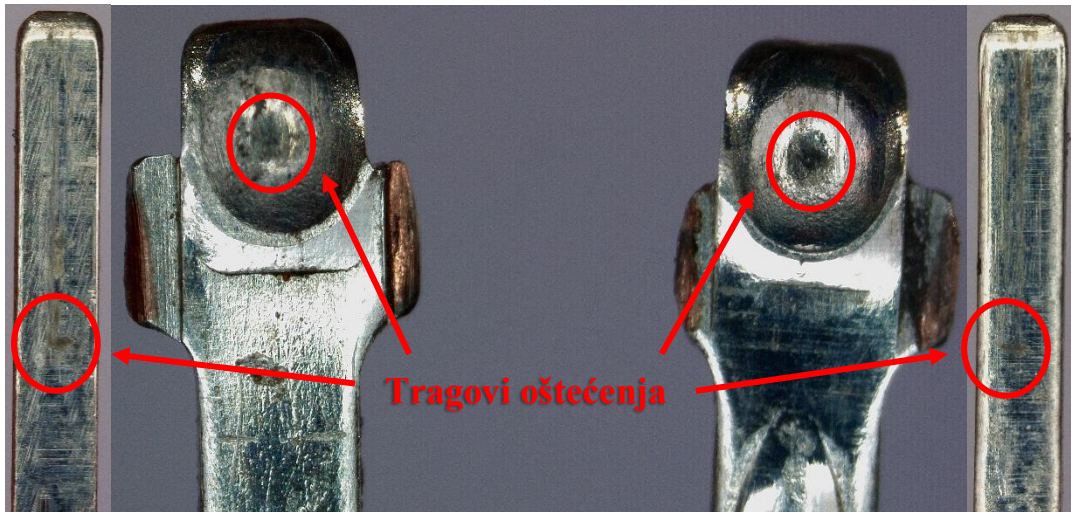


Slika 51. Ag - uzorak 5 nakon 50 000 ciklusa

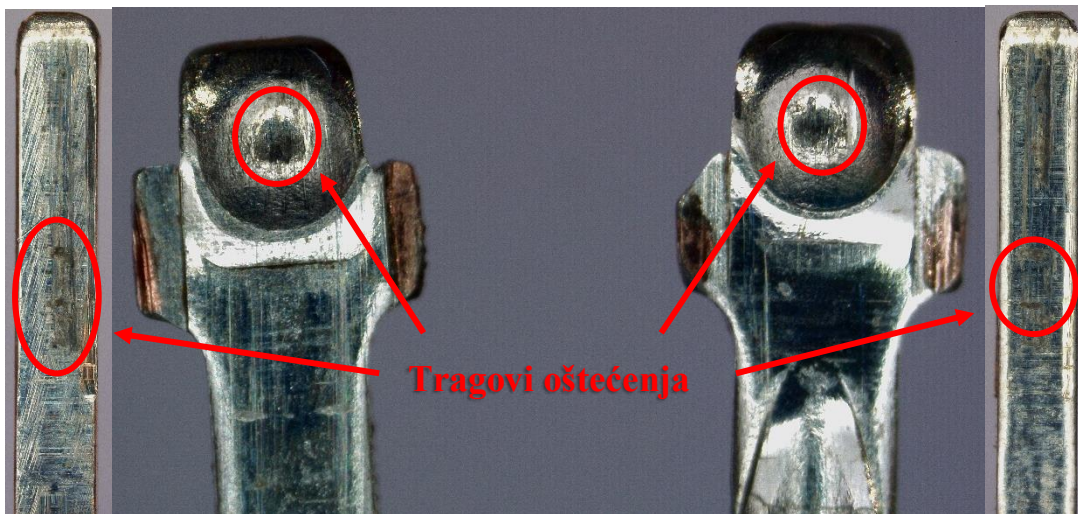


Slika 52. Ag - uzorak 1 nakon 100 000 ciklusa

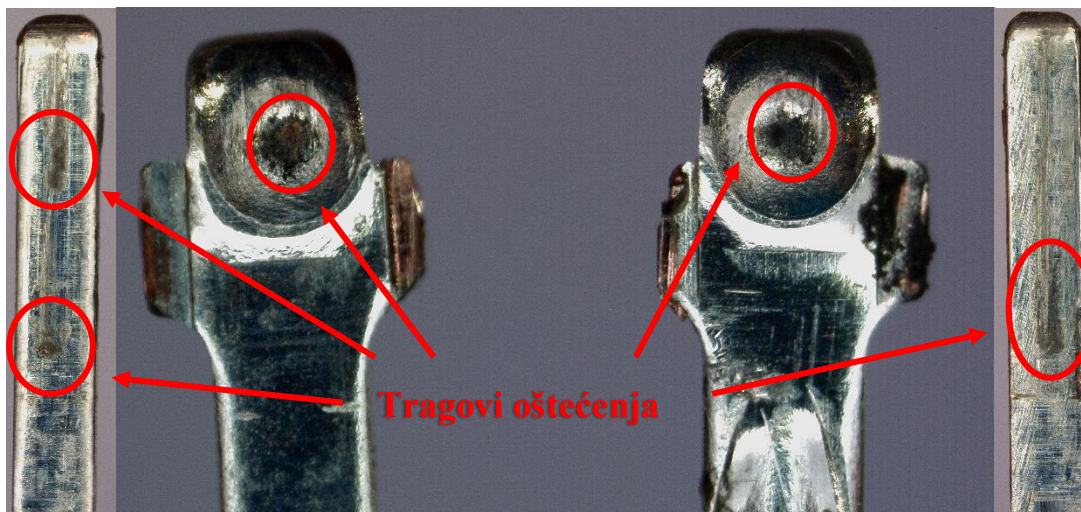




Slika 53. Sn - uzorak 9 nakon 5 000 ciklusa



Slika 54. Sn - uzorak 8 nakon 50 000 ciklusa



Slika 55. Sn - uzorak 1 nakon 100 000 ciklusa

Na slikama je vidljivo kako su uzorci nakon 100 000 ciklusa najviše potrošeni. Kod svake grupe uzoraka (podijeljene na temelju prevlake), vidi se postepeno povećanje oštećenja površine. Oštećenje je nastalo uslijed djelovanja fretting korozije.

#### 6.3.4 Pomak (amplitudno gibanje – klizanje) i sila

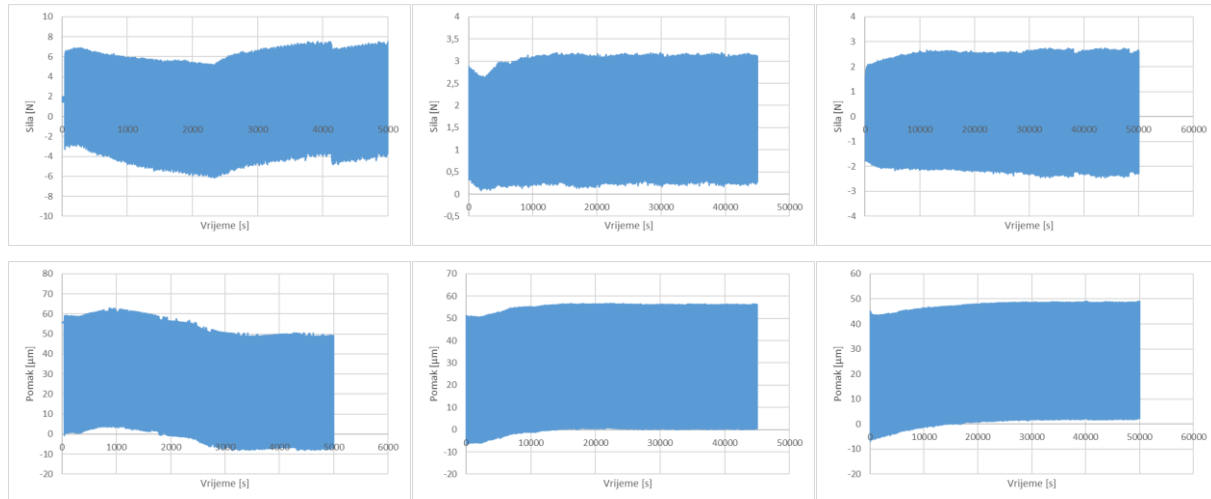
Za vrijeme provođenja ispitivanja mjereni su pomak i sila. Pomak je definiran [26] i on iznosi 50  $\mu\text{m}$ . Senzor sile služi kao potvrda da postoji trenje između muškog i ženskog uzorka. Frekvencija očitavanja podataka senzora sile i pomaka je 20 Hz. Na slici 56, 57 i 58 prikazani su rezultati svakog od navedenih senzora. Slike su podijeljene u tri sekvence, na način kako se ispitivanje izvodilo. Prva sekvenca 5 000 ponavljanja pa još 45 000 te zadnja sekvenca od 50 000 ukupno što čini definiranih 100 000 ponavljanja. U gornjem redu je prikazana sila, a u donjem redu rezultati senzora pomaka.

Iz dijagrama sile 56. i 57. kod zlatne i srebrne prevlake, vidljiv je relativno miran rad senzora sile te se može zaključiti da ni u jednom ciklusu nije došlo do značajnijeg propadanja u obliku histereze sile pa samim time ni do upućivanja u pojavu fretting korozije. Ovaj zaključak se može potvrditi usporedbom rezultata konstantnog mjerenja kontaktnog otpora iz kojeg je vidljivo da nije došlo do značajnijeg povećanja otpora. Dijagrami sila 56. – 58. izazivaju sumnju u točnost mjerenja zbog nesimetričnosti između pozitivne i negativne osi ordinate. Za pretpostaviti da do nesimetričnosti dolazi jer je za ispravan rad senzora sile potrebno postići stabilnost napona Winstonovog mosta ugradnjom otpornika s konstantnim otporom u strujni krug senzora sile. Unatoč navedenoj sumnji u točnost rezultata.

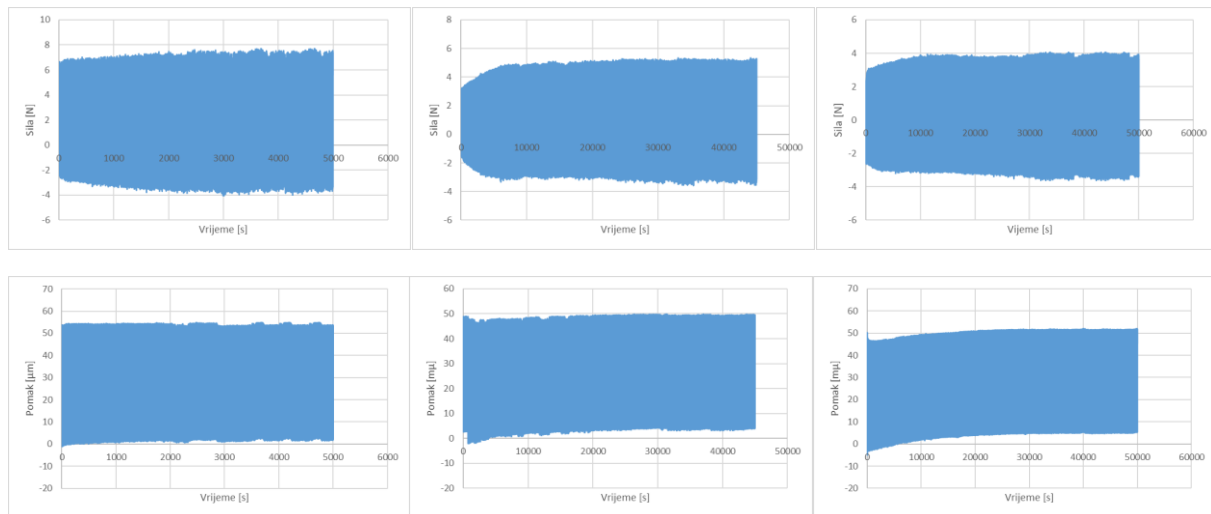
Analizom dobivenih rezultata pomaka (amplitudnog gibanja) zaključuje se da pogon ostvaren tarnim prijenosom ima izvjesne nesavršenosti koje rezultiraju titranjem dijagrama pomaka u pravilnom rasporedu što se može pripisati trenju dodirnih površina. Uklanjanje trenja u prijenosu gibanja moguće je poboljšati odabirom drugačije vrste prijenosa koja nije mehaničkog tipa već električnog, poput piezo električnih aktuatora ili Voice Coil motora. Također, za točnije i preciznije mjerenje pomaka bilo je potrebno konstantno mjeriti napon izvora napajanja mjerača pomaka, kako

bi se uvjerali u stabilnost istog i uklonila sumnja u njihanje napona nastalog zbog potencijalnog djelovanja elektromagnetskog šuma iz okoline.

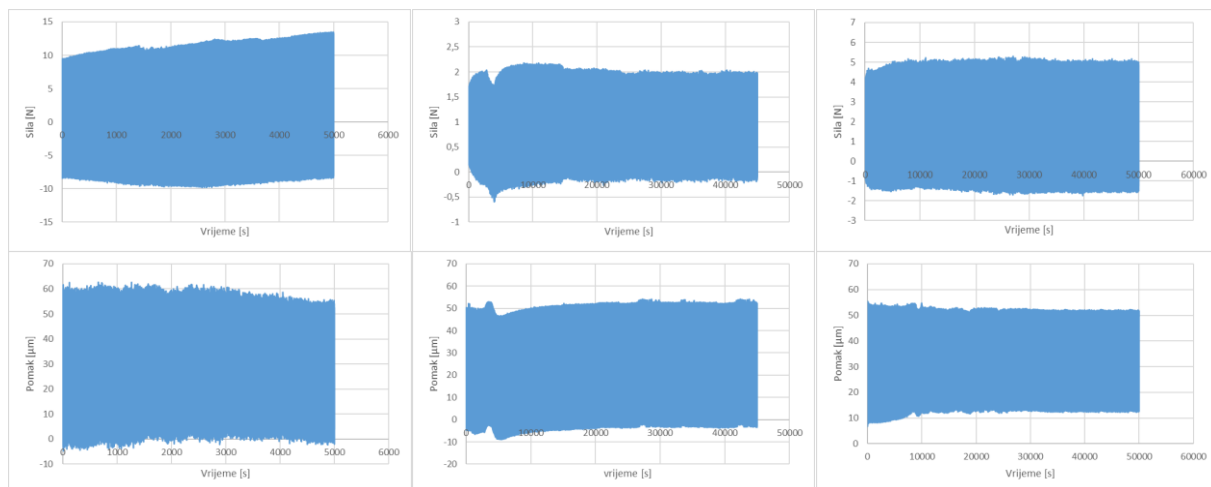
Analizom rezultata praćenja sile kod kositrene prevlake vidljiv je poremećaj u dijagramu 58. (skok i pad sile) te povećanje otpora, što upućuje na početak nastanka fretting korozije. Za konačan zaključak bilo bi potrebno izmjeriti normalnu kontaktnu silu ženskog terminala te napraviti EDS analizu površine kontaktnih točaka.



Slika 56. Cikliranje uzoraka s prevlakom na bazi zlata



Slika 57. Cikliranje uzoraka s prevlakom na bazi srebra



Slika 58. Cikliranje uzoraka s prevlakom na bazi kositra

## 7. ZAKLJUČAK

Provedena ispitivanja fretting korozije na terminalskom sustavu tvrtke Yazaki Europe Limited, 1,2 mm sa zlatnom, srebrnom i kositrenom prevlakom dio su razvojnog ciklusa sustava za ispitivanje fretting korozije napravljenog u spomenutoj firmi.

- Nakon 5 000 ciklusa vrijednost prosječne maksimalne sile spajanja/odspajanja za slatne i srebrne prevlake smanjile su se za 30% u odnosu na početno stanje dok se sile kod prevlake na bazi kositra, vrijednost sile promijenila za 3%.
- Nakon završenog ispitivanja (provedenih 100 000 ciklusa) većih promjena u vrijednostima sila nije bilo.
- Analizom površine da su najveća oštećenja nastala kod kositrene prevlake nakon 100 000 ciklusa
- Fretting je evidentan na sve tri prevlake već nakon 5 000 ciklusa.
- Ponašanje kontaktnog otpora tijekom provedbe ispitivanja ukazuje da je kositrena prevlaka pokazala najveću sklonost oštećenju fretting korozijom.

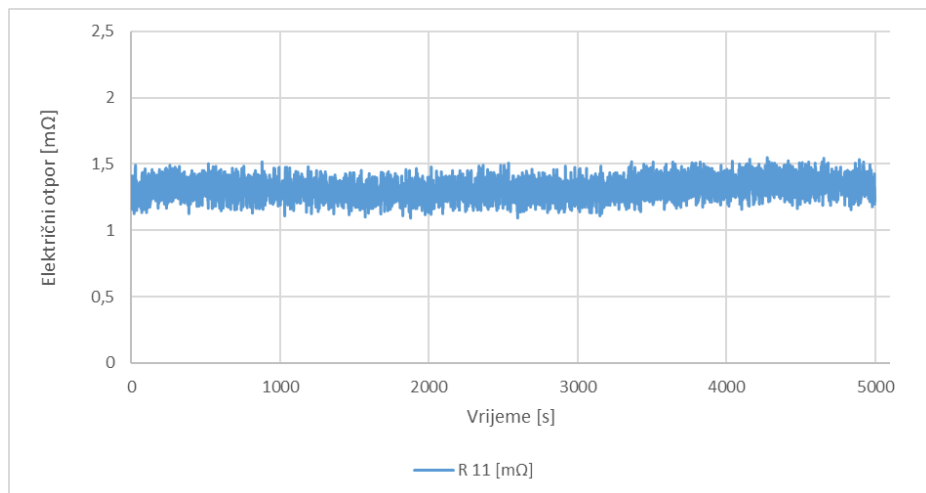
## LITERATURA:

- [1] Y. W. Park, J. P. Jung, K. Y. Lee, Overview of fretting corrosion in electrical connectors, School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
- [2] Šumiga I., Horvat M., Elektronički sustavi u automobilu, Veleučilište u Varaždinu, Varaždin
- [3] Hermansson T., Bohlin R., Carlson J. S., Söderberg R., Automatic assembly path planning for wiring harness installations, Journal of Manufacturing Systems, Göteborg, Sweden, 2013.
- [4] Centar za vozila hrvatske, Hrvatska obrtnička komora, Pučko otvoreno učilište Zagreb, Tehnika motornih vozila, 30. izdanje, 2013. Zagreb
- [5] C.M. Huag, J.A.Romero, M. Osterman, D. Das, M. Pech, Life cycle trends of electronic materials, processes and components, Microelectronic Reliability, University of Maryland, USA, 2019.
- [6] J. Zavada, Prijevozna sredstva, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2000.
- [7] J. Song, H. Yuan, V. Schinow Fretting corrosion behavior of electrical contacts with tin coating in atmosphere and vacuum, Ostwestfalen-Lippe University of Applied Sciences, Germany, 2019.
- [8] <https://www.bentleycareers.com/en/about/extraordinary-team/engineering-and-design.html>, 18.09.2019.
- [9] <https://www.yazaki-europe.com/>, 20.09.2019.
- [10] Terminal Design Introduction, Internal Documentation, Yazaki
- [11] D. J. Perrenault, K. K. Afridi, I.A. Khan, Automotive Applications of Power Electronics, Power Electronics Handbook (Fourth Edition), 2018.
- [12] Report on a proof of concept mechatronics device aimed at testing fretting corrosion, Yazaki, 2016.
- [13] K.Grilec, S. Jakovljević, G. Marić, Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [14] David P. Scopelliti, The pain of fretting corrosion, Samtec, 2013.

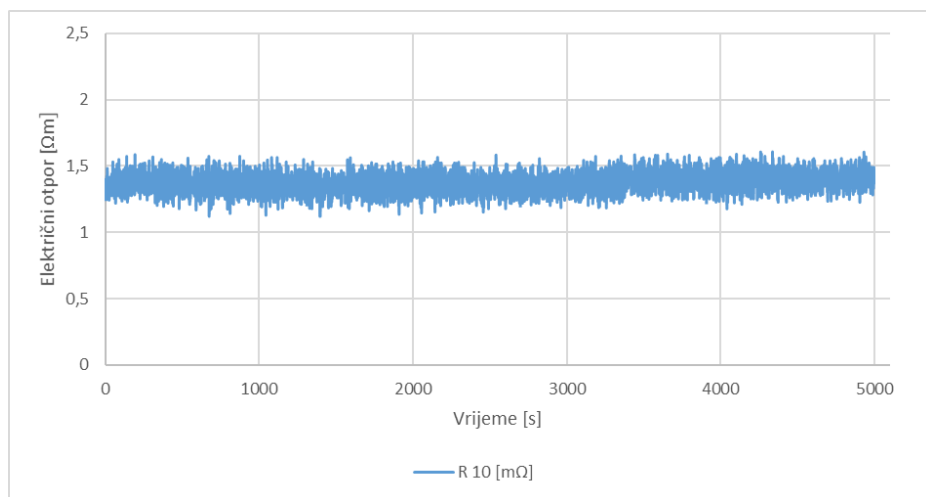
- [15] M. C. Hogg, Fretting wear and fatigue in taper junctions of modular orthopaedic implants, Faculty of Engineering and Information Technologies at The University of Sydney, Sydney, 2016.
- [16] <https://www.sparkfun.com>, 25.09.2019.
- [17] ..., Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication – tribology, OECD Publications, Paris 1969.
- [18] H. Czichos, Tribology – a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York, 1978.
- [19] <https://www.festo.com/>, 02.10.2019.
- [20] <http://people.etf.unsa.ba/~jvelagic/laras/dok/Lekcija11.pdf>, 05.10.2019.
- [21] V. Kovačević, D. Vrsaljko, Nastavni materijali: Inženjerstvo površina, Tribologija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2011.
- [22] D. Šakan, Korozijska svojstva pojedinih tehničkih materijala, Autorizirana predavanja: Integralni i multimodalni transport, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2019.
- [23] [https://www.kme.com/fileadmin/DOWNLOADCENTER/COPPER%20DIVISION/4%20Industrial%20Rolled/4\\_Alloys/STOL\\_R\\_\\_76.pdf](https://www.kme.com/fileadmin/DOWNLOADCENTER/COPPER%20DIVISION/4%20Industrial%20Rolled/4_Alloys/STOL_R__76.pdf), 13.10.2019.
- [24] HRN EN ISO 6892-1:2016
- [25] <https://www.zwickroell.com/>, 14.10.2019.
- [26] Aktiengesellschaft, Konzernnorm, LV-214, Ausgabe 2010-04
- [27] D. Tabor, The Hardness of Materials, oxford University Press., 2000.

# **Prilog 1**

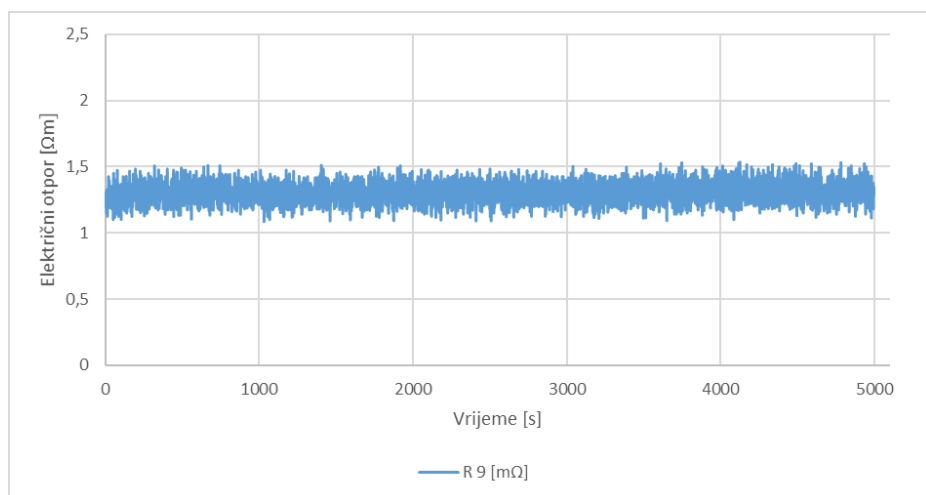




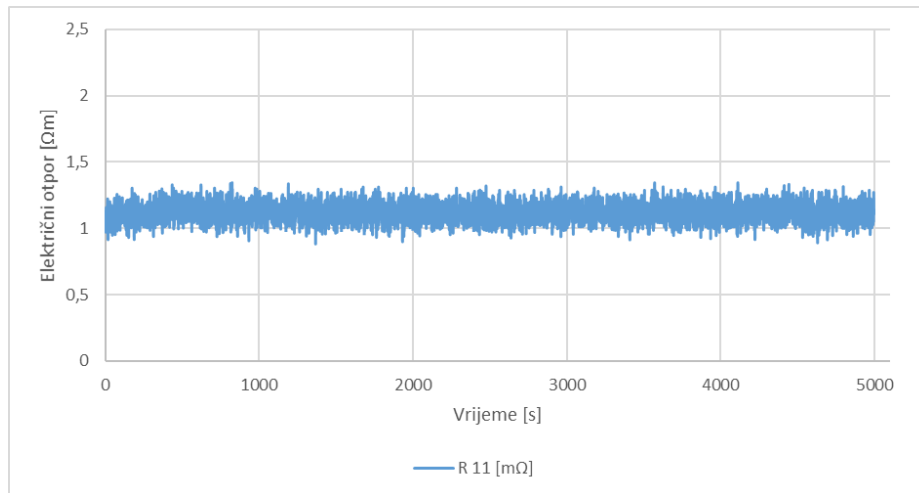
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 11, prevlaka na bazi zlata**



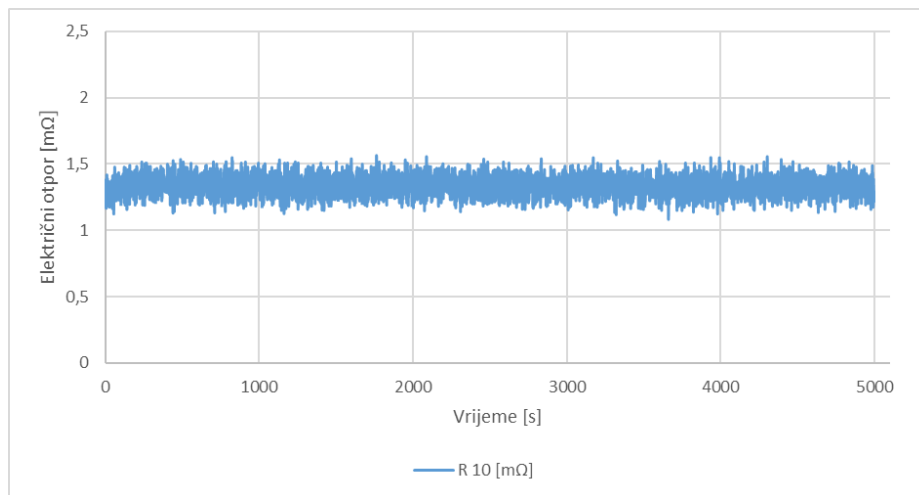
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 10, prevlaka na bazi zlata**



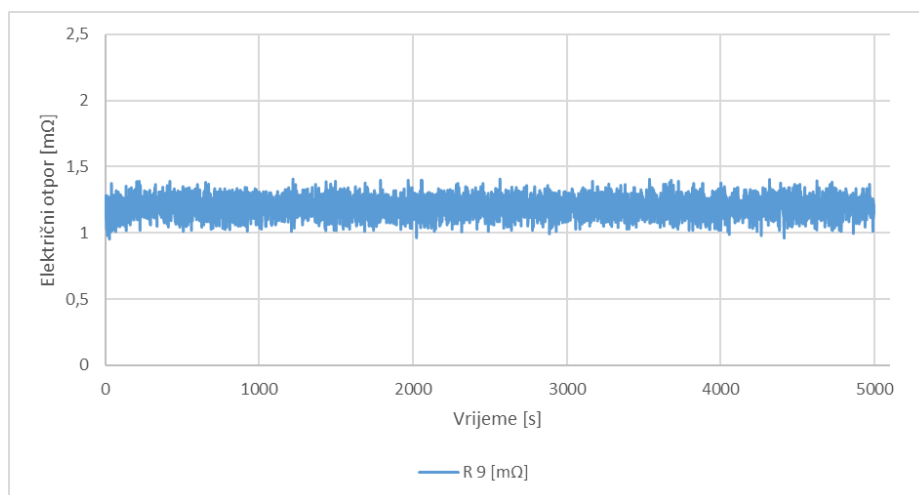
**Slika 59 Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 9, prevlaka na bazi zlata**



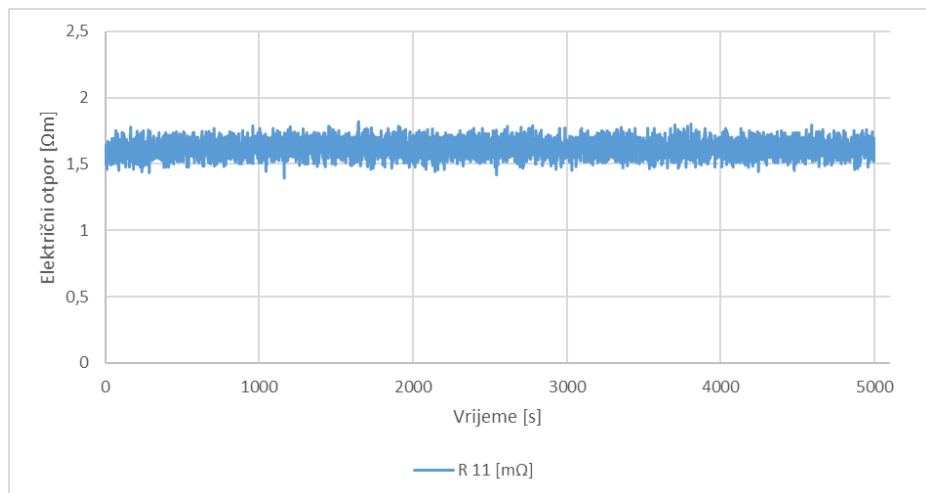
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 11, prevlaka na bazi srebra**



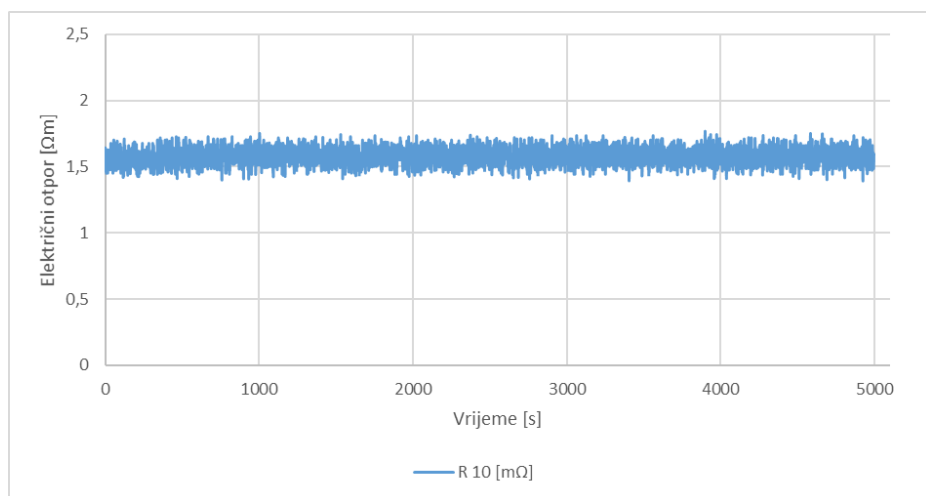
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 10, prevlaka na bazi srebra**



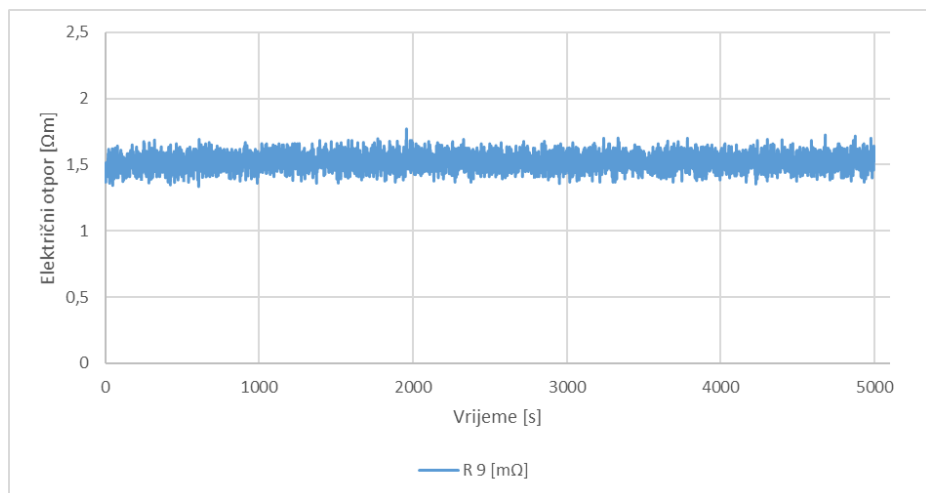
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 9, prevlaka na bazi srebra**



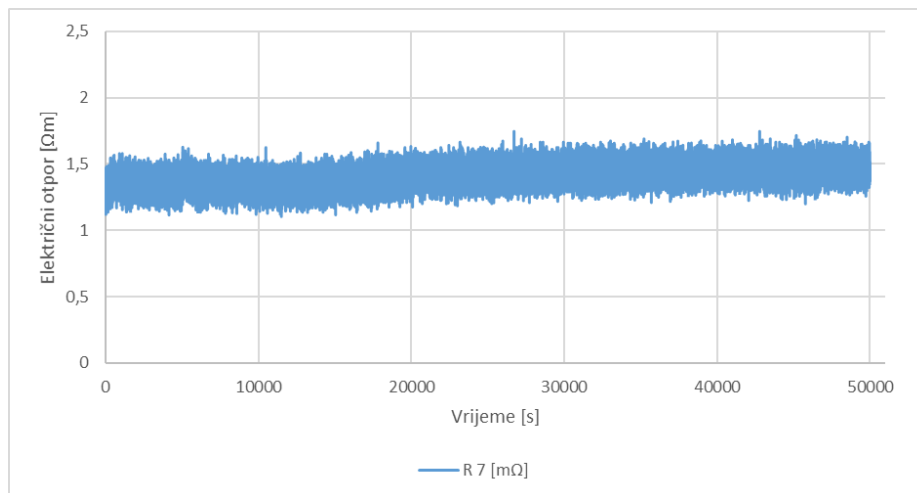
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 11, prevlaka na bazi kositra**



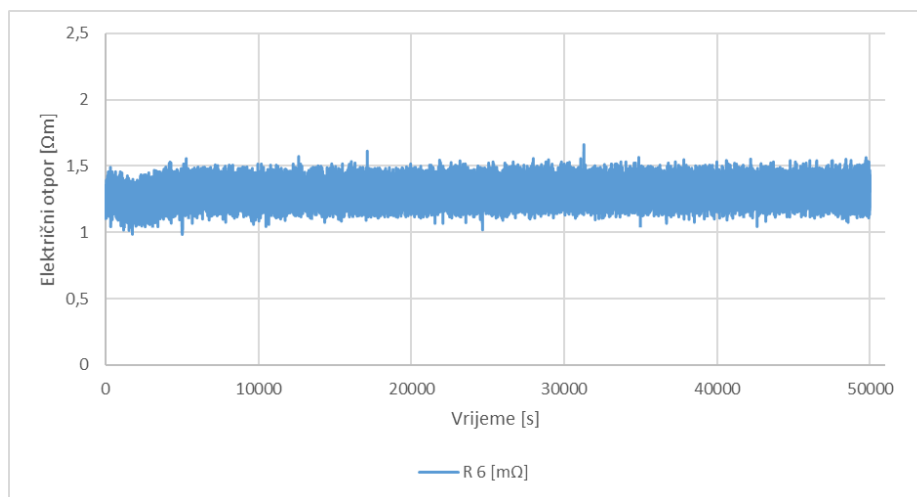
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 10, prevlaka na bazi kositra**



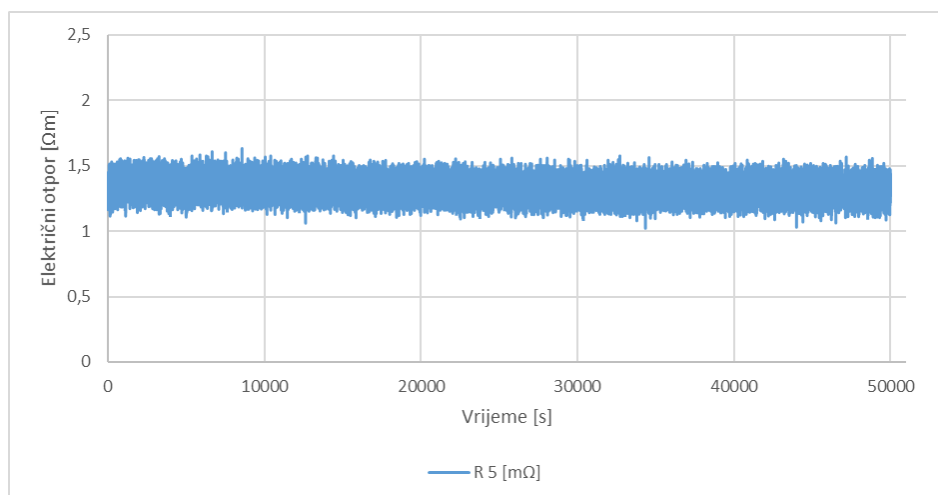
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 9, prevlaka na bazi kositra**



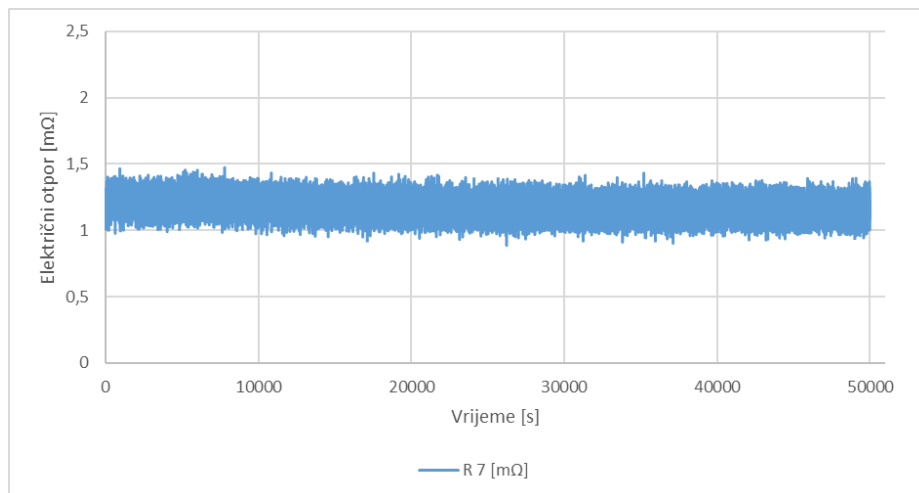
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 7, prevlaka na bazi zlata**



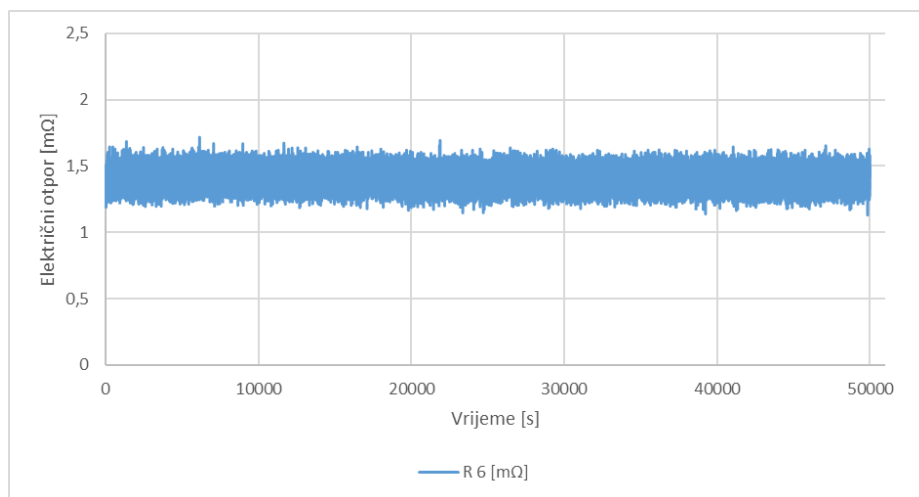
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 6, prevlaka na bazi zlata**



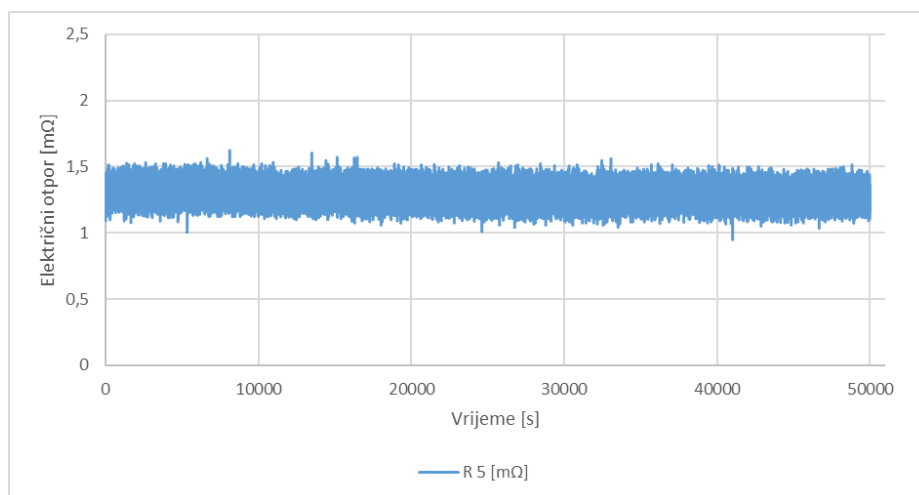
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 5, prevlaka na bazi zlata**



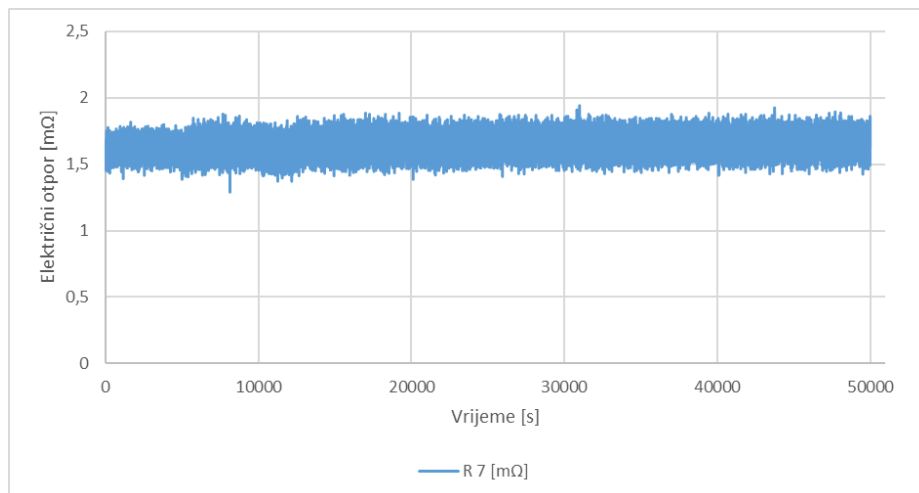
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 7, prevlaka na bazi srebra**



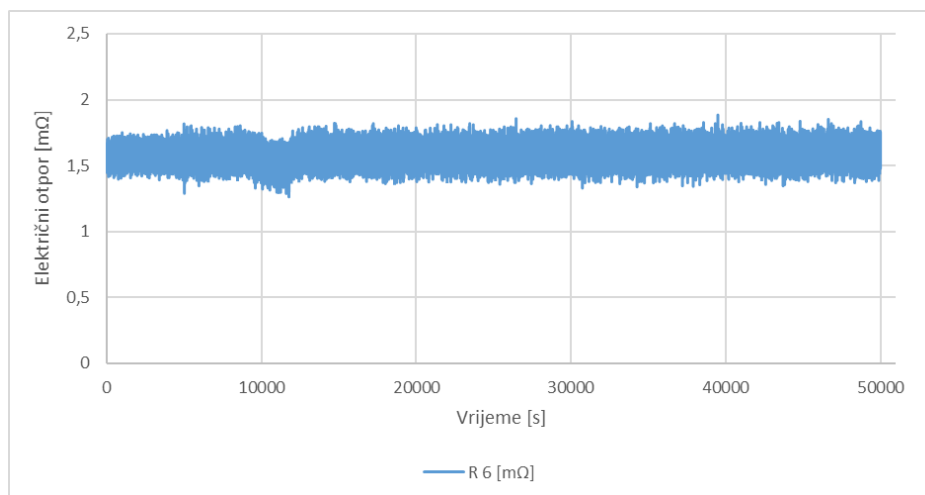
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 6, prevlaka na bazi srebra**



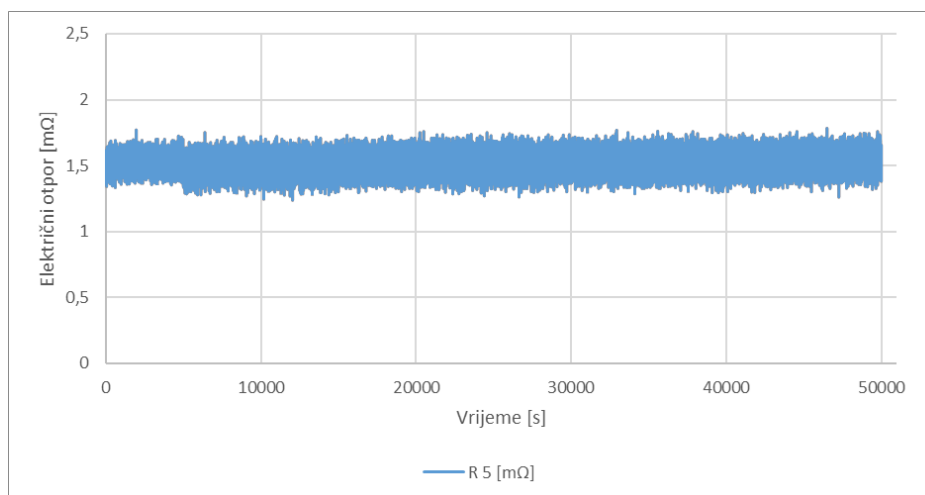
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 5, prevlaka na bazi srebra**



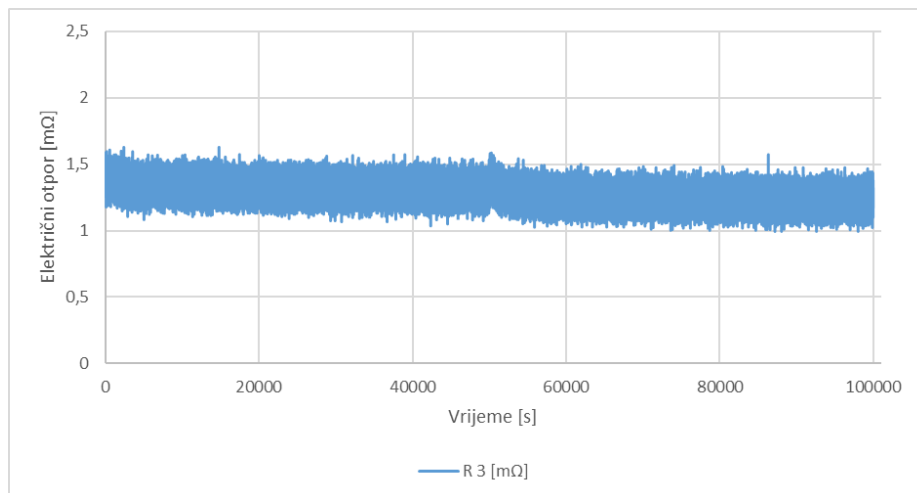
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 7, prevlaka na bazi kositra**



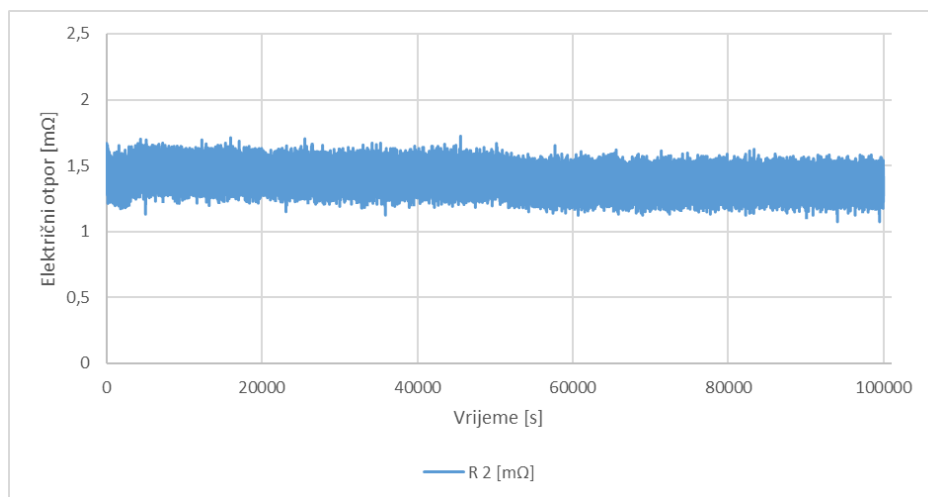
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 6, prevlaka na bazi kositra**



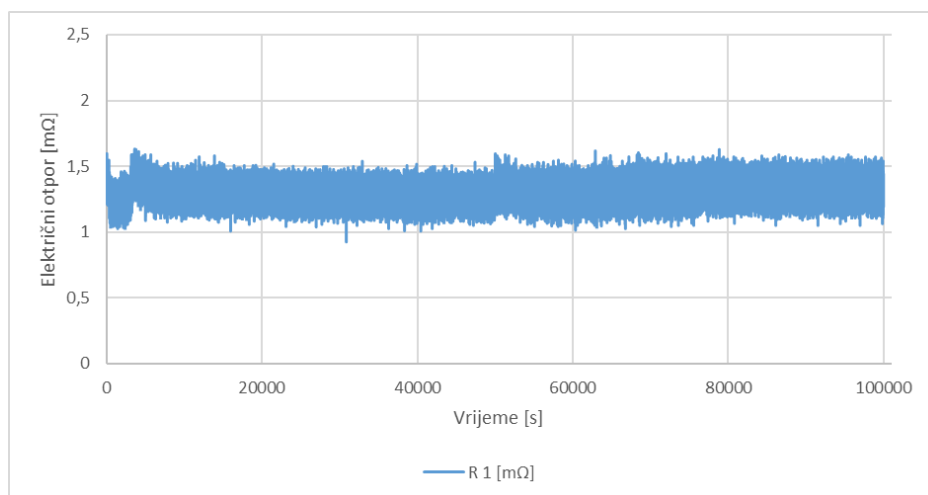
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 5, prevlaka na bazi kositra**



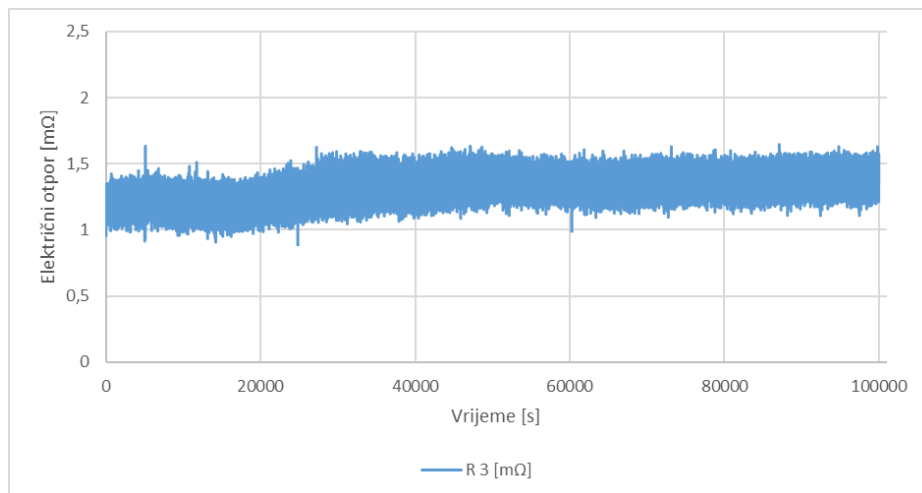
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 3, prevlaka na bazi zlata**



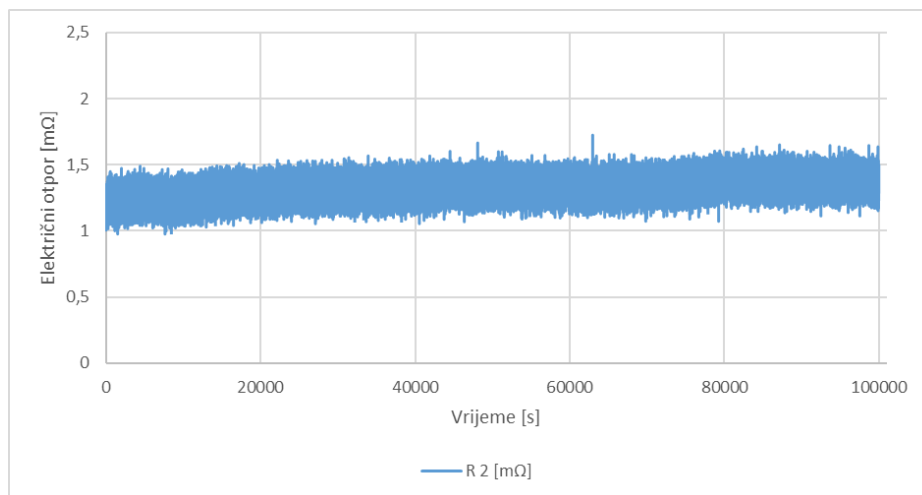
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi zlata**



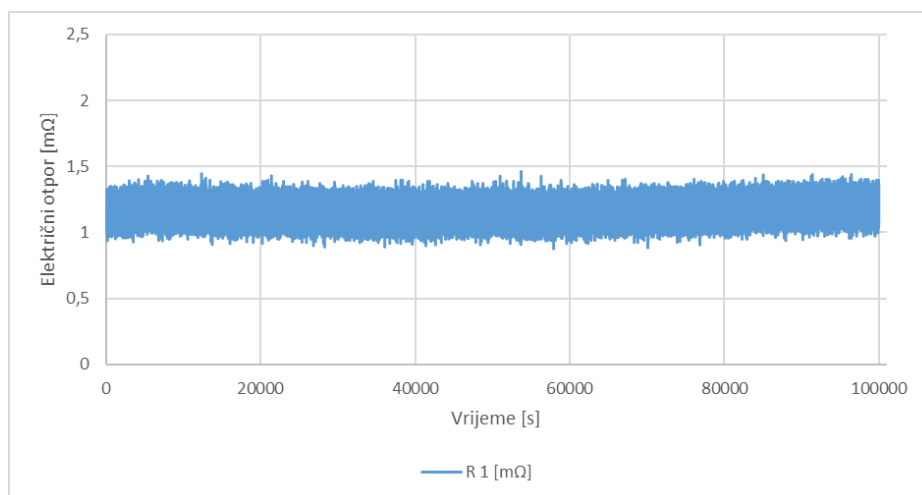
**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi zlata**



**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 3, prevlaka na bazi srebra**

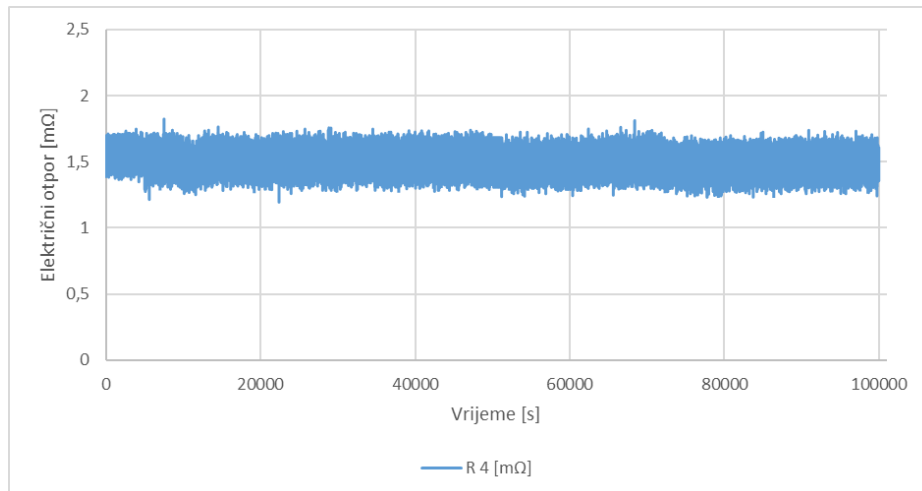


**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 2, prevlaka na bazi srebra**

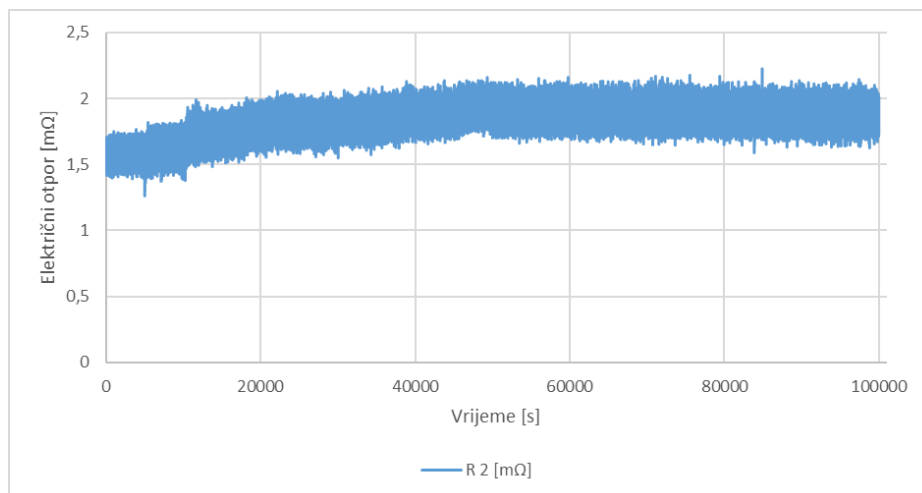


**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 1, prevlaka na bazi srebra**

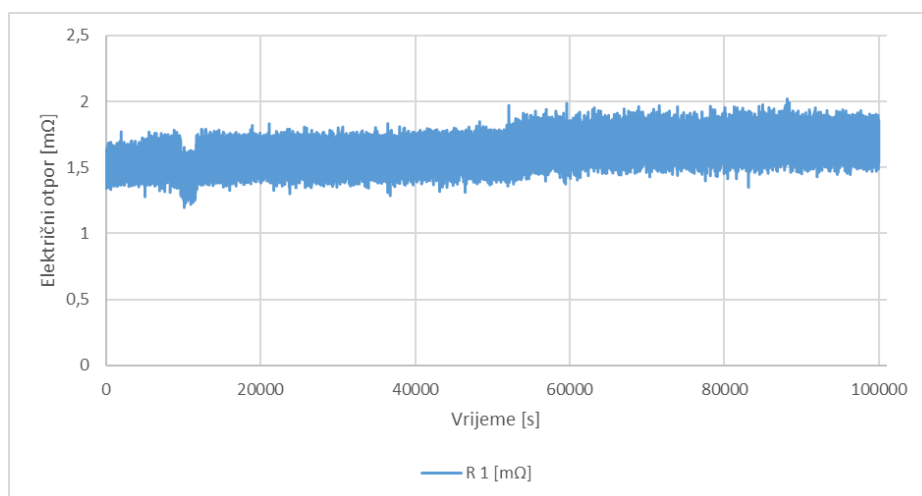




**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 4, prevlaka na bazi kositra**



**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 2, prevlaka na bazi kositra**



**Krivulja promjene električnog otpora – uzorak 1, prevlaka na bazi kositra**

## **Prilog 2**

**PG 16 Reibkorrosion**

Zweck: Abriebfestigkeit der Oberflächenveredelung (zerstörende Prüfung)  
„Fingerprint“ / Momentaufnahme der Kontaktoberfläche

Losgröße: 3 Kontaktteile  
Kontaktteile: alle vorkommenden Werkstoff- / Oberflächenkombinationen,  
alle vorkommende Lubrikate  
Gehäuse: ohne

**Art der Prüfung:**

E 0.1 Sichtprüfung DIN EN 60512-1-1

E 16.0 Durchgangswiderstand, kontinuierliche Überwachung während B 16.1, Aufzeichnung  
und Speichern:

Messfrequenz: 4 Hz

B 16.1 Reibbeanspruchung

Reibweg: 50  $\mu\text{m}$

Zykluszeit: 1 Hz

Zykluszahl: 100 000

Elektrische Last: max. 100 mV, 10 mA

E 0.1 Sichtprüfung DIN EN 60512-1-1

**Anforderung:**

Diagramm: Verlauf des Durchgangswiderstands über die Zykluszahl

Angabe der Reibzykluszahl zum Erreichen des Durchgangswiderstandes von 300 m $\Omega$

Angabe der verwendeten Lubrikate (Material und Menge)