



## PONAŠANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA U KOMBINIRANIM UVJETIMA TROŠENJA

Goran Rozing<sup>1</sup>, Antun Pintarić<sup>2</sup>, Desimir Jovanović<sup>3</sup>, Vlatko Marušić<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Elektrotehnički fakultet Osijek, Hrvatska, [goran.rozing@etfos.hr](mailto:goran.rozing@etfos.hr)

<sup>2</sup>Elektrotehnički fakultet Osijek, Hrvatska, [antun.pintaric@etfos.hr](mailto:antun.pintaric@etfos.hr)

<sup>3</sup>Zastava oružje, Srbija, [j.desimir@gmail.com](mailto:j.desimir@gmail.com)

<sup>4</sup>Strojarski fakultet Slavonski Brod, Hrvatska, [vlatko.marusic@sfsb.hr](mailto:vlatko.marusic@sfsb.hr)

**Apstrakt:** Glavna karika u proizvodnji sirovog ulja svakako je pužna preša, koja služi za isprešavanje i cijedenje ulja iz samljevenog i zagrijanog uljnog sjemenja. U tijeku tog procesa dolazi do odnošenja čestica metala s radnih površina preše, iz čega se može zaključiti da tribosustav čine, radni dijelovi preše i suncokretovo sjemenje. Osim navedenog neizbježnog trošenja, u ovom radu analiziran je i utjecaj korozijskog trošenja dijelova pužne preše nastalog kao posljedica agresivnog djelovanja medija. Navedena trošenja ukazuju da kod pužne preše prevladavaju kombinirani uvjeti trošenja. Na ispitnim uzorcima izrađenim od austenitnih korozijskih postojanih čelika AISI 316L i AISI 304 provedeno je nitrokarburiranje u cilju povećanja tvrdoće u površinskom sloju, koja dovodi do povoljnijih triboloških svojstava. Za potrebe eksperimentalnog rada provedena su ispitivanja korozijskog ponašanja uzoraka, ispitivanja kemijskog sastava osnovnog materijala, mehaničkih svojstava i analiza mikrostrukture. Zaključeno je da se mogući pristup produljenju vijeka dijelova sastoji ne samo u materijalu nego i u izboru postupka toplinske obrade, kojom će se postići povećanje tvrdoće odnosno povoljnija tribološka svojstva uz zadovoljavajuću korozijsku otpornost.

**Ključne reči:** trošenje, pužna preša, nehrđajući čelici, nitrokarburiranje, korozijska otpornost

### 1. UVOD

Problemi trenja i trošenja u praksi su vrlo kompleksni zbog odvijanja mnogostrukih triboloških procesa. Stoga je nužna brižljiva neposredna i posredna analiza svih komponenata i utjecaja u tribosustavu [1]. Jedan od takvih kompleksnih primjera trošenja je i pužna preša, koja služi za isprešavanje i cijedenje ulja iz samljevenog i zagrijanog uljnog sjemenja. Proces cijedenja jestivog ulja ovisi o mnogo parametara koji se mijenjaju u ovisnosti o vrsti uljnog sjemenja, načinu njegove pripreme i tipu preše. Nakon djelomičnog ljuštenja i kondicioniranja vodenom parom, pripremljeno sjemenje mehaničkim putem se cijedi u pužnoj preši. U tijeku tog procesa dolazi do odnošenja čestica metala s radnih površina preše, iz čega se može zaključiti da tribosustav čine, radni dijelovi preše i suncokretovo sjemenje. Uzroci trošenja radnih dijelova preše (segmenata pužnice, jarmova i

noževa cjedilne korpe) su djelovanje čestica mikroabraziva  $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$  u suncokretovom sjemenju [2]. Mikroabraziv sadržan u ljusci suncokreta troši radne dijelove preše a taj proces je nemoguće izbjeći. Trošenje se manifestira oštećivanjem napadnih bridova radnih dijelova preše tj. smanjenja njihovih dimenzija i promjene geometrije profila. Kao rezultat toga dolazi do smanjenja efikasnosti cijedenja ulja [3]. Osim spomenutog neizbježnog trošenja nakon 4,5 godine (16630 sati) rada nastupilo je oštećenje izazvano djelovanjem agresivnog medija (kisele supare), a manifestiralo se pojavom tribokorozije na dosjednim dijelovima reduktora koje su u kontaktu s dosjednim površinama cjedila. Tadašnji pristup produljenju vijeka istrošenih dosjednih površina sastojao se od zamjene istrošenih površina poluprstenovima izrađenim od korozijski postojanih čelika (EN X2CrNiMo18, AISI 316L, EN) i (EN X5CrNi18-10, AISI 304) u sirovom stanju. Opisana trošenja ukazuju da kod pužne

preše prevladavaju kombinirani uvjeti trošenja koji se mogu opisati kao proces koji vodi ka degradaciji metalnih materijala, koja je rezultat mehaničkog kontakta, kombiniranog sa korozijskim djelovanjem agresivne okoline.

## 2. ISPITIVANJA UZORAKA/DIJELOVA U PUŽNOJ PREŠI ZA ZAVRŠNO PREŠANJE

Iz iskustva proizilazi da je trenje i trošenje materijala svojstvo sustava, jer na procese osim materijala elemenata tribosustava utječe konstrukcijska izvedba tribosustava, vrste i način opterećenja te naprezanja, način podmazivanja i drugi čimbenici. Stoga se svaki problem mora rješavati individualno, ali uzimajući u obzir temeljne parametre i utjecajne veličine u tribosustavu [1]. Nakon što su poluprsteni dvije kampanje rada pužne preše za završno prešanje kapaciteta  $\approx 100t/dan$  bili u uporabi, prema prethodnom dogovoru, preša je rastavljena u cilju vađenja ispitnih poluprstena. Obavljena je vizualna kontrola površina na kojima su bili ugrađeni ispitni poluprsteni. S obzirom na to da su svi poluprsteni radili u istim uvjetima, odnosno da se vizualno ne uočavaju razlike u izgledu poluprstena dosjedne i zaptivne površine, ocjenjeno je da su za potrebe istraživanja u ovome radu i donošenje odgovarajućih zaključaka dovoljni poluprsteni s reduktora i s dosjedne površine cjedila. Na slici 1 prikazan je vanjski izgled poluprstena na svim površinama prije skidanja za potrebe ispitivanja.



**Slika 1.** Vrat kućišta reduktora i površine polutke cjedila prije skidanja poluprstena

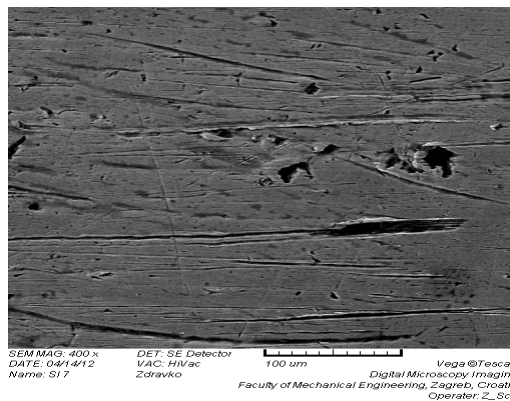
Odgovarajućim strugačima pažljivo su skinuti uzorci koruzijskih produkata za potrebe kemijske analize. Utvrđeno je da u sastavu dominira koruzijski produkt željezni oksid tipa  $FeO/Fe_2O_3$ , ali i da su prisutni tragovi čestica organskog porijekla iz mliva. Puno je bitniji podatak da je analizom kisele supare utvrđeno da se radi o kiselini karbonilnog tipa (zbog prisustva isparljivih masnih kiselina) i još važnije da izmjereni pH supare iznosi iznosi oko 5,2. Obavljen je vizualni

pregled površina svih skinutih poluprstena. Karakteristično je uočiti da se golim okom ne uočavaju pojave koruzijskih oštećenja, ali da su prisutni tanki slojevi praškastih taloga, najvjerojatnije mješavine koruzijskih produkata osnovnog materijala kućišta/cjedila (GS-42CrMo4) i sitnih čestica mliva. Izgled površine poluprstena na vratu kućišta reduktora i polutke cjedila preše prikazan je na slici 2.

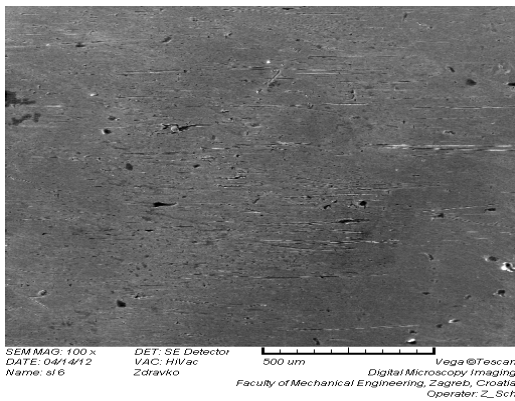


**Slika 2.** Poluprsten prije demontaže s praškastim talozima nakon ispitivanja uporabom u preši tip EP 16

Bitno je istaknuti da se na površinama osnovnog materijala kako kućišta reduktora, tako i cjedila uočava prisustvo taloga ali i da su te površine intenzivno oštećene koruzijom, pri čemu se dubina oštećenja može procijeniti na 3 do 4 mm. Dimenzionalnom kontrolom pomoću pomičnog mjerila utvrđeno je da nije došlo do smanjenja debljine niti jednog poluprstena, na svima je izmjerena debljina 7 mm. Detaljnim pregledom vanjskih površina svih poluprstena, promatranjem pod SEM TOPO (skening elektronskim mikroskopom), utvrđeno je da se mogu uočiti tragovi nastali kao posljedica abrazijskog trošenja sitnim česticama mliva, zatim adhezijom uslijed kontakta poluprstena vrata reduktora s poluprstenom dosjedne površine, ali i oštećenja u formi rupica kao posljedica koruzije, slika 3. Na unutarnjim površinama, koje su bile dotegnute na osnovni materijal, promatranjem pod SEM TOPO uočeno je lokalno rupičasto oštećenje, slika 4.



**Slika 3.** Karakteristični izgled vanjske površine poluprstena nakon uporabe, SEM TOPO



**Slika 4.** Karakteristični izgled unutarnje površine poluprstena nakon uporabe, SEM TOPO

To je oštećenje najvjerojatnije posljedica djelovanja kombinacije kiselina karbonilnog tipa i vodene pare koje su se nakon kondenziranja „slijevale“ preko dijelova preše i ipak prodrle u zonu kontakta poluprsten/osnovni materijal, bez obzira na to što su napravom stegnute, pri čemu je silikonska brtva trebala onemogućiti prodor supare. Izabrani nadomjesni materijali AISI 316L i AISI 304 po svom kemijskom sastavu spadaju u grupu austenitnih nehrđajućih čelika, koji imaju primjenu u prehrambenoj i procesnoj industriji. Naime, ukupno su u dva ciklusa bili u proizvodnom procesu oko 5000 sati (kroz dvije kalendarske godine). U odnosu na materijal kućišta GS-42CrMo4 znatno su se pokazali postojanijima. Na poluprstenima izrađenim iz varijantnih materijala

**Tablica 1.** Rezultati ispitivanja kemijskog sastava uzoraka 316L i 304

Materijal	Kemijski sastav [%]									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	W	Ti	Fe
316L	0,048	1,224	0,438	16,71	10,08	2,124	0,124	0,185	0,112	68,40
304	0,045	1,295	0,651	18,02	8,11	0,414	0,114	80,19	0,007	70,68

Tvrdoća i otpornost trošenju austenitnih nehrđajućih čelika može se bitno povećati, a da pri tome ne dolazi do značajnog gubitka otpornosti na koroziju. Jedan od pristupa kako bi se povećala površinska tvrdoća i otpornost trošenju čelika je postupak nitriranja koji nudi visokodimenzijisku stabilnost obratka [4]. Nitriranje je postupak otvrdnjavanja površine difuzijom dušika u površinske slojeve i promjena kemijskog sastava čelika [5]. Obzirom na to da na varijantnim materijalima poluprstena nisu nakon uporabe uočena korozivna oštećenja koja bi svojim intenzitetom bila uzročnik prestanka funkcionalnog rada pužne preše, zaključeno je da bi se nitrokarburiranjem varijantnih materijala moglo doprinjeti bitnom povećanju tvrdoće u površinskom sloju koja bi se odrazila na povoljnija tribološka svojstva i produljenje vijeka tribosustava pužnih

utvrđeni su isti mehanizmi trošenja, pri čemu nisu uočene značajnije razlike u intenzitetu, kako abrazijskog i adhezijskog tako i korozivnog, bez obzira na razlike u kemijskom sastavu. Tvrdoća ugrađenog nadomjesnog materijala je iznosila oko 170÷180 HV, što se u pogonskim uvjetima pokazalo relativno dostatno, a to potvrđuju i mikroskopski snimci (slika 3 i 4) koji pokazuju tragove abrazijskog trošenja, adhezije ali i rupičaste korozije. Prva dva mehanizma trošenja su prisutnija na vanjskoj strani poluprstena cjedila, dok je treći mehanizam prisutniji na unutarnjoj strani. Razloge pojave abrazijskog trošenja treba tražiti u sastavu mliva točnije u sadržaju  $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$  iz ljuske suncokreta kao glavnog nositelja abrazivnih svojstava ljuske suncokreta. Pojavu rupičaste korozije može se pojasniti zbog prisutnosti tzv. “kisele supare”.

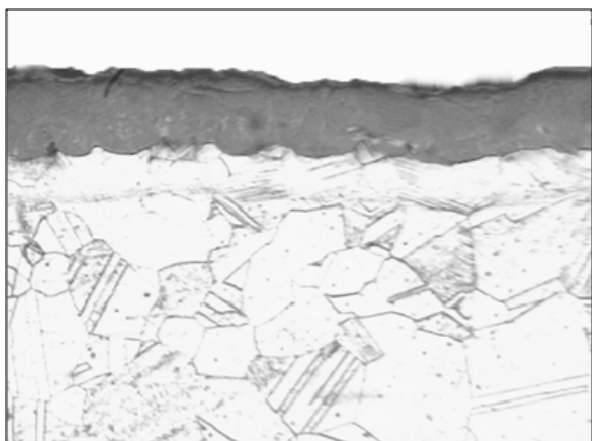
### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivanja kemijskog sastava provedena su na uzorcima oba varijantna čelika u dostavnom stanju. Kemijskom analizom materijala određen je sastav prisutnih elemenata. Za određivanje kemijskog sastava korištena je spektrometrijska metoda, a ispitivanja su izvršena uređajem BELEC. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava uzoraka (materijal EN X2CrNiMo18-14-3, AISI 316L i materijal EN X5CrNi18-10, AISI 304) prikazani su u tablici 1.

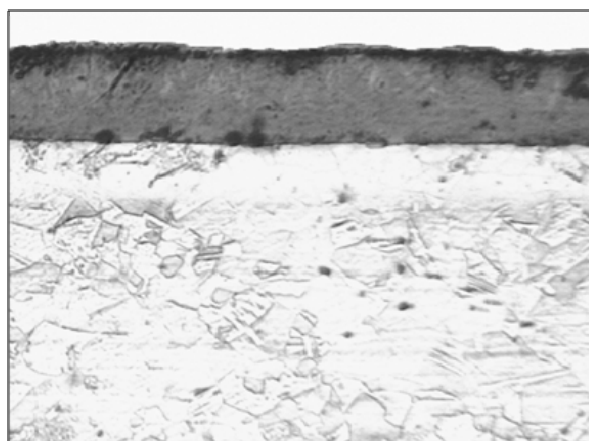
preša za završno prešanje. Postupak nitrokarburiranja bio je sljedeći: uzorci su prvo predgrijani na temperaturu  $v_p=380^\circ\text{C}$ , u trajanju od 3 sata i potom uronjeni u solnu kupku (volumena  $1\text{m}^3$ ) zagrijanu na  $580^\circ\text{C}$  u trajanju od 5 sati. Nakon toga uzorci su hlađeni na zraku.

#### 3.1 Ispitivanje strukture varijantnih materijala nakon nitrokarburiranja

Metalografska ispitivanja uzoraka oba varijantna materijala nakon nitrokarburiranja daju cjelovitu sliku o njihovom mikrostrukturnom stanju. Analiza mikrostrukture uzoraka obrađenih postupkom nitriranja omogućava promatranje i ruba i jezgre ispitnog uzorka. Mikrostruktura rubnog dijela nitrokarburiranih uzoraka čelika AISI 316L i AISI 304 prikazana je na slici 5.



a)

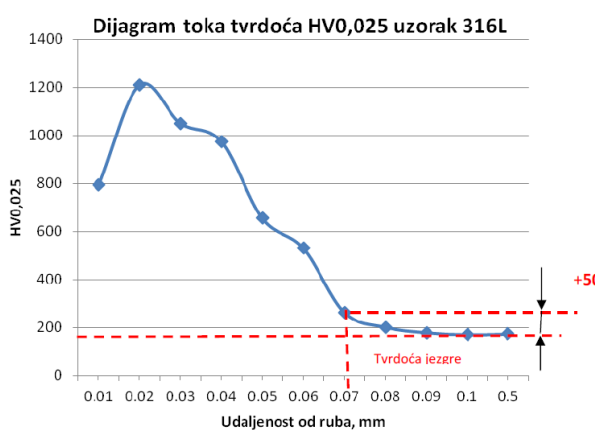


b)

**Slika 5.** Karakteristična mikrostruktura nitriranog čelika, povećanje 240x  
a) uzorak 316L, b) uzorak 304

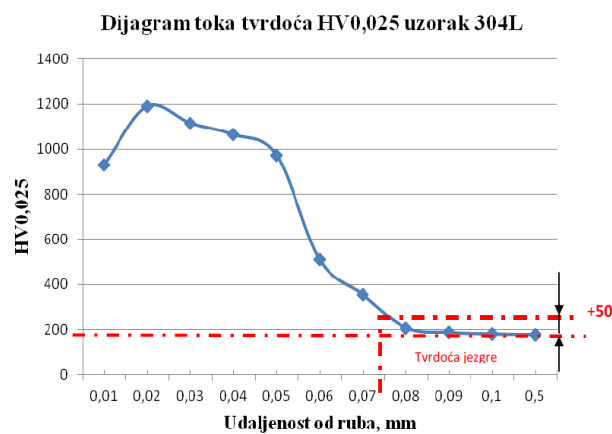
### 3.2 Ispitivanje mikrotvrdoća varijantnih materijala nakon nitrokarburiranja

Ispitivanje mikrotvrdoća provedena su uređajem DURIMET Leitz metodom Vickers HV 0,025



a)

(opterećenje 0,25 N) i HV 0,5 (opterećenje 5 N), na kojemu je obavljeno i mjerenje tvrdoće osnovnih varijantnih materijala. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoća uzoraka oba čelika metodom Vickers HV0,025 dijagramski su prikazani na slici 6



b)

**Slika 6.** Dijagramski prikaz toka mikrotvrdoća i određivanja dubine nitriranog sloja uzorka čelika, a) 316L i b) 304

Izmjerene vrijednosti tvrdoća poboljšanog uzorka čeličnog lijeva (materijal GS-42CrMo4) kreću se od 230 do 280 HV 0,5.

### 3.3 Elektrokemijska korozijska ispitivanja modificiranih površina uzoraka

U eksperimentalnom dijelu ispitana su elektrokemijska svojstva nekih čelika oznaka AISI 316L, AISI 304 i GS-42CrMo4 u zasićenoj vodenoj otopini s CO<sub>2</sub>, vrijednosti pH 4,8 do 5 pri temperaturi 50°C, kako bi se simulirali stvarni uvjeti agresivne okoline u kojima se odvija trošenje radnih dijelova preše. Uzorci za ispitivanje pripremljeni su na dimenziju Ø16x8 mm. Elektrokemijska korozijska DC ispitivanja provedena su sukladno normi ASTM G5-94 [6] na

uređaju Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E uz primjenu programa SoftCorr III u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenja su provedena u odnosu na referentnu zasićenu kalomel elektrodu (ZKE) poznatog potencijala + 0,242 V prema standardnoj vodikovoj elektrodi. Određeni su parametri opće korozije: korozijski potencijal ( $E_{cor}$ ), gustoća korozijske struje ( $j_{cor}$ ), brzina korozije ( $v_{kor}$ ), polarizacijski otpor ( $R_p$ ), pitting potencijal ( $E_{pit}$ ) i zaštitni pitting potencijal ( $E_{zpit}$ ). Korozijski potencijal  $E_{cor}$  određen je mjerenjem promjene potencijala u vremenu od 1000 s. Polarizacijski otpor materijala  $R_p$  je određen iz Tafelovog dijagrama za područje polarizacije  $\pm 20$  mV u odnosu na korozijski potencijal. Rezultati elektrokemijskih ispitivanja prikazani su u tablici 2.

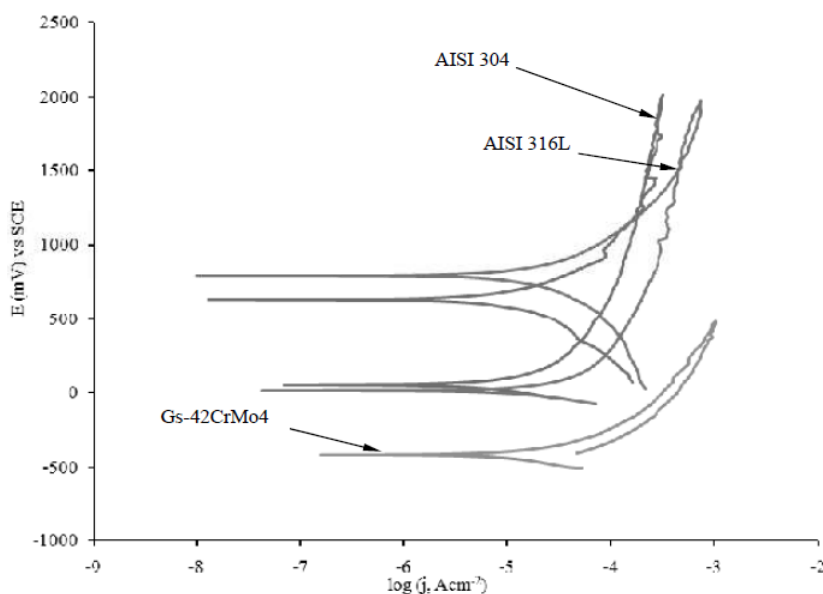


**Tablica 2.** Rezultati elektrokemijskih korozijskih ispitivanja uzoraka

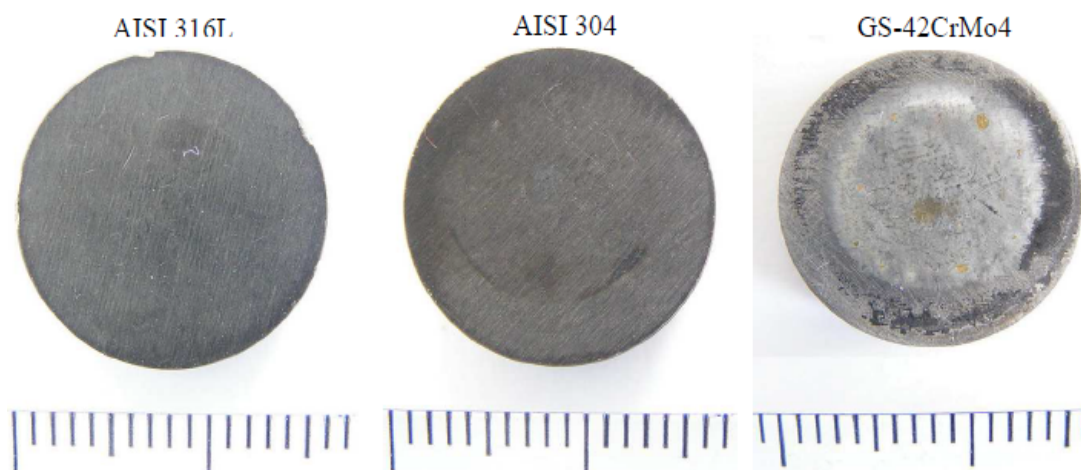
Materijal/stanje	$\beta_A$ [V/dek]	$\beta_K$ [V/dek]	$J_{cor}$ [ $\mu A/cm^2$ ]	$V_{cor}$ [mm/god]	$R_p$ [ $\Omega cm^2$ ]
AISI304, nitrirano	0,078	0,103	6,62	0,067	3282
AISI316L, nitrirano	0,988	0,039	6,71	0,069	5254
GS-42CrMo4, poboljšano	0,088	0,598	86,62	1,003	250

Ciklička potenciodinamička polarizacijska mjerenja provedena su na uzorcima AISI 316L, AISI 304 i GS-42CrMo4 u zasićenoj vodenoj otopini s CO<sub>2</sub>,

vrijednosti pH 4,8 do 5 pri temperaturi 50°C. Na slici 7 prikazan je dijagram cikličke polarizacije, a na slici 8 makrostrukturnalne snimke uzoraka.



**Slika 7.** Dijagram cikličke polarizacije nitriranog uzorka 316L, 304 i poboljšanog uzorka GS-42CrMo4



**Slika 8.** Makro prikaz površine nitriranog uzorka 316L, 304 i poboljšanog uzorka GS-42CrMo4 nakon cikličke polarizacije

#### 4. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Na poluprstenima izrađenim iz varijantnih materijala različitog kemijskog sastava utvrđeni su isti mehanizmi trošenja, pri čemu nisu uočene značajnije razlike u intenzitetu, kako abrazijskog i adhezijskog tako i korozijskog trošenja. Analizom uvjeta rada pužnih preša za završno prešanje

zaključeno je da se abrazivno djelovanje vrlo tvrdog SiO<sub>2</sub> x nH<sub>2</sub>O (oko 1100 HV) ne može izbjeći, ali se može smanjiti povećanjem tvrdoće dijelova preše. U tome smislu zaključeno je da bi se nitriranjem varijantnih materijala moglo doprinijeti bitnom povećanju produljenja vijeka reprezentantnog tribosustava pužnih preša za završno prešanje. Na uzorcima izrađenim iz

varijantnih materijala u dostavnom stanju i u nitriranom stanju te na uzorcima osnovnog materijala provedena su ispitivanja otpornosti na elektrokemijsku koroziju, kako bi se simulirali uvjeti agresivne okoline u kojima se odvija rad dijelova preše. Rezultati elektrokemijskih ispitivanja prikazanih u tablici 2, ukazuju da materijali AISI 316L i AISI 304 imaju dvadeset puta veće vrijednosti polarizacijskog otpora  $R_p$  u odnosu na materijal GS-42CrMo4. Vrijednost brzine korozije za austenitne korozijski postojane čelike je podjednaka i četrnaest puta je manja nego za čelični lijev GS-42CrMo4. Iz dijagrama cikličkih polarizacija (slika 7) vidljivo je da nitrirani uzorci austenitnih čelika 316L i 304 ne pokazuju sklonost rupičastoj koroziji niti koroziji u procjepu, dok materijala GS-42CrMo4 pokazuje sklonost rupičastoj koroziji i koroziji u procjepu što potvrđuje makrostrukturalna snimka površine nakon ispitivanja. Analizom navedenih podataka može se potvrditi da se postupkom nitrokarburiranja u solnoj kupki znatno povećava tvrdoća površine što je bio jedan od traženih zahtjeva. Istovremeno dolazi do povećanja brzine korozije ( $0,067 \div 0,069$  mm/god), ali ta brzina je znatno manja od granične vrijednosti koja iznosi 0,1 mm/god, prema kriteriju primjenjivosti metala s

obzirom na prosječnu brzinu prodiranja opće korozije.

## LITERATURA

- [1] T. Filetin, K. Grilec: *Postupci modificiranja i prevlačenja površina*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [2] V. Ivušić, V. Marušić, K. Grilec: *Abrasion resistance of surface layers*, VTT Symposium 180& COST516 Tribology Symposium, VTT Technical Research Centre of Finland, pp. 201-210, 1998.
- [3] G. Rozing, M. Katinić, V. Marušić: *Neke specifičnosti utjecaja dominantnog mehanizma trošenja na pristup održavanju pužnih preša*, 16. Međunarodno savjetovanje ODRŽAVANJE 2010 Zagreb: HDO Hrvatsko-društvo održavatelja, pp. 120-126, 2010.
- [4] B. Vasiljević, B. Nedić: *Modifikovanje površina*, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 2003.
- [5] A. Triwiyanto, P. Hussain, A. Rahman, M.C. Ismail: *The Influence of Nitriding Time of AISI 316L Stainless Steel on Microstructure and Tribological Properties*, Asian Journal of Scientific Research, Vol.6, pp.323-330, 2013.
- [6] ASTM G5 – 94: Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.

## STAINLESS STEEL BEHAVIOR UNDER COMBINED CONDITIONS OF WEAR

**Abstract:** *The key element in the production of raw oil is definitely the worm press, which is used for pressing and extrusion of oil from ground and heated oil seeds. During this process, metal particles are worn from the working surfaces of the press, which indicates that the tribosystem consists of working parts of the press and sunflower seeds. Next to the aforementioned unavoidable wear, damage due to aggressive media was also observed. Wear described above indicate that at worm press overcome combined wear conditions. On the test samples made of austenitic stainless steel AISI 316L and AISI 304 nitrocarburising was conducted to increase hardness in surface layer, which leads to better tribological properties. In the experimental part of paper, there were tested corrosion behaviour of samples, chemical composition of base material, mechanical properties and microstructure analysis. It was concluded that possible extension of life time consists not only in material but also in heat treatment selection, by which increase of hardness will be achieved with reference to better tribological properties with satisfactory corrosion resistance.*

**Keywords:** *wear, worm press, stainless steel, nitrocarburising, corrosion resistance*