

# MOGUĆNOST PRIMJENE NEKIH ČELIKA ZA IZRADU ELEMENATA ELEVATORA IZLOŽENIH TRIBOKOROZIJI

## APPLICATION CAPABILITY OF SOME STEELS FOR ELEMENTS CONSTRUCTION OF ELEVATOR EXPOSED TO TRIBOCORROSION

Ivan Opačak<sup>1</sup>, Mijat Samardžić<sup>2</sup>, Ante Marušić<sup>1</sup>, Nikolina Berić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2, Slavonski Brod, Hrvatska  
<sup>2</sup> Đuro Đaković Termoenergetika postrojenja d.o.o, Dr. Mile Budaka 1, Slavonski Brod, Hrvatska

**Ključne riječi:** tribokorozija, elementi lanca, trošenje, analiza

**Key words:** tribocorrosion, chain elements, wear, analysis

**Sažetak:** U procesu deguminacije sirovog ulja nastaje deguminacijski talog koji se dodaje suncokretovoj pogači kao balast prilikom transporta do hladionika. Talog sadrži fosfatide koji sa suncokretovom pogačom tijekom biološke razgradnje čine masne kiseline. Segmenti lanca čine tribosustav kada na njih djeluju sastojci masnih kiselina iz uljne pogače. Dijelovi lanca (čahure i svornjaci) izrađeni su od austenitnog nehrđajućeg čelika. Glavni uzrok njihovog trošenja je prisustvo masnih kiselina u uljnoj pogači koje na kontaktним površinama elemenata lanca uzrokuju pojavu tribokorozije. Trošenje se manifestira oštećivanjem spojnog mjesta (lamela-čahura), a kao rezultat toga je povećanje koraka lanca i „naskakanje“ na tjeme zuba lančanika, što uzrokuje pojavu nedopuštenih sila istezanja i kidanja spojnog mjesta lanca.

**Abstract:** In the process of degumination of crude oil, a degumination precipitate is formed, which is added to sunflower scones as ballast when transported to the icebox. Precipitate contains phosphatides, which with sunflower scones during biological decomposition make up fatty acids. Segments of the chain form a tribosystem when they are affected by fatty acid ingredients from oil scones. Parts of the chain (shells and bolts) are made of austenite stainless steel. The main cause of their wear is the presence of fatty acids in the oil scone, which on the contact surfaces of the chain elements cause the appearance of tribocorrosion. The wear is manifested in damage of contact place (flange-shell), and the result of that is the increase of chain pitch and “skipping” on vertex tooth of sprocket, what causes the appearance of illicit stretching forces and tearing of chain contact place.

### 1 UVOD

U pogonu prešaone, pripremljeno suncokretovo sjemenje (mlivo) mehaničkim putem se cijedi u pužnoj preši. Nakon završnog prešanja, kao ostatak nakon iscjedivanja mliva, dobiva se suncokretova pogača. U tijeku transporta suncokretove pogače prema hladioniku, u pogaču se dodaje deguminacioni talog kao balast koji je nastao u procesu deguminacije sirovog ulja. Navedeni talog u sebi sadrži fosfatide koji se procesu biološke razgradnje sa suncokretovom pogačom tvore masne kiseline. Pogača se putem vjedričnog elevatorsa transportira na proces mljevenja pogače. Nakon procesa mljevenja, pogaču je potrebno ohladiti i vanjskim vjedričnim elevotorom transportirati na skladištenje u dnevni spremnik. [1]

Tribologija je definirana kao znanost i tehnologija o međusobnim površinama u relativnom gibanju. Uključuje proučavanje i primjenu načela trenja, podmazivanja i trošenja[2]. Do otkaza, odnosno prestanka funkcionalnog rada dijelova, najčešće može doći uslijed loma i uslijed trošenja, iako su mogući i drugi uzroci. Dok je havarija posve nepredvidljiv, najčešće trenutačan proces, dotele je trošenje materijala uglavnom postupno, ali ipak limitirajuće za vijek trajanja dijelova. Stoga je jedan od krajanjih ciljeva izučavanja procesa trošenja omogućiti rad dijelova u danim uvjetima uz poznate i prihvatljive vrijednosti trenja i trošenja [3].

U ovom radu analizom je obuhvaćen lanac vjedričnog elevatorsa suncokretove pogače, kapaciteta oko 250 t/dan. U tijeku transporta pogače, troše se površine dijelova lanca koje su u kontaktu sa pogačom. Tribosustav čine, dijelovi lanca u uvjetima djelovanja nekih sastojaka masnih kiselina prisutnih u suncokretovoj pogači. Uzrok trošenja dijelova lanca (čahure i svornjaci) izrađenih od austenitnog koroziji postojanog čelika u prvom redu je prisustvo masnih kiselina u pogači, koje dovode do pojave tribokorozije na kontaktnim površinama elemenata lanca. Trošenje se manifestira oštećivanjem spojnog mjesta (vanjska lamela-svornjak), a kao rezultat toga je povećanje koraka lanca i „naskakanje“ na tjeme zuba lančanika, što uzrokuje pojavljivanje nedopuštenih sila istezanja i kidanja spojnog mjesta lanca. Osim spojnog mjesta lanca troše se i većina unutrašnjih lamela u kontaktu sa čahurom.

Nakon prve ugradnje na novoinstaliranom originalnom vanjskom i unutarnjem vjedričnom elevotoru suncokretove pogače, odnosno njegovom lancu, nakon kraćeg perioda uporabe uočena su prekomjerna oštećenja, makro vidljiva golim okom na lamelama, svornjacima i čahurama lanca elevatorsa. Ti su problemi uočeni već nakon tri mjeseca od ugradnje novog lanca, a tadašnji pristup rješavanju uočenog problema sastojao se u izradi dijelova lanca (čahure i svornjaci) od

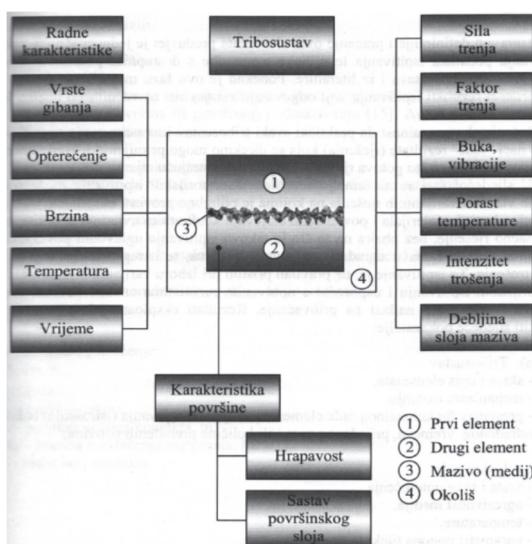
nehrđajućeg čelika. Kako je kapacitet elevatorsa 250 t/dan, vidljivo je da su gubici u slučaju zastoja veliki jer za posljedicu imaju zaustavljanje cijelog procesa proizvodnje. Proces proizvodnje se zaustavlja jer se ovim problemima onemogućava rad ostalim strojevima.



Slika 1. Prikaz oštećenog lanca u donjoj glavi elevatorskog transporterera

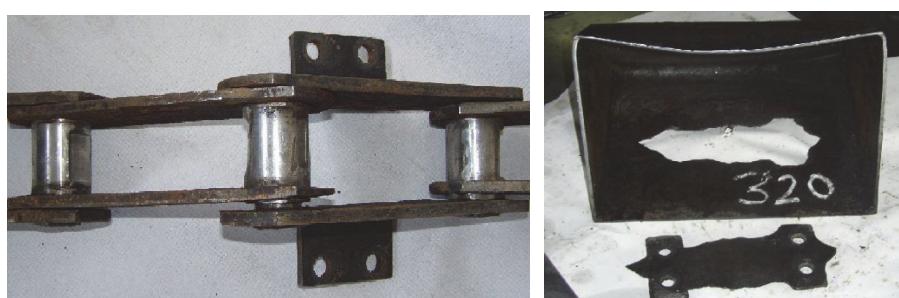
## 2 SNIMANJE STANJA ISTROŠENOSTI LANCA VJEDRIČNOG ELEVATORA

Tribologija se kroz analizu uzoraka bavi proučavanjem posljedica trenja i trošenja. Do utvrđivanja uzroka dolazi se praćenjem mjerljivih karakteristika i parametara tribosustava, slika 2. Jedan od nekoliko mogućih praćenja procesa trošenja je i mjerjenje promjene geometrije oblika. Promjena geometrije, a s time u vezi i dimenzija čvrstih elemenata tribosustava može ne samo poslužiti kao pokazatelj predstojećeg kvara, nego ukazuje i na to koji dio radne površine triboelementa je najizloženiji trošenju [3].



Slika 2. Karakteristike i parametri relevantni pri tribološkim istraživanjima [3]

U normalnim uvjetima rada eksploracijski vijek trajanja lančanog transporterera trebao bi se kretati oko dvije godine. Ponovno, nakon svega osam mjeseci rada elevatorsa, kojem su čahure i svornjaci lanca sada izrađeni od korozionski postojanog čelika uočeno je prekomjerno oštećivanje lanca. Zbog navedenog, neophodno je bilo izvršiti laboratorijska ispitivanja te na osnovu analize rezultata ispitivanja, utvrditi uzroke nastalih oštećenja lanca elevatorsa, slika 3.



Slika 3. Izgled oštećenog lanca (a) i otkinuta vjedrica s papuče (b)

Nakon vizualnog pregleda dostavljenog istrošenog lanca, izvršeno je njegovo rastavljanje. Dimenzionalnom kontrolom dijelova lanca koji svojim trošenjem uzrokuju promjenu koraka lanca izmjereno je sljedeće:

- lamela unutarnja, provrt Ø42 mm se istrošio 0,8 mm,
- čahura unutarnji promjer se istrošio 0,9 mm.

Jedan korak lanca dugačak je 160 mm. Na dužnom metru ima 6,25 triboparova koji trošenjem uzrokuju promjenu koraka (lamela, čahura i svornjak) u iznosu od 2 mm. Posljedica trošenja dijelova je produljenje lanca koje po dužnom metru iznosi 12,5 mm. Na dužini lanca od 32 m ukupno izduženje lanca iznosi 400 mm. Rezultat promjene koraka uslijed jakog trošenja lanca je otkidanje kofica s papuča, slika 3b.

### 3 ISPITIVANJE I ANALIZA REZULTATA OŠTEĆENIH DIJELOVA LANCA

Analizom je utvrđeno da se lančanički transporter uljne pogače izložen intenzivnom trošenju. Dimenzionalnom kontrolom je uočeno da su istrošenja sljedeća:

- lamela vanjska 0,8 mm,
- lamela unutarnja 0,8 mm,
- papuča vanjska 1,4 mm,
- papuča unutarnja 1,4 mm,
- svornjak se istrošio 2,4 mm,
- vanjski dio čahure istrošio se 2,3 mm, unutarnji dio čahure istrošio se 2,1 mm.

Nakon snimanja stanja i nakon izvršene dimenzionalne analize istrošenih dijelova lanca vjedričnog elevatorsa, moglo se pristupiti laboratorijskom dijelu ispitivanja koje se sastojalo od:

- a) ispitivanja kemijskog sastava materijala od kojih su izrađeni dijelovi lanca:

Utvrđeno je da su lamele (vanjska i unutarnja) izrađene od čelika za poboljšavanje C45E, dok su svornjaci Ø30 mm i čahura (Ø 42/Ø 30 x 65 mm) izrađeni od korozijski postojanog čelika X5 CrNiMo 17-12-2.

- b) ispitivanja mehaničkih svojstava:

Ispitivanja mehaničkih svojstava lamela, provedena su statičkim vlačnim pokusom, a njihovi rezultati prikazani su u tablici 1. Nazivne debljine lamela i papuča iznosile su 8 mm. S obzirom na nastala korozionska oštećenja lamela i papuča, vanjske površine ispitnih uzoraka su morale biti obrađene glodanjem na prvu čistu mjeru (dimenzija „a“ u tablici 1).

*Tablica 1. Mehanička svojstva lamella*

	Naziv	a / mm	b / mm	$S_0$ / mm <sup>2</sup>	$l_0$ / mm	$l_k$ / mm	$A_s$ / %	$F_e$ / N	$F_m$ / N	$R_e$ / MPa	$R_m$ / MPa
1	Unutarnja lamela	5,0	16	80	50	61,8	23,6	32000	55200	400	690
2	Vanjska lamela	7,0	19,4	135,8	70	84,6	20,8	57500	98000	423	722
3	Papuča	5,0	16	80	50	62,8	25,6	34500	53400	431	668

- c) površinska tvrdoća metodom HRC:

Na svim dijelovima lanca provedena je kontrola površinske tvrdoće metodom HRC (opterećenje 150 kg). Rezultati izmjerenih tvrdoća i njihove srednje vrijednosti prikazane su u tablici 2. Treba napomenuti da nije uobičajeno da se tvrdoća nezakaljenih dijelova kontrolira Rockwell C metodom. Međutim ovdje su rezultati prikazani u HRC kako bi se istaknule razlike između pojedinih dijelova lanca.

*Tablica 2. Površinska tvrdoća dijelova lančanog transportera*

	Naziv dijela lanca	Površinska tvrdoća, HRC	
		pojedinačno	srednja vrijednost
1	Lamela unutarnja, vanjska i papuča	10, 11, 13, 12, 11, 15, 10, 12, 11, 13	12
2	Čahura Ø42/Ø30 x 65 mm, oštećen donji dio	27	27
3	Čahura Ø42/Ø30 x 65 mm, neoštećen gornji dio	43, 41	42
4	Čahura Ø42/Ø30 x 65 mm, neoštećen srednji dio	32, 29, 21	27
5	Čahura Ø42/Ø30 x 65 mm, neoštećen donji dio	27, 23	25
6	Svornjak Ø30 neoštećene površine	21, 26, 22, 23, 23	23

#### 3.1 Metalografska ispitivanja strukture i mjerenje tvrdoća po poprečnom presjeku (HV1)

Ispitivanje oštećenih dijelova lanca jednim dijelom je obavljeno na terenu odnosno u samoj tvornici, a drugim kompleksnijim dijelom u laboratorijsima Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu. Terenski dio ispitivanja sastojao se je od: vizualne i dimenzionalne kontrole istrošenih dijelova. Laboratorijski dio sastojao se od ispitivanja kemijskog sastava materijala dijelova lanca, metalografskih pretraga struktura te kontrole tvrdoća (HRC,HV1).

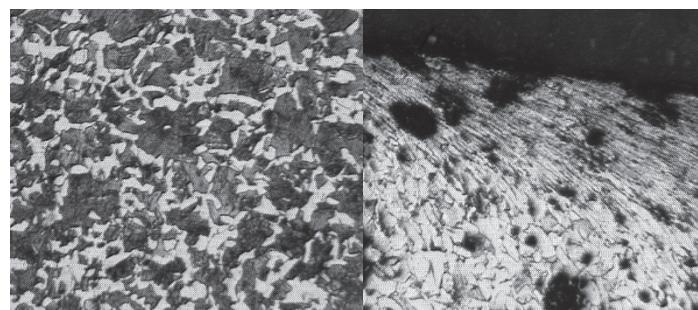
- a) Lamele i papuče:

Kako su ovi dijelovi lanca izrađeni od iste vrste čelika za poboljšavanje, metalografske pretrage izvršene su samo na po jednom uzorku i to uzetom iz oštećene lamele prvrta Ø30 mm i papuče istog prvrta, slika 4. Feritno-perlitna struktura poprečnog presjeka lamele i papuče, karakteristična za žareno stanje, prikazana je na slici 5a.



Slika 4. Oštećena lamella

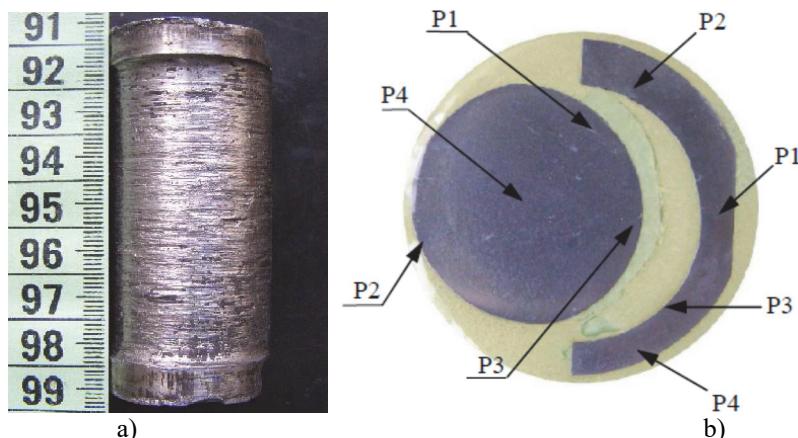
To potvrđuje i jako deformirana struktura rubnih zona prvrta u vučnom dijelu lamele i papuče, slika 5b. Da su lamele isporučene u žarenom stanju, iako se radi o čeliku za poboljšavanje, osim mikrostrukture ukazuju i rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava (tablica 1). Za C45E koji je predviđen za poboljšavanje propisano je da u poboljšanom stanju ima vrijednosti  $Re=480 \text{ MPa}$  i  $Rm=750 \div 900 \text{ MPa}$ .



Slika 5. Karakteristična mikrostruktura jezgre lamele (a) i rubna zona lamele (b)

b) Svornjak Ø30 mm oštećen:

Iz svornjaka prikazanoga na slici 6a, isječen je uzorak i izvršena priprema uzorka za kontrolu toka tvrdoće i metalografiju. Ispitni uzorak oštećenog svornjaka Ø30 mm uzet je na mjestu "vučne" strane lanca, slika 6a, a izborom mesta uzorkovanja postignuta je mogućnost kontrole stanja tvrdoće i strukture od površine prema jezgri.



Slika 6. Izgled oštećenog svornjaka na mjestu "zajeda" (a) i makrosnimak poprečnog presjeka uzorka sa označenim pozicijama mjerena tvrdoće na svornjaku i čahuri (b)

Na makrosnimku poprečnog presjeka svornjaka i čahure označene su pozicije mjerena toka tvrdoće i pozicije snimljenih mikrostruktura svornjaka kako bi bilo jasnije o kojem se mjestu na poprečnom presjeku uzorka radi slika 6b. Vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće (HV1) na uzorku oštećenog svornjaka prikazane su u tablici 3.

Na slici 7 prikazani su novi svornjaci. Svornjaci se mijenjaju kada prethodni budu istoršeni ili oštećeni.



Slika 7. Novi svornjaci

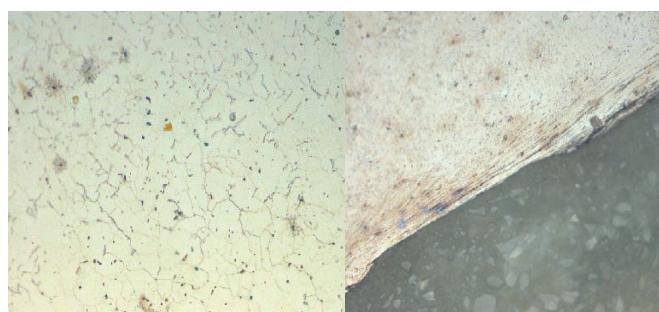
Metalografske pretrage strukture potvrdile su da svornjaci imaju austenitnu strukturu, sa izlučenim i fino raspoređenim precipitatima karbida kroma slika 8a. Rubna zona ukazuje na intenzivno ugnjećenu površinu svornjaka uz izduženje austenitnog zrna u smjeru vučnog dijela slika 8b. Lokalno se uočava prijelaz materijala s čahure na svornjak kao posljedica djelovanja adhezijskog trošenja.

Adhezijsko se trošenje manifestira prijelazom materijala s jedne tarne plohe na drugu u uvjetima neposrednog dodira metalnih površina tijela pri relativnom gibanju. Iako ne postoji izravna ovisnost veličine trenja s trošenjem, pojавa adhezijskog trošenja povezana je i s trenjem pri klizanju. U praksi se, pri konstruiranju dijelova izloženih adhezijskom trošenju, izbjegava korištenje istovrsnih materijala. Složeniji, skuplji i teže izmjenjivi dijelovi se izrađuju od materija otpornijeg na trošenje. Materijal manje otporan na trošenje svjesno se izabire za izradu jeftinijih i/ili lakše izmjenjivih dijelova.

Tablica 3. Rezultati mjerjenja mikrotvrdoća (HV1) na uzorku oštećenog svornjaka

Udaljenost od ruba, mm	Tvrdoća, HV1 - Svornjak	
	pozicija 1	pozicija 2
0,1	294	269
0,2	283	276
0,3	283	263
0,5	239	269
1	193	251
1,5	182	234
2	168	214
3	171	182
jezgra	165; 168; 162; 156	

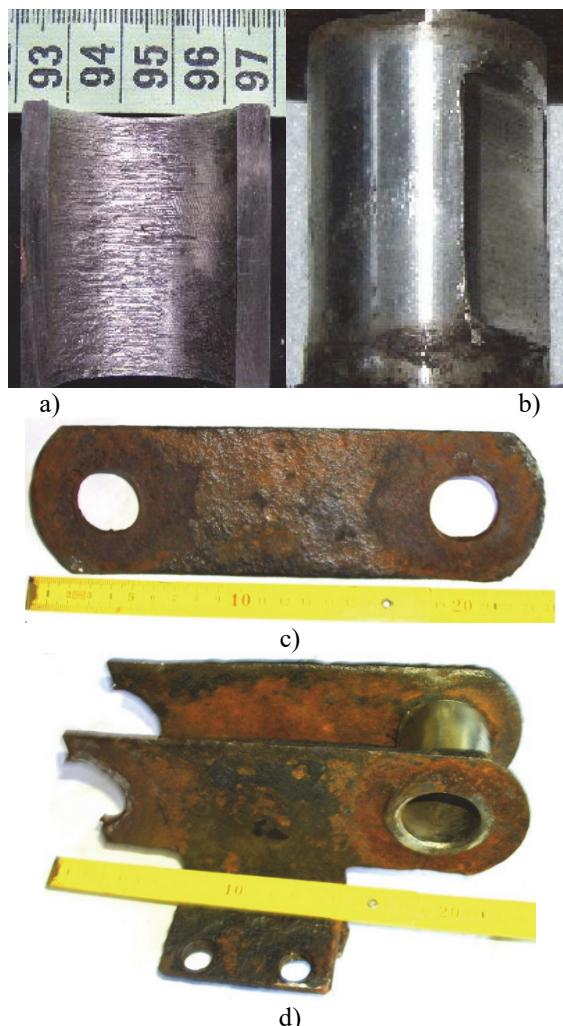
U uvjetima relativnog gibanja površine tijela neravninom dolaze u kontakt, a na tim mjestima vladaju visoki specifični pritisci što dovodi do plastične deformacije materijala i prisnog dodira (s izraženima silama adhezije). Te sile mogu biti veličinom različite, od slabih sekundarnih do jakih primarnih. Kao rezultat adhezije i plastične deformacije u materijalu se generira toplina pa se formiraju zavareni mikrospojevi (mikrozavari). Ako su sile u mikrospoju jače od kohezijskih sila u materijalu, dolazi do adhezijskog trošenja. Tijekom relativnog gibanja – sklizanja, ti se spojevi raskidaju [3].



Slika 8. Karakteristična austenitna struktura jezgre svornjaka, povećanje 500x (a) i struktura rubne zone svornjaka, povećanje 200x (b)

c) Čahura Ø42/Ø30 x 65 mm

Analizom tribosustava elevatorskog lanca za potrebe ispitivanja odabrana je vidno oštećena čahura. Čahuru je prethodno bilo potrebno isprešati iz vanjske lamele. Nakon isprešavanja, uočeno je da je ova čahura oštećena u vučnom dijelu kontakta sa svornjakom Ø30 mm (slika 9a), ali i sa vanjske strane uslijed kontakta s lančanikom (slika 9b). Na slici 9c prikazana je vanjska lamela oštećena općom korozijom, dok slika 9d prikazuje unutarnju papuču oštećenu općom korozijom.



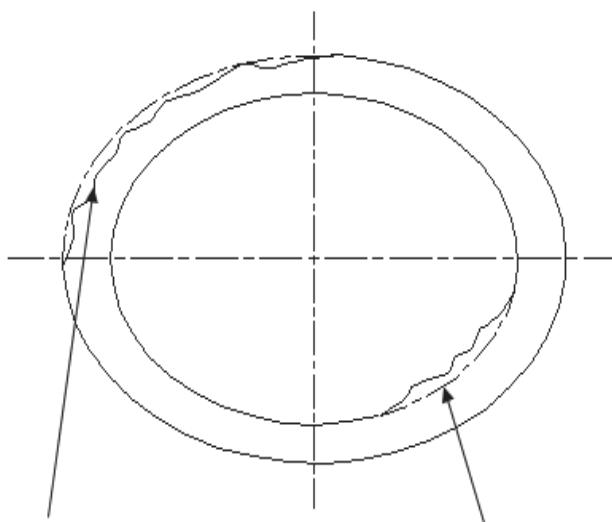
Slika 9. Tragovi trošenja unutarnjeg dijela čahure (a), oštećenje vanjskog dijela čahure uslijed kontakta s lančanicom (b), vanjska lamela oštećena općom korozijom (c), unutarnja papuča oštećena općom korozijom (d).

Na makrosnimku poprečnog presjeka oštećene čahure, označene su pozicije mjerjenja toka tvrdoće i pozicije snimljenih mikrostruktura materijala čahure kako bi bilo jasnije o kojem se mjestu na poprečnom presjeku uzorka radi slika 6b. Vrijednosti izmerene mikrotvrdoće (HV1) na uzorku oštećene čahure prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerjenja mikrotvrdoća (HV 1) na uzorku oštećene čahure

Udaljenost od ruba, mm	Tvrdoća, HV1 - Čahura	
	1	2
0,1	269	348
0,2	269	330
0,3	263	305
0,5	251	357
1	229	219
1,5	214	189
2	210	193
3	205	185
jezgra	171; 197; 203; 197	

Slika 10 prikazuje skicu istrošenosti čahure. Označeni su dijelovi čahure koji se najčešće troše, a to su vanjski dio koji je u kontaktu sa zubima lančanika te unutarnji dio koji je u kontaktu sa svornjacima.



dio vanjske površine čahure trošen  
u kontaktu s zubima lančanika

dio unutarnje površine čahure  
u kontaktu sa svornjakom

*Slika 10. Skica istrošenosti čahure nakon uporabe*

Mikrostruktura jezgre čahure i mikrostruktura svornjaka je austenitna što prikazuje slika 11a. Na površinskom sloju svornjaka su izlučeni i fino raspoređeni precipitati kromovih karbida što je vidljivo na slici 11b. Zbog oštećenja vanjskog dijela čahure u kontaktu s lančanikom ispitana je površinska tvrdoća lančanika. Tvrdoća je mjerena na terenu prijenosnim tvrdomjerom MIC10 i iznosi oko 60 HRC na uzubljenom dijelu lančanika.



*Slika 11. Austenitna struktura jezgre svornjaka, povećanje 500x (a) i struktura rubne zone svornjaka, povećanje 200x (b)*

#### 4 ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem dostavljenih dijelova lančanog transporterera utvrđeno je da su:

- Lamele lančanog transporterera izrađene od čelika za poboljšavanje C45E isporučene su u žarenom stanju pa su oštećenja provrta Ø30 mm nastupila kao posljedica s jedne strane nedovoljne čvrstoće lamela, a sa druge pak strane uslijed kontakta s tvrdom "čahurom" Ø42/Ø30x65 mm. Trošenje lamele se manifestira oštećivanjem spojnog mjesta (vanska lamela-svornjak), a kao rezultat toga je po povećanje koraka lanca i „naskakivanje“ na vrh zuba lančanika, što uzrokuje pojavu nedopuštenih sila istezanja i kidanja spojnog mjesta lanca.

▪ "Čahure" Ø42/Ø30x65 mm izrađene su od čelika X5 CrNiMo 17-12-2, na što ukazuje kemijksa analiza uzorka. Makrosnimka poprečnog presjeka pokazuje da je do odnošenja površinskog sloja došlo uglavnom u "vučnom" dijelu čahure. Uslijed kontakta unutrašnjeg dijela čahure i svornjaka koji se nalaze u labavom dosjedu, omogućen je prolazak agresivnog medija između dosjednih površina što uzrokuje pojavu tribokorozije, gdje pri tom trošenju korozija djeluje kao prateći proces uz adhezijski mehanizam trošenja. S druge strane vanjska površina čahure oštećena je uslijed zajedničkog kontakta sa znatno tvrdom uzbinom lančanika.

▪ Svornjaci Ø30 mm također su izrađeni od istog čelika kao i „čahure“. Rubna zona ukazuje na intenzivno ugnječenu površinu svornjaka uz izduženje austenitnog zrna u smjeru vučnog dijela gdje je najvjerojatnije došlo do očvrsnuća površinskog sloja uslijed „hladne deformacije“ tj. udarnog opterećenja između svornjaka i čahure. Lokalno se uočava pojava adhezijskog trošenja koje se manifestiralo prijelazom materijala s jedne tarne plohe na drugu odnosno sa svornjaka na čahuru.

Kako se materijali triboelemenata izabiru s ciljem smanjenja trenja i trošenja to je, u cilju ispravnog funkcioniranja tribosustava, vrsta osnovnog materijala neizostavno direktno povezana s postupkom oplemenjivanja površina u svrhu njihove zaštite od trošenja [3]. Na osnovu analize dobivenih rezultata provedenih ispitivanja lanca, jedan od mogućih pristupa rješavanju problema bio bi izrada lamela od ugljičnog čelika u poboljšanom stanju. Svornjaci mogu biti izrađeni od legiranog čelika, a čahure također izrađene od legiranog čelika i isporučene u poboljšanom stanju uz eventualno naknadno nitriranje.

Također treba skrenuti pozornost da se kod nabave opreme i zamjenskih dijelova obavezno treba obratiti pozornost u smislu kontrole kvalitete zamjenskih dijelova, kako bi se izbjegla katastrofalna oštećenja i nepredviđeni zastoji. Saznanja do kojih se došlo ovakvim pristupom ispitivanju, ne samo da je moguće koristiti kod uklanjanja problema s već korištenom (oštećenom) opremom, nego (što je čak i važnije) upućuju na zaključak o potrebi vrlo pažljivog definiranja uvjeta prilikom nabave novih dijelova.

## 5. LITERATURA

- [1] Grilec, K., Jakovljević, S., Marić, G.: Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017., 228 str.
- [2] Bojko, L., Ryniewicz, W., Ryniewicz, A.M., Kot, M.: Study of the impact of incremental technology on mechanical and tribological properties, Tribologia 3 (2017), pp. 29-38.
- [3] Marušić, V.: Tribologija u teoriji i praksi, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2008. 135 str.
- [4] Sustavi označivanja za čelike - 1. dio: Nazivi čelika (EN 10027-1:2016).