



TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE ZUBACA ZUPČANIKA REPARATURNNO NAVARENIIH TIG POSTUPKOM

Prof. dr Danica JOSIFOVIĆ, Prof. dr Slobodan TANASIJEVIĆ,
Mašinski fakultet, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac

Mr Svetislav Lj. MARKOVIĆ,
Viša tehnička škola, Svetog Save 65, 32000 Čačak, e-mail:svetom@ptt.yu

Rezime:

Da bismo ustanovili opravdanost primene reparaturnog navarivanja pri obnavljanju parametara radne sposobnosti pohabanih zupčanika, poredili smo tribološke karakteristike regenerisanih i novoizrađenih zupčanika. Sproveli smo ispitivanja mikrotvrdoće, modelska ispitivanja (određivanje koeficijenta trenja i širine pojasa habanja) i eksperimentalna tribološka ispitivanja. Na osnovu sprovedenih ispitivanja došli smo do zaključka da je radni vek regenerisanih zupčanika oko 12 % duži od novoizrađenih.

Ključne reči: zupčanik, tribološka ispitivanja, reparaturno navarivanje, piting, radni vek.

1. UVOD

Dosadašnja istraživanja u oblasti regeneracije zupčanika pokazala su da je reparaturno navarivanje oštećenih radnih površina zubaca najpouzdaniji metod obnavljanja oblika, dimenzija i radnih karakteristika zupčanika. Za pravilan izbor adekvatnog metoda reparaturnog navarivanja neophodno je poznavati mehanizme habanja površina u kontaktu. Na osnovu analiza rada zupčanika, njihovih geometrijskih karakteristika i mehanizama habanja, koji najčešće nastaju pri sprezanju zubaca, kao osnovni metod regeneracije izabrano je električno navarivanje TIG postupkom u zaštiti argona. Prilikom navarivanja potrebno je strogo se pridržavati propisanog postupka, jer se inače mogu pojaviti problemi vezani za zakaljivost i pojavu hladnih prslina.

2. PRIPREMA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Kao osnovni materijal korišćen za izradu uzoraka u ovom eksperimentalnom radu upotrebljen je čelik za cementaciju Č4321, čije oznake po našem, nemačkom, ruskom, američkom i među-

narodnom (ISO) standardu i hemijski sastav su prikazani u tabeli 1.

Tribološka ispitivanja su sprovedena na modelima (na tribometru) i konkretnim zupčanicima (na uređaju za ispitivanje).

Probni uzorci za ispitivanje na tribometru TPD-93 po metodi "block on disc" izrađeni su od čelika za cementaciju oznake Č4321. Uzorci su izrađivani tako da simuliraju uslove rada spregnutih zubaca konkretnih zupčanika u uslovima kakvi su u uređaju za eksploatacionu ispitivanja.

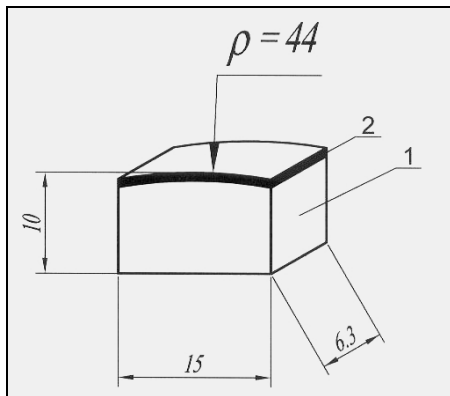
Diskovi dimenzija $\phi 60 \times 10$ mm su, posle mašinske obrade na strugu, gasno cementirani, kaljeni i otpušteni, a zatim brušeni. Njihova tvrdoća kretala se u granicama 56÷56,2 HRC.

Blokovi su izrađivani od istog materijala, s tom razlikom što su jedni navarivani, a drugi ne (prvi su simulirali rad regenerisanih, a drugi novoizrađenih zupčanika). Potom su brušeni sa radijusom zaobljenja (slika 1) koji odgovara računskoj vrednosti srednjeg poluprečnika zubaca zupčanika koji se regenerišu:

$$\rho = R_1 \cdot \sin \alpha = 129 \cdot \sin 20^\circ \cong 44 \quad \text{mm}$$

Tabela 1. Hemijski sastav čelika za izradu uzoraka

Oznaka čelika prema standardima						
JUS	DIN		GOST	SAD		ISO DIS 683/11
	17007	17006		AISI/SAE	UNS	
Č4321	1.7147	20MnCr5	18HGT	4820	G48200	≈ 20MnCr5
Legirajući elementi (%)						
C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	
0,17-0,22	0,15-0,40	1,1-1,4	0,035	0,035	1,0-1,3	



Slika 1. Uzorci ispitivani na tribometru (1 – osnovni materijal, 2 – navareni sloj; ρ - radijus krivine zupca)

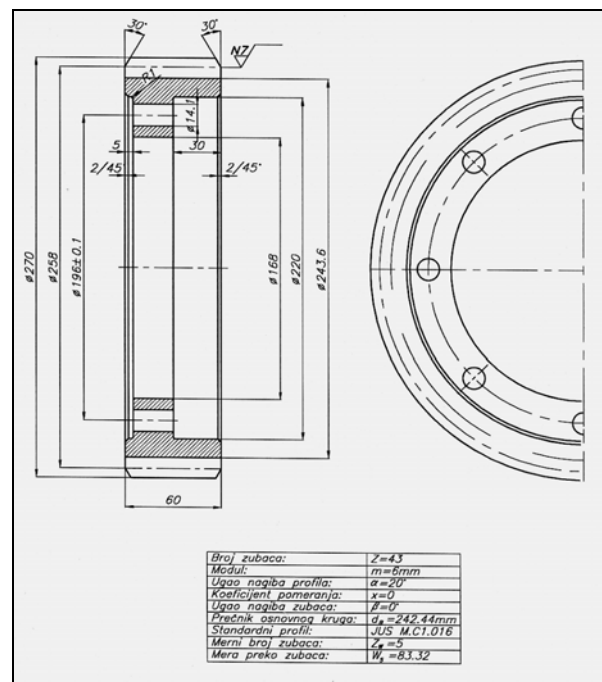
Zupčanici pripremljeni za tribološka ispitivanja (slika 2) imaju sledeće karakteristike:

- materijal izrade: Č4321,
- modul: $m = 6$ mm,
- broj zubaca: $z = 43$,
- ugao osnovnog profila: $\alpha = 20^\circ$,
- ugao nagiba zupca: $\beta = 0^\circ$,
- prečnik podeonog kruga: $d_o = 258$ mm,
- korekcija profila: $x_m = 0$,
- prečnik osnovnog kruga: $d_b =$ mm,
- prečnik podnožnog kruga: $d_f = 243,6$ mm,
- korak na podeonom krugu: $t_0 = 18,84$ mm.

Tehnološki proces regeneracije zupčanika sastoji se od sledećih zahvata:

- uklanjanje cementiranog sloja sa aktivnih radnih površina zubaca brušenjem na oštrilici na dubinu od $1,2^{+0,2}$ mm i 12 mm po visini zupca,
- predgrevanje zupčanika na temperaturu $T = 230^\circ\text{C}$ i držanje na postignutoj temperaturi u vremenu $t = 2^h$,
- sušenje elektroda na temperaturi $T = 350^\circ\text{C}$ u trajanju od $t = 4^h$,
- navarivanje TIG postupkom, u zaštiti argona, žicom $\phi 1,2$ mm, pripremljenih površina dodatnim materijalom DUR 600-IG,

- vraćanje navarenih zupčanika u peć i lagano hlađenje zajedno sa peći,
- brušenje navarenih zubaca na mašini za brušenje zupčanika "Niles".

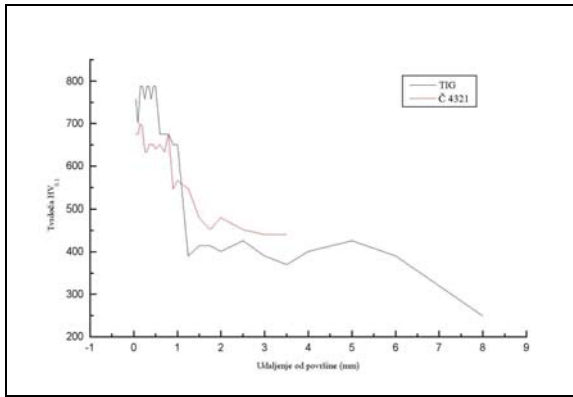


Slika 2. Cilindrični zupčanik sa pravim zupcima

3. ISPITIVANJE MIKROTVRDOĆE

Tvrdoća po preseku zubaca (mikrotvrdoća) merena je na uređaju za merenje mikrotvrdoće "LEITZ WETZLAR" metodom Vickers ($HV_{0,1}$) sa silom opterećenja od 1 N i vremenom utiskivanja 15 sekundi. Rezultati merenja prikazani su u tabelama 2 i 3 kao i na dijagramu datom na slici 3.

Poredeći raspodelu mikrotvrdoće novoizrađenih i navarenih uzoraka zapaža se da navari imaju izrazito veću mikrotvrdoću potpovršinskog sloja od cementiranih uzoraka, ali i da je pad mikrotvrdoće na prelazu navar – zona pod uticajem toplote daleko oštriji. Ovakav pad dovodi do slabije otpornosti na dinamička opterećenja savijanja, ali nema znatnijeg uticaja na izdržljivost bokova zubaca.

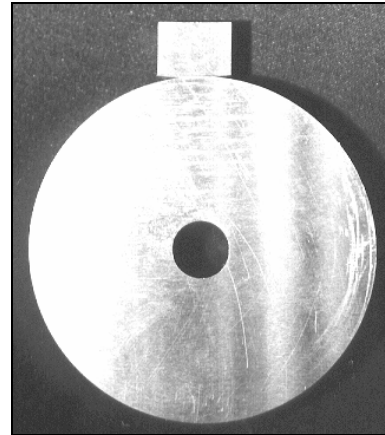


Slika 3. Dijagram raspodele mikrotvrdoće novoizrađenih i navarenih zubaca

4. MODELSKA TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA

Za modelska-tribološka ispitivanja korišćeni su blokovi i diskovi, čiji je izgled pre postavljanja na tribometar prikazan na slici 4. Podmazivanje je izvođeno zahvatanjem određene količine ulja pomoću donjeg dela diska, koji rotira ugaonom brzinom $\omega = 92,7 \text{ s}^{-1}$. Linijski kontakt se ostvaruje dodiranjem čelone površine bloka i obimne površine diska, ali usled habanja i plastične deformacije prerasta u površinski kontakt.

Na osnovu sprovedenih triboloških ispitivanja određivani su srednji koeficijenti trenja (μ_{sr}), čije vrednosti su date u tabeli 4 i na dijagramima prikazanim na slikama 5 i 6. Istovremeno određivana je i topografija površina ispitivanih blokova merenjem pojasa pohabanosti. Širina pojasa habanja merena je na univerzalnom mikroskopu UIM-21, a rezultati su prikazani u tabeli 4.



Slika 4. Blok i disk pripremljeni za modelska-tribološka ispitivanja

Tabela 2. Mikrotvrdoća uzorka navarenog TIG postupkom DM DUR 600-IG

Udaljenje od površine [mm]	0,0 5	0,1	0,1 5	0,2	0,2 5	0,3	0,3 5	0,4	0,4 5	0,5	0,6	0,7	0,8
Tvrdoća HV _{0,1}	757	700	787	787	757	787	787	757	787	787	675	675	675
Odgovara HRC	62, 4	60, 1	63, 6	63, 6	62, 4	63, 6	63, 6	62, 4	63, 6	63, 6	59, 0	59, 0	59, 0
Udaljenje od površine [mm]	0,9	1,0	1,2 5	1,5	1,7 5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0
Tvrdoća HV _{0,1}	650	650	390	414	414	401	426	390	370	401	426	390	249
Odgovara HRC	57, 8	57, 8	39, 8	42, 2	42, 2	40, 9	43, 2	39, 8	37, 7	40, 9	43, 2	39, 8	22, 0

Tabela 3. Mikrotvrdoća uzorka od Č4321, cementiranog i termički obrađenog

Udaljenje od površine [mm]	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6
Tvrdoća HV _{0,1}	675	675	700	690	634	634	650	650	650	640	650
Odgovara HRC	59,0	59,0	60,1	59,7	57,0	57,0	57,8	57,8	57,8	57,3	57,8
Udaljenje od površine [mm]	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5
Tvrdoća HV _{0,1}	634	675	547	566	547	480	452	480	452	440	440
Odgovara HRC	57,0	59,0	52,1	53,3	52,1	47,7	45,5	47,7	45,5	44,5	44,5

Na osnovu sprovedenih triboloških ispitivanja određivani su srednji koeficijenti trenja (μ_{sr}), čije vrednosti su date u tabeli 4 i na dijagramima prikazanim na slikama 5 i 6. Istovremeno određivana je i topografija površina ispitivanih blokova merenjem pojasa pohabanosti. Širina pojasa habanja merena je na univerzalnom mikroskopu UIM-21, a rezultati su prikazani u tabeli 4.

Na osnovu sprovedenih modelskih-triboloških ispitivanja na tribometru lako je zaključiti da je i sa aspekta otpornosti na habanje (najmanje širine traga habanja) i sa energetskog aspekta (minimalnog koeficijenta trenja) povoljniji osnovni materijal (Č4321).

5. EKSPERIMENTALNA TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA

Tribološka ispitivanja regenerisanih i novoizrađenih zupčanika izvođena su na uređaju sa zatvorenim kolom opterećenja i reaktivnom teretnicom (slika 7).

U cilju obezbeđenja ispitivanih zupčanika od oštećenja u periodu uhadavanja maksimalni obrtni moment pri kome je obavljeno ispitivanje nije odmah doveden u zatvoreno kolo snage uređaja za ispitivanje. Naime, opterećenje je stepenasto povećavano prema sledećem planu:

- ✓ u prvih 10^6 ciklusa opterećenja, $T = 600$ Nm,
- ✓ potom, u 10^6 ciklusa opterećenja, $T = 1200$ Nm,
- ✓ u sledećih 10^6 ciklusa opterećenja, $T = 1800$ Nm,
- ✓ zatim, u 10^6 ciklusa opterećenja, $T = 2400$ Nm,
- ✓ na kraju, do prekida ispitivanja, $T = 3000$ Nm.

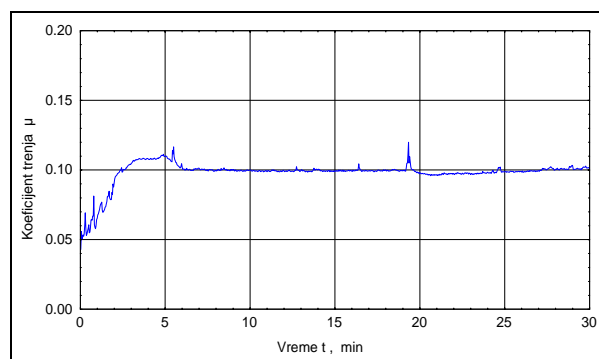
Ispitivanja su trajala $98 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja, odnosno 1950 časova rada.

Tabela 4. Koeficijenti trenja (μ_{sr}) i širine pojasa habanja

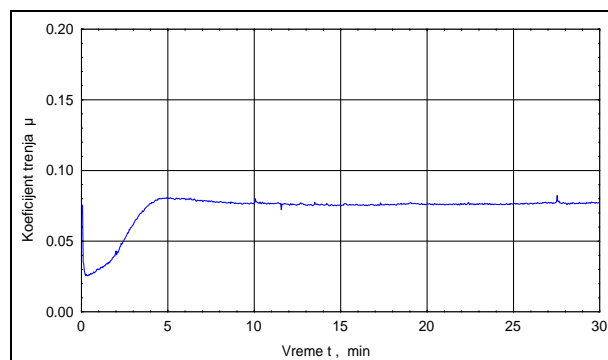
Disk		Blok		Koeficijent trenja μ_{sr}	Širina pojasa habanja (mm)
Materijal	Tvrdoća HRC	Dodatni materijal	Postupak navarivanja		
Č4321	55-58	DUR 600-IG	GTAW (TIG) (141)	0,100	1,020
		Č4321	/	0,077	0,751

Početak pitinga, odnosno pojava inicijalnih jamica, kod novih zubaca uočen je dosta rano, čak pre nego kod navarivanjem regenerisanih zubaca. Posle prvih jamica uočenih pri $69 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja postepeno i dosta sporo počele su se

Kod zubaca navarenih TIG postupkom sa žicom DUR 600-IG prve jamice, koje su najavile početak razornog pitinga, uočene su u predelu noge zupca tek posle $74 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja. Posle $98 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja razorni piting je ošteti vrh zupca i nogu, uz pojavu nekoliko pojedinačnih jamica većih dimenzija i male dubine, što se vidi na slici 8. Ukupna površina najugroženijeg zupca zahvaćena razornim pitingom je oko 12 % od ukupne radne površine boka zupca.



Slika 5. Promena koeficijenta trenja pri ispitivanju bloka od Č4321 navarenog TIG postupkom DM DUR 600-IG i diska od Č4321



Slika 6. Promena koeficijenta trenja pri ispitivanju bloka od Č4321, cementiranog i kaljenog, i diska od istog materijala

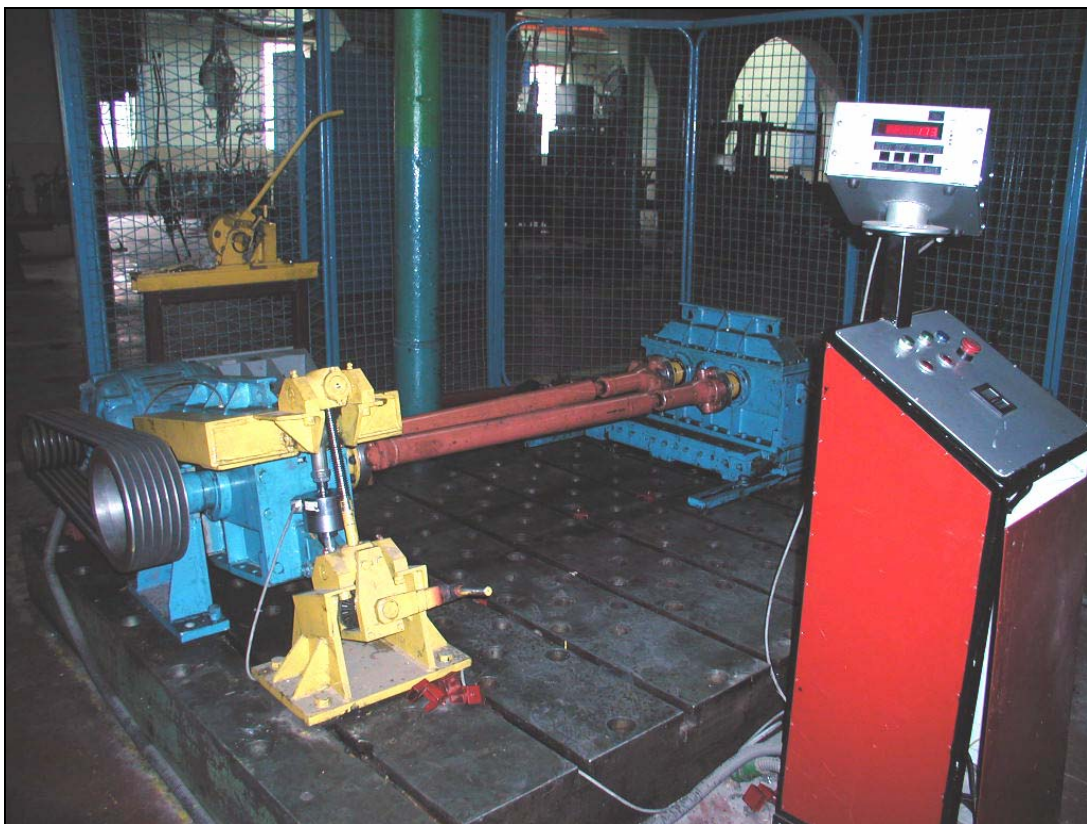
javljati i druge jamice. Pojava inicijalnih zamornih jamica kod zubaca novoizrađenih zupčanika je "privilegija" isključivo noge zupca. Tek znatno kasnije (nakon 12-15 miliona ciklusa) počela su se javljati obeležja razornog pitinga i na glavama

novih zubaca. Kod ovih zupčanika se može dosta jasnije uočiti onih šest faza razornog pitinga o kojima drugi istraživači pišu (pre svih [2]). Na slici 9 jasno se vide jamice nastale ispod podeonog cilindra zupčanika u fazi neposredno pre obrazovanja klina. Posebnu zanimljivost predstavlja podatak da se i na fotografiji može lako uočiti promena boje radnih površina zubaca usled zamora, koja prethodi nastanku razornog pitinga.

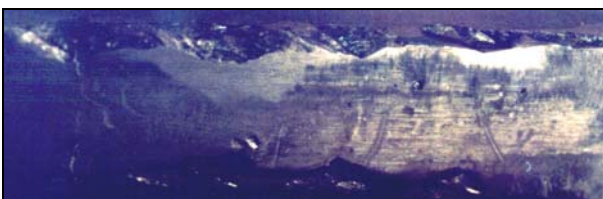
Na završetku ispitivanja, to jest posle $98 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja, procenjeno je da je 18 % aktivne površine boka zupca zahvaćeno pitingom (slika 10). Takođe značajno je istaći da su svi zupci sličnog nivoa oštećenja, što nije slučaj kod navarivanih, gde su razlike u nivou oštećenosti

(procentu pitingom razorenih površina) pojedinih zubaca znatno veće.

Kod navarenih zubaca jamice su kasnije nastale, a i brzina razvoja razornog pitinga nije veća nego kod novih. Ukoliko bi se kao granično habanje uzela desetoprocenatna zahvaćenost površine najugroženijih zubaca razornim pitingom dobili bismo radni vek regenerisanih zubaca od $95 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja, dok bi kod novoizrađenih on bio kraći ($85 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja). Na taj način pokazali smo da je radni vek regenerisanih zubaca duži za oko 12 % od veka trajanja novoizrađenih.



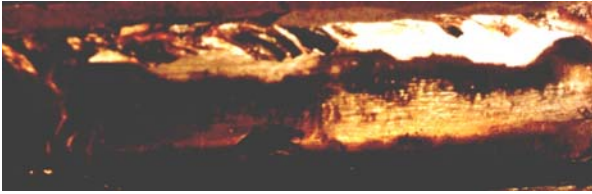
Slika 7. Uređaj za ispitivanje zupčanika sa zatvorenim kolom opterećenja i reaktivnom teretnicom



Slika 8. Bok zupca navaren TIG postupkom dodatnim materijalom DUR 600-IG oštećen pitingom



Slika 9. Jedna od početnih faza razornog pitinga radnih površina zubaca novoizrađenih zupčanika



Slika 10. Novoizrađeni zubac oštećen razornim pitingom posle $98 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja

6. ZAKLJUČAK

Eksperimentalnim radom pokazali smo da se veoma uspešno mogu regenerisati delovi složenog geometrijskog oblika izrađeni od uslovno zavarljivi-

vih materijala. Primenom pravilno odabranog postupka reparaturnog navarivanja moguće je dobiti regenerisani zupčanik sa boljim radnim karakteristikama (dužim radnim vekom) od novoizrađenog, uz znatne materijalne uštede.

7. LITERATURA

- [1] Marković S.: *Uticaj vrste navarivanja na radne karakteristike regenerisanih zupčanika*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2003.
- [2] Tanasijević S.: *Osnovi tribologije mašinskih elemenata*, "Naučna knjiga", Beograd, 1989.